

Février 2025

Empreinte et trajectoire carbone des monuments historiques

Annexes IV et V du rapport final

À consulter en parallèle du rapport pour en compléter sa lecture au fur et à mesure.



Annexe V

Détails sur le volet travaux de l'empreinte
et de la trajectoire carbone des MH

Attention : Les graphiques et résultats détaillés ici servent à approfondir la compréhension des résultats présentés dans le rapport final de l'étude. Il ne s'agit pas d'un document à lire de manière indépendante ; et les différentes sections de l'annexe sont également indépendantes les unes des autres.

Sommaire

Annexe V : Travaux

Empreinte carbone

Section 1 : Les étapes de modélisation des émissions des travaux

Section 2 : Renouvellement des matériaux

Section 3 : Listes des opérations étudiées

Section 4 : Résultats des émissions sans renouvellement

Section 5 : Analyse d'une opération représentative

Section 6 : Emissions par typologie avec affichage du chantier

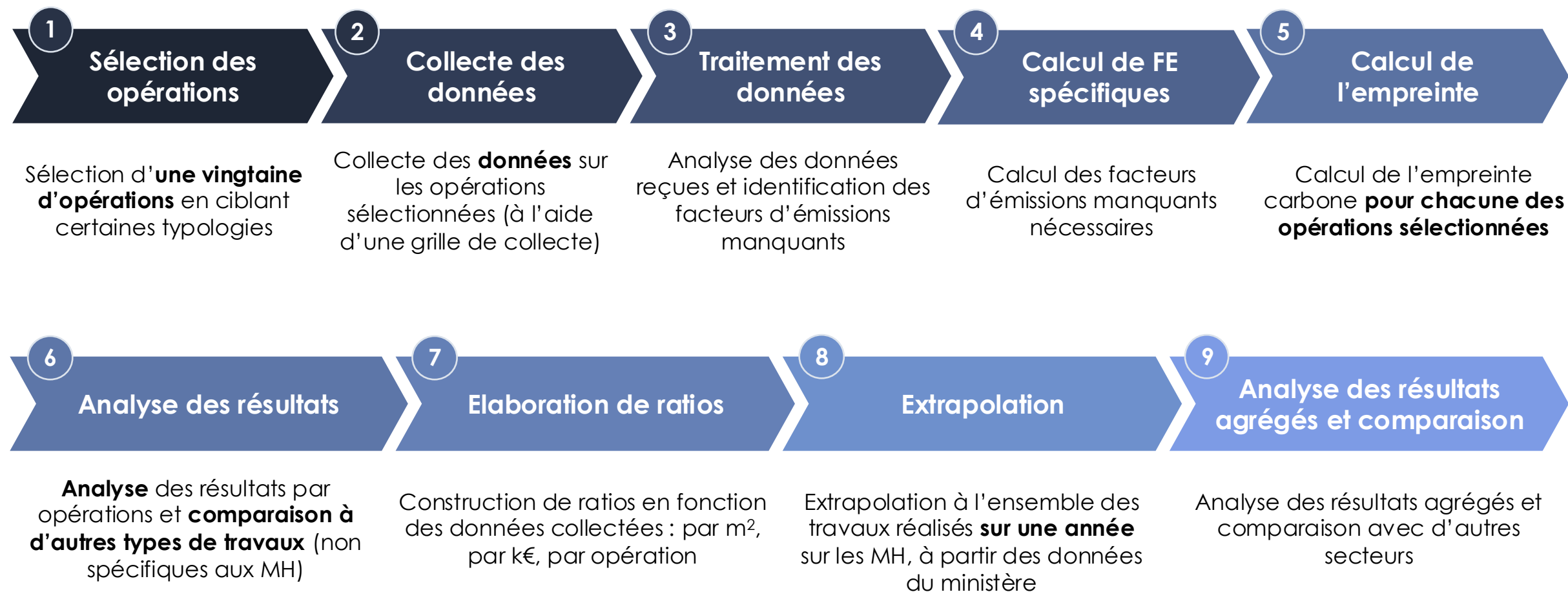
Section 7 : Comparaison de différents matériaux de couverture

Leviers de décarbonation

Section 8 : Leviers

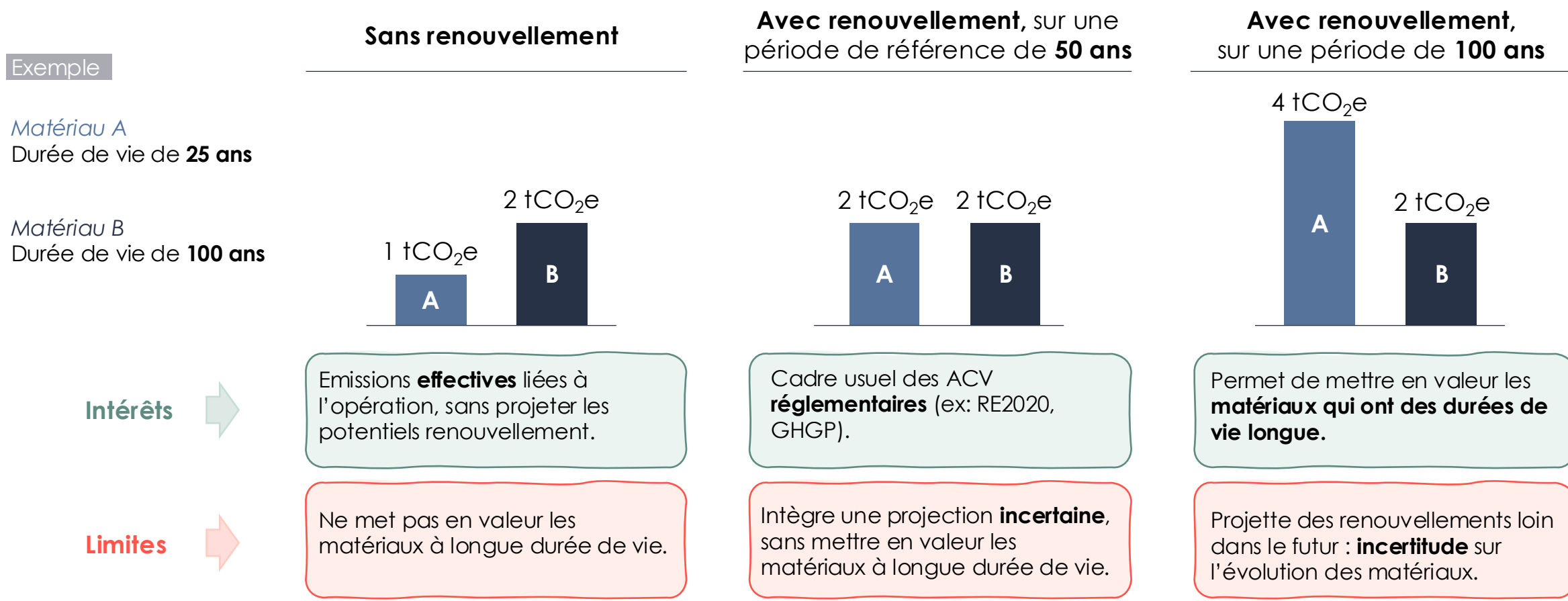
Section 9 : Etudes de cas sur les leviers

Les étapes de l'approche par échantillonnage :



Intérêts et limites d'une approche avec ou sans renouvellement des matériaux

Il est possible de présenter les résultats de plusieurs manières :



Notabene : dans une vision sur 50 ans, réduire les émissions d'un matériau avec une durée de vie supérieure à 50 ans (ex: diviser par 2 les émissions du matériau B), serait peu rigoureux scientifiquement (étant donné que le matériau a émis la plupart des émissions lors de sa fabrication et mise en œuvre qui ont eu lieu).

Choix de l'approche méthodologique sur le renouvellement des matériaux

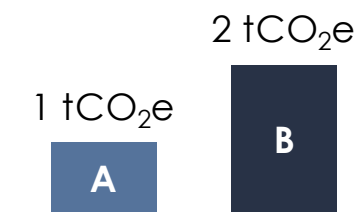
Il est possible de présenter les résultats de plusieurs manières :

Exemple

Matériau A
Durée de vie de **25 ans**

Matériau B
Durée de vie de **100 ans**

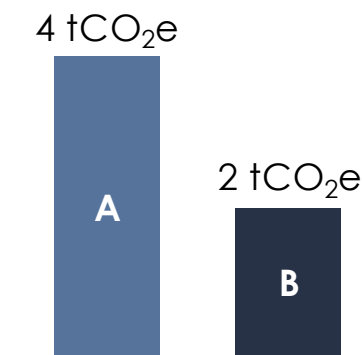
Sans renouvellement



Avec renouvellement, sur une période de référence de 50 ans



Avec renouvellement, sur une période de 100 ans



- À la suite des discussions entre les membres du Groupe Technique, il a été choisi de calculer et analyser les résultats de chaque opération **avec et sans renouvellement sur 50 ans**. Les résultats globaux sont donc représentés des deux manières autant que possible. L'une ou l'autre représentation est parfois choisie (pour éviter de doubler tous les résultats)
- Le calcul sur une période de **100 ans** a été réalisé uniquement pour les **3 études de cas**, afin d'analyser l'écart entre les différents périmètres temporels et d'étudier la pertinence et les limites de cette approche.

Processus de sélection des opérations pour assurer la représentativité

	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 ^t 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 ^t Cannat, Marseille, XVII ^e

Critères de choix des opérations

Périmètre

Les travaux ont concerné différents lots de construction

Données disponibles

DGD disponible et si concerné les consommations énergétiques avant et après travaux

Type d'opérations

Opération de restauration
Opération avec un objectif de performance énergétique

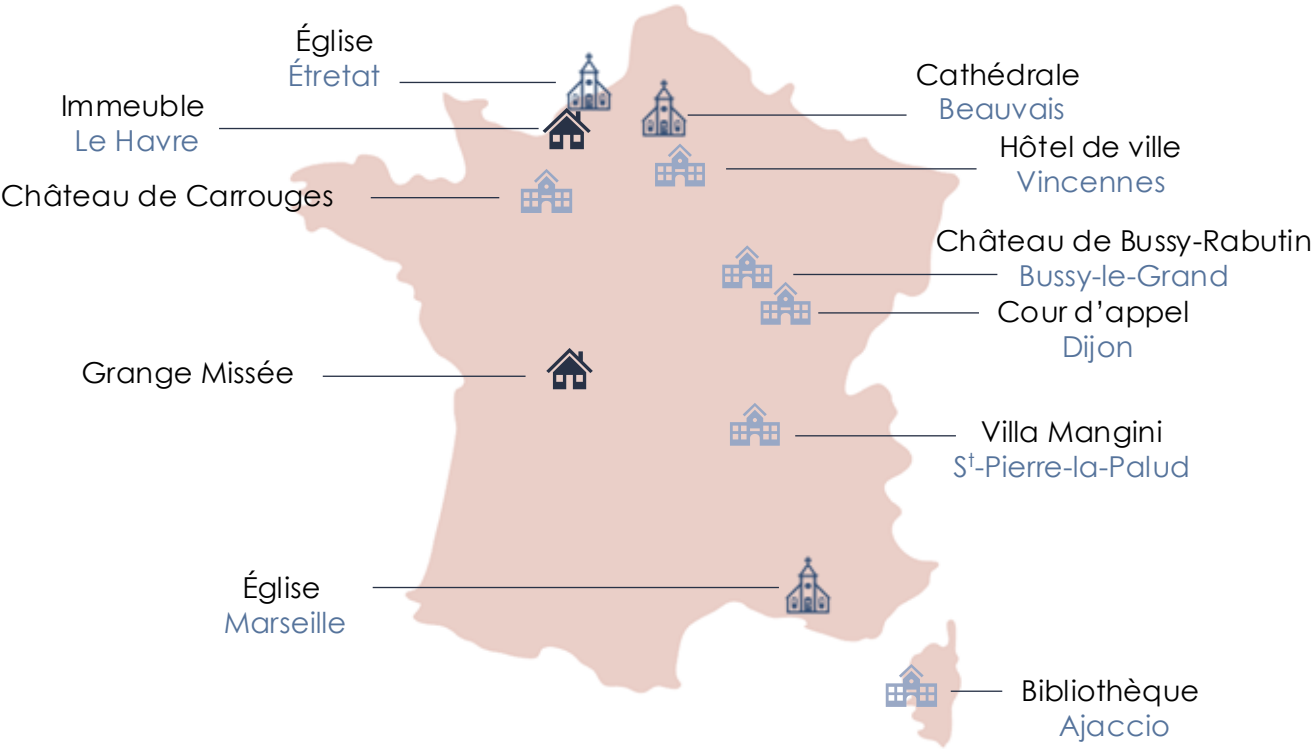
Temporalité

Opération livrée dans les 5 dernières années

Usage

Opération sans changement d'usage avant/après travaux

Présentation des opérations analysées



Résidentiel



Grange Missée



Le Havre



Tertiaire



Dijon



Vincennes



Bussy-le-Grand



Ajaccio



St Pierre la Palud



Carrouges



Culte



Étretat



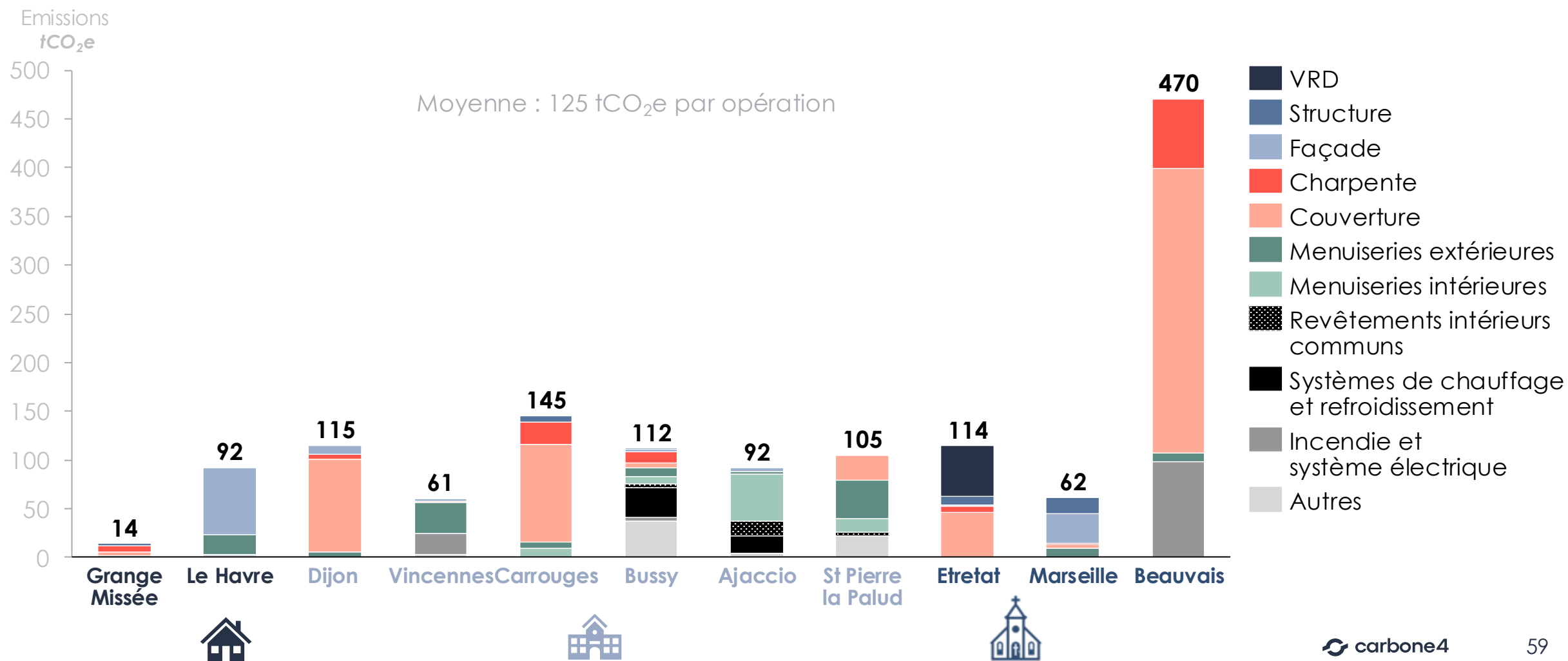
Marseille



Beauvais

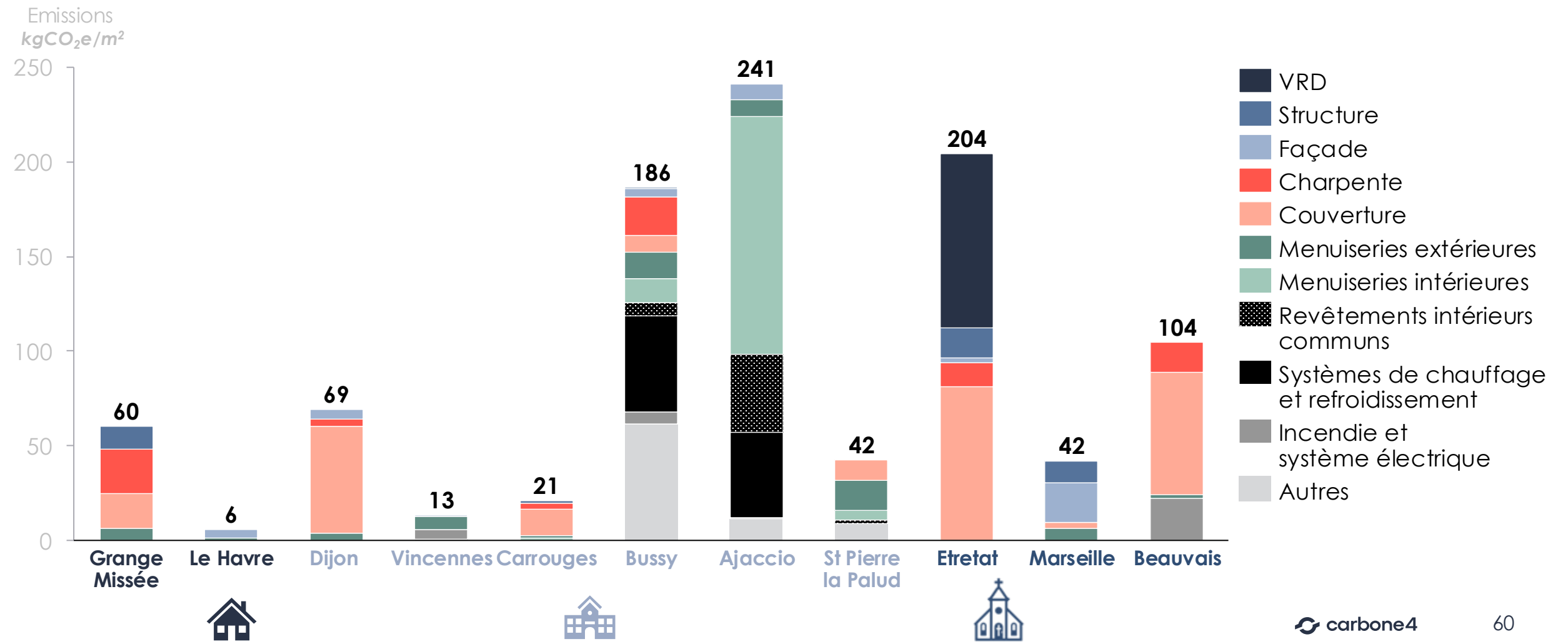
Emissions absolues de GES des opérations étudiées, décomposées par lots et sans renouvellement

Répartition des émissions de travaux par lots sans renouvellement

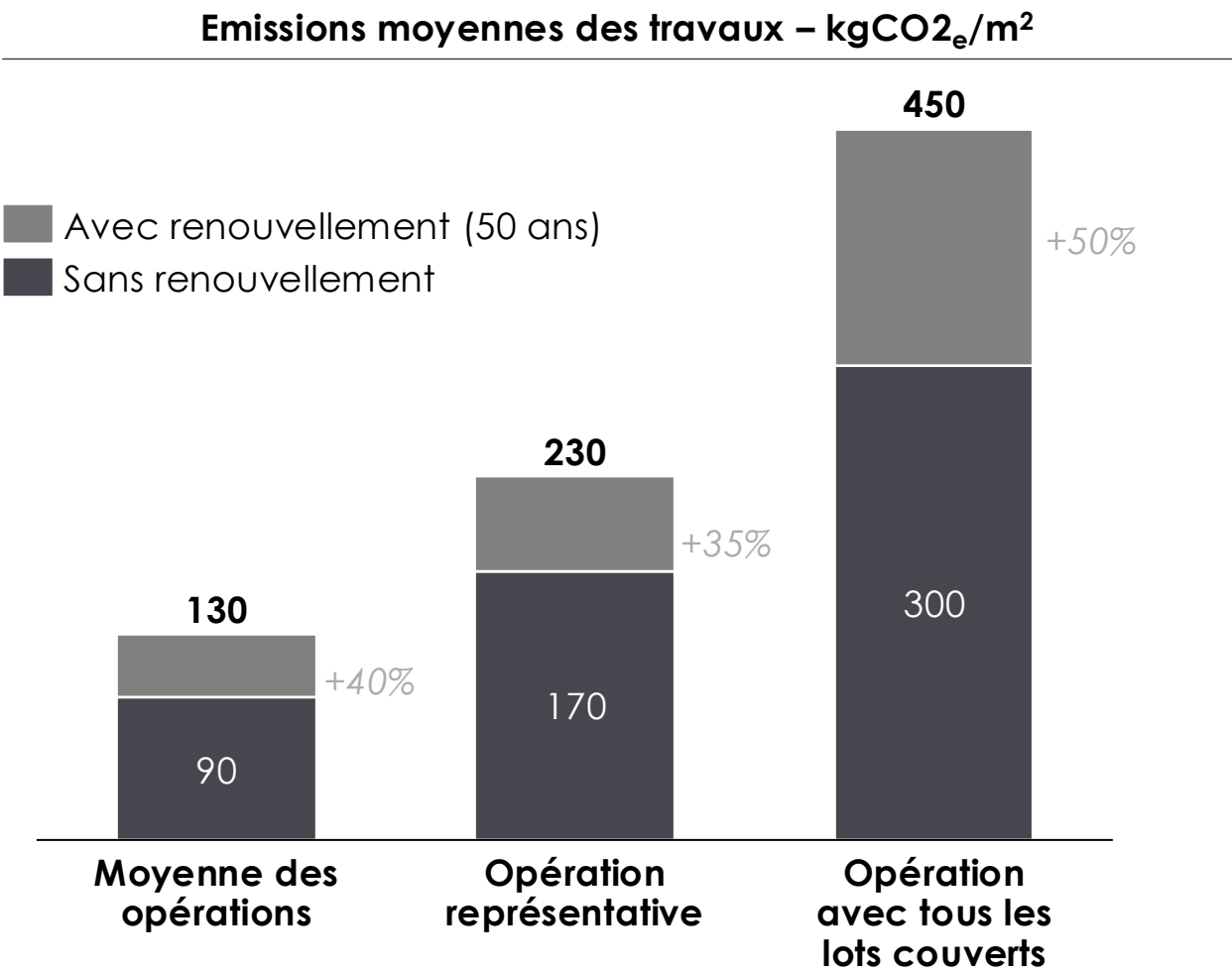


Intensités carbone des opérations étudiées, décomposées par lots et sans renouvellement

Répartition des émissions de travaux par lots sans renouvellement



Une opération moyenne représentative est autour de 170 à 230 kgCO₂e/m², en fonction de la prise en compte du renouvellement



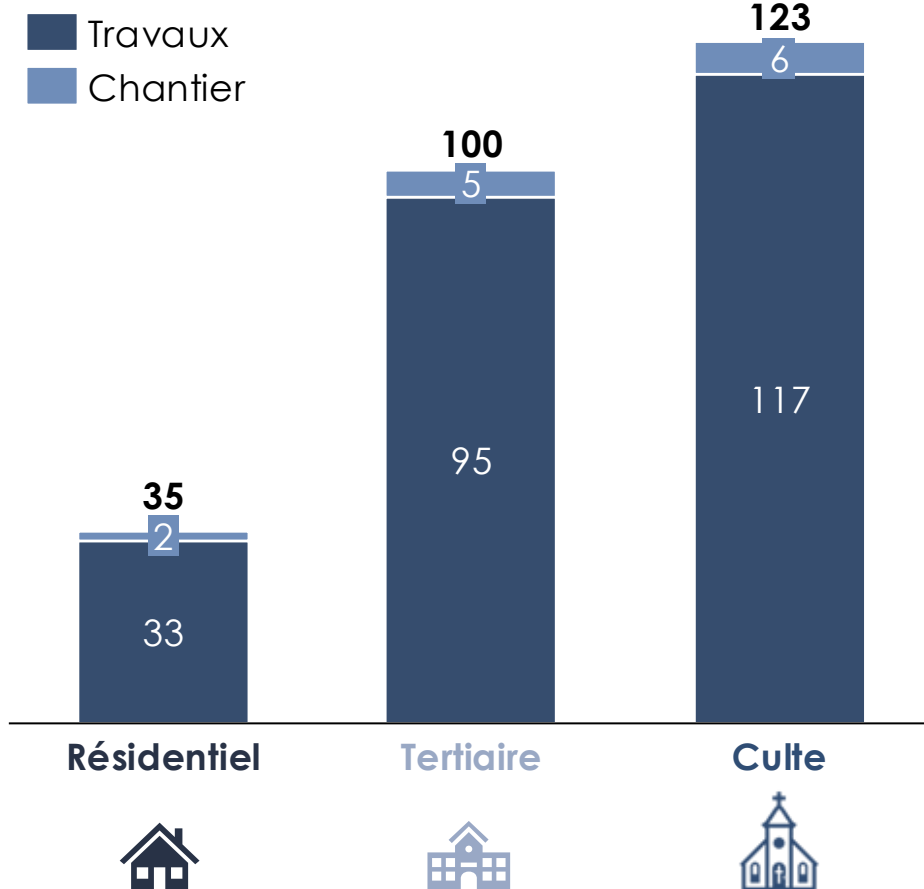
Messages clés

- L'impact carbone moyen des opérations étudiées est de **130** kgCO₂e/(m².50ans). Cependant, la majorité des opérations de l'échantillon se concentre sur certains lots et leur moyenne ne paraît pas forcément représentative.
- Pour avoir un **ordre de grandeur d'une opération représentative**, on prend la moyenne des lots couverts plus d'une fois dans notre échantillon (soit tous les lots sauf la VRD et les lots techniques) et on obtient un résultat autour de **230** kgCO₂e/(m².50ans).
- La moyenne d'une opération où tous les lots seraient couverts pourrait s'élever à 450 kgCO₂e/(m².50ans). Dans l'échantillon, **aucune opération ne couvrait tous les lots**, et très rarement la VRD et les lots techniques.
- La prise en compte du **renouvellement** sur 50 ans augmente les résultats d'environ **35%**, par rapport à la vision sur la durée de vie réelle des produits.

Intensité carbone des travaux par typologie (chantier inclus)

Emissions moyennes des travaux – kgCO₂e/m²

Sans renouvellement

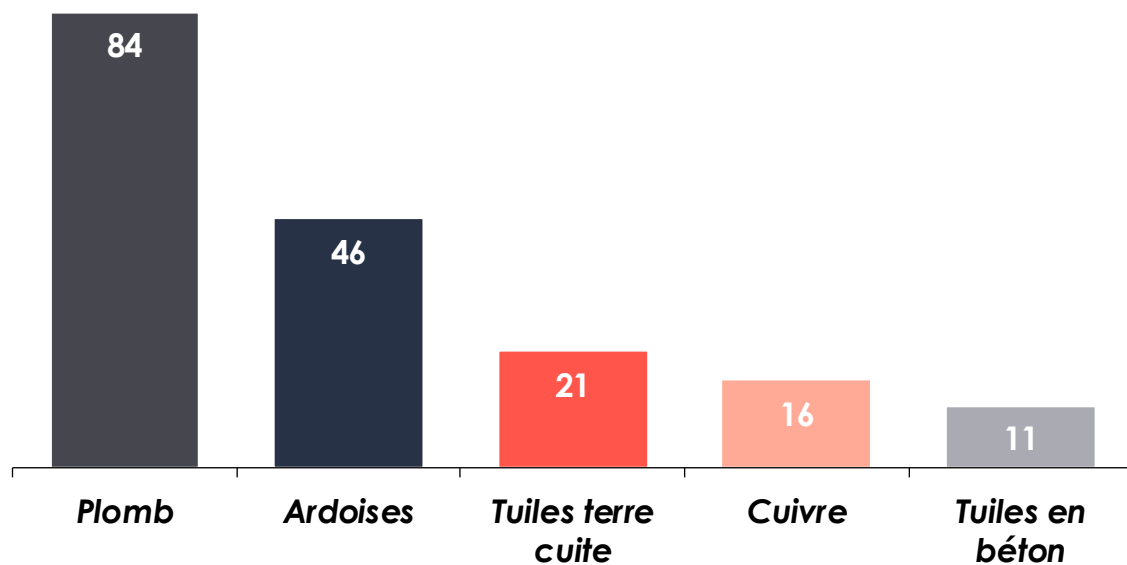


Messages clés

- Ces résultats moyens par typologie sont fortement **dépendant des programmes de travaux**, étant donné qu'il n'y a qu'entre 2 et 6 opérations étudiées par typologie :
 - En particulier pour le **résidentiel**, où les deux opérations étudiées sont concentrées sur seulement 1 ou 2 lots, sans avoir une restauration complète du bâtiment. Les résultats sont donc sûrement **sous estimés** par rapport à la diversité des opérations qui peut avoir lieu sur le résidentiel.
 - Sur les 3 opérations sur le culte, 2 étaient sur des édifices en péril, avec des travaux importants sur la couverture.
 - Les différences entre typologies sont donc à **prendre avec parcimonie**.
- Les **données sur les chantiers** n'ont pas pu être collectées, les émissions ont donc été estimées, à partir d'un ratio de 5% des émissions de travaux.
- Le **renouvellement sur 50 ans** a des effets variables sur chaque opération, en fonction de la durabilité des matériaux mis en œuvre. L'impact est plus important sur le tertiaire (+60 kgCO₂e/m²) que sur le culte (+16) et le résidentiel (+2).

Comparaison de l'intensité carbone sur 50 ans de différents éléments de couverture

Émissions par surface de couverture
kgCO₂e/m² sur 50 ans



Épaisseur	3 mm	5 mm		0,6 mm	
Poids	34 kg	36 kg	66 kg		44 kg
DVR	50 ans	50 ans	100 ans	100 ans	100 ans

Messages clés

- Pour un même usage (ici 1 m² de couverture), certains **matériaux sont moins carbonés** que d'autres.
- Lorsqu'il est possible de choisir un matériau plutôt qu'un autre, sans entacher les besoins de préservation patrimoniale, **l'analyse comparative CO₂e vaut le coup** (en prenant compte de la durée de vie et des renouvellements potentiels)

Exemple de l'Eglise d'Étretat | Résultats de l'empreinte carbone



Zoom sur l'opération d'Étretat

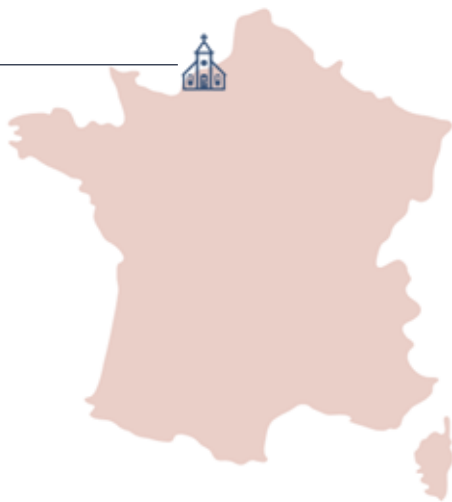
Église ND de
l'Assomption
XII^e et XIII^e



Restauration **toiture**
& **façades**

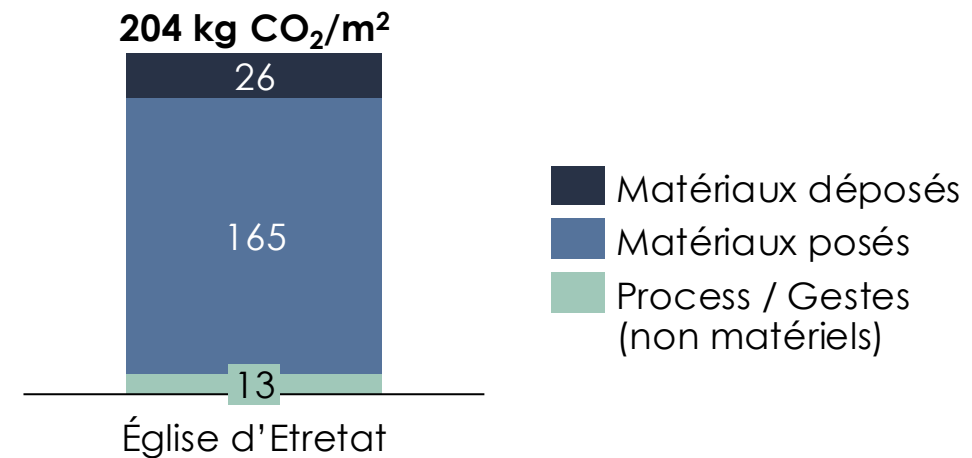
870 m² d'emprise au sol

1 700 k€ de travaux



Répartition des émissions par type de prestations en kgCO₂e/m²

Sans renouvellement



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

Exemple de la Grange Missé | Résultats de l'empreinte carbone



Zoom sur l'opération de Chaillac

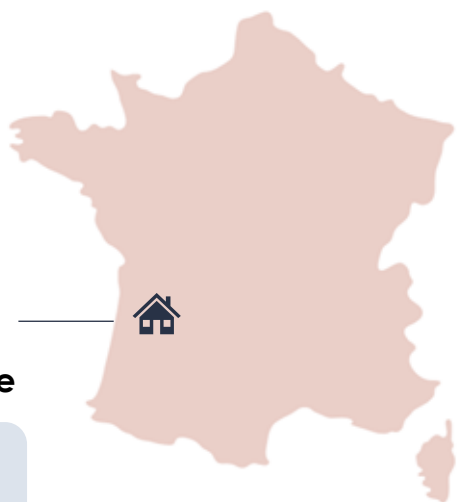
Domaine de la Grange
Missée à Chaillac,
XV^e siècle



Mise hors d'eau et
restauration de la structure

236 m² d'emprise au sol

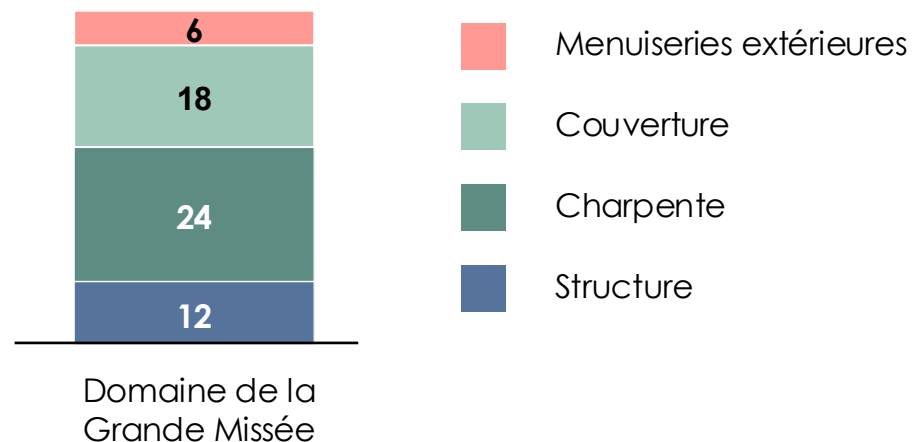
380 k€ de travaux



Répartition des émissions par type de prestations en kgCO₂e/m²

Sans renouvellement

60 kgCO₂/m²



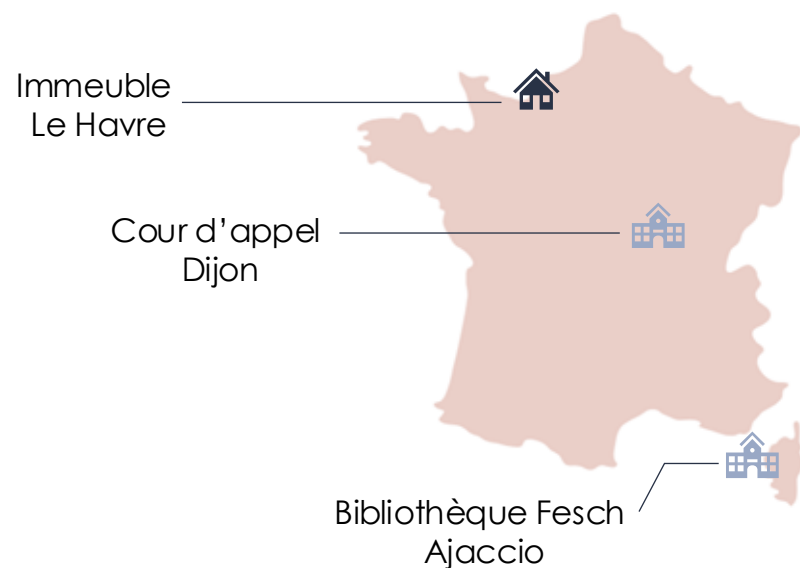
- Les émissions de cette opération sont relativement faibles¹ car il y a **beaucoup de réemploi sur site** (pierres réemployées directement sur site, dépose et repose de tuiles existantes).
- Lors de la restauration de la toiture, **l'utilisation de tuiles neuves aurait pour conséquence** l'augmentation de l'empreinte carbone de **30 kgCO₂e/m²**, soit plus 50% des émissions sur l'opération.

¹ 14 tonnes de CO₂e ont été évitées dont près de 75% associées aux travaux sur la toiture.

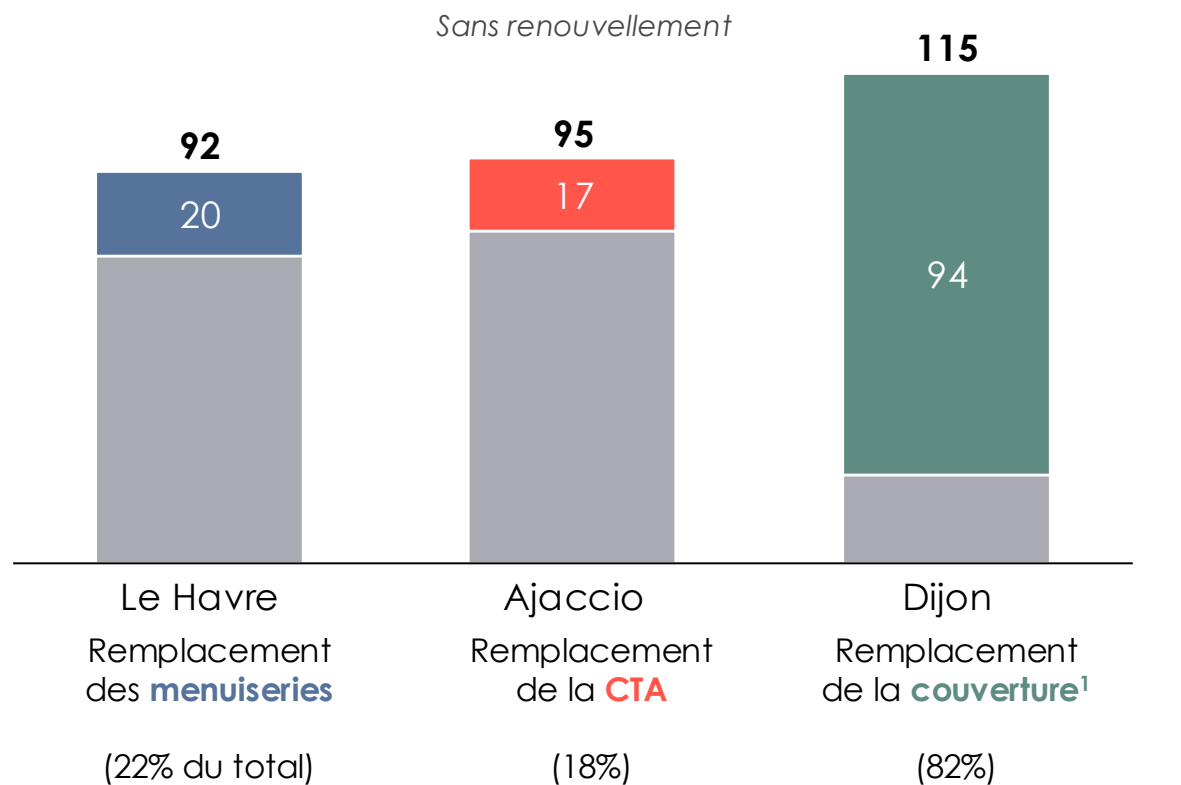
Etudes de cas | Le poids du remplacement à neuf



Zoom sur trois opérations



Répartition des émissions de travaux par lot en tCO₂e



¹ : Le renouvellement à 82% était imposé par la présence avant travaux d'un matériau ardoise de mauvaise qualité.

Leviers d'action identifiés durant les entretiens avec les maîtres d'œuvre

3 bâtiments tertiaires

1 église



Hôtel de ville Vincennes

Façade, couverture et menuiseries en mauvais état



Cour d'appel de Dijon

Façade et menuiseries en moyen état



Bibliothèque Ajaccio

*CTA défectueuse
Menuiseries en moyen état*



Eglise Etretat

*Structure en péril
Changement couverture
VRD*

Changement d'énergie
(gaz → PAC)

Changement d'énergie

Système énergétique intégré
avec les autres bâtiments

VRD : Réduction de la quantité
de béton

Réemploi in situ des pierres

Isolation des combles

Matériaux locaux

VRD : Matériaux bas carbone

Ardoises en réemploi

*Chantier : suppression des
AR en avion**

Réemploi des ardoises déposées

→ *Pas suffisamment de
données fines pour calculer
un scénario alternatif*

Opération de restauration de la Cour d'Appel de Dijon



Surface (SDP)

1 665 m²

Emprise au sol

657 m²

Montants des travaux (HT)

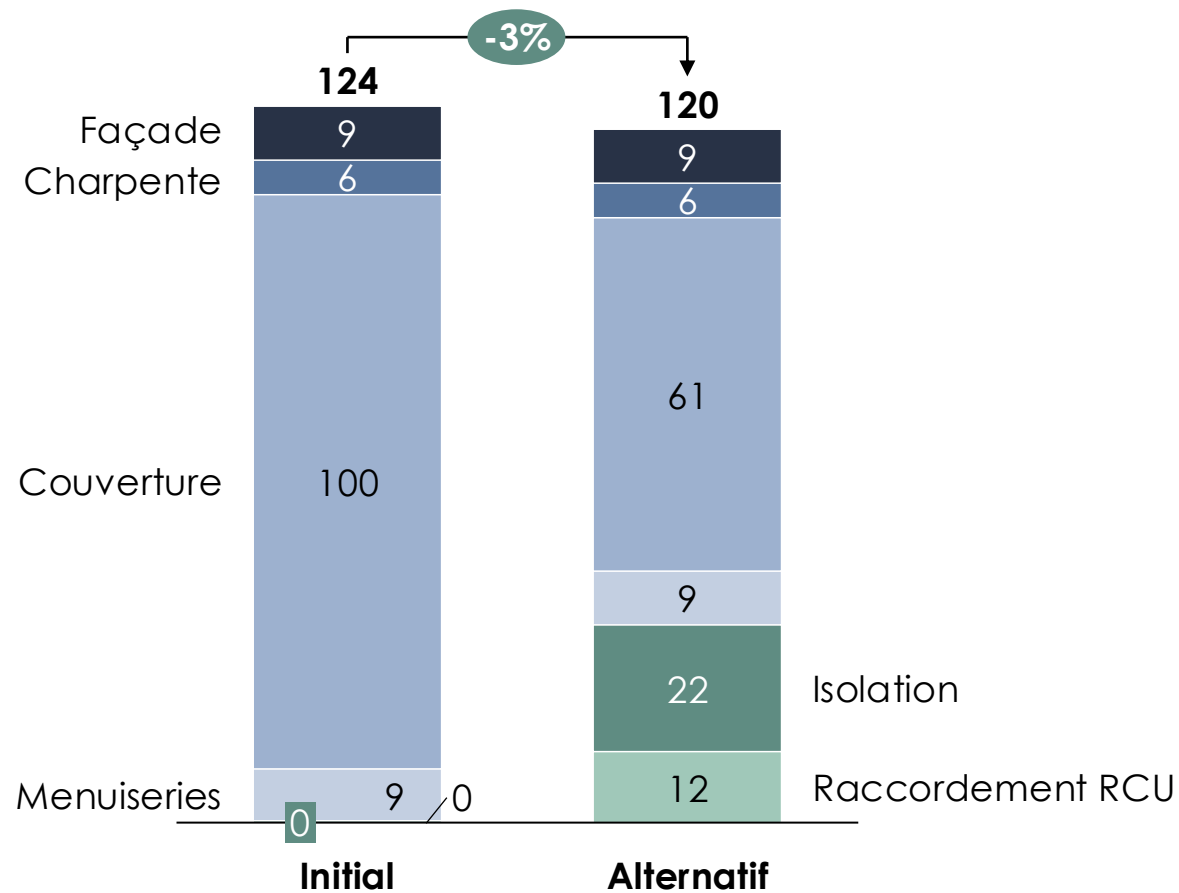
896 k€ à 2 319 k€

Opération de restauration des :

- **Façade** : nettoyage, rejointement, ragréage.
- **Toiture** : remplacement de la couverture, des éléments techniques de toiture, des habillages.
- **Menuiseries** : restauration et changement à neuf de menuiseries.
- **Sculptures**

Etude de cas Dijon | Scénario alternatif de travaux

Emissions GES par scénario en tCO₂e (sur 50 ans)



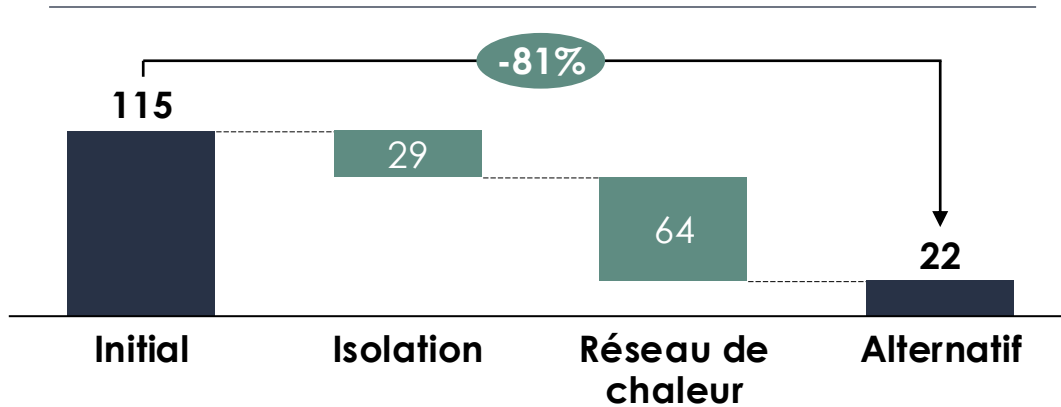
Messages clés

- Le **réemploi ex-situ et/ou in-situ des ardoises** permettrait d'économiser jusqu'à **38 tCO₂e** sur cette opération (**-30% sur la partie travaux**)¹.
 - Nb: Les filières de réemploi de matériaux anciens ne sont actuellement peu ou pas structurées, il est donc difficile de trouver ces matériaux en réemploi localement.
- **L'isolation des combles** et le renouvellement de l'isolation des faux plafonds permet de réduire les consommations d'énergie (cf. slide suivante), mais ajouterait **22 tCO₂e** de matériaux.
- De même, le **raccordement au réseau de chaleur** urbain de Dijon demanderait un ajout de canalisation (et des travaux de VRD qui n'ont pas été comptabilisés ici), augmentant de **12 tCO₂e** les émissions de travaux.

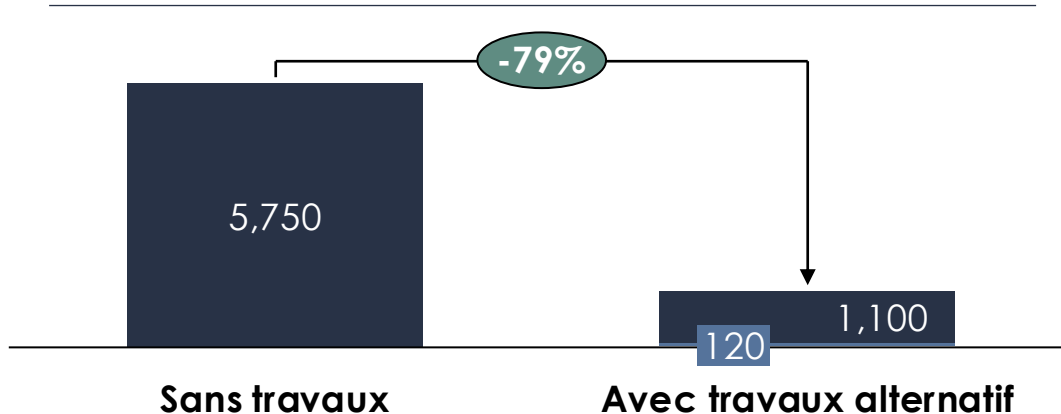
¹ : Ce qui nécessite des matériaux qualitatifs de haute durabilité

Etude de cas Dijon | Scénario de travaux alternatifs

Emissions GES en tCO₂e (sur 1 an)



Emissions GES en tCO₂e (sur 50 ans)



■ Consommation énergétique ■ Travaux

Messages clés

- **L'isolation des combles** et le renouvellement de l'isolation des faux plafonds pourrait théoriquement réduire les consommations de chauffage en moyenne de **25 %** (un audit énergétique permettrait de quantifier plus finement les gains potentiels).
- Le passage du gaz au **réseau de chaleur urbain** de Dijon (assuré à 76% par des énergies renouvelables) permettrait de réduire de **74 %** les émissions, à consommation constante.
- Au total avec les deux solutions combinées, les **émissions énergétiques pourraient réduire de plus de 80%**.
- L'isolation et les travaux de raccordement au réseau de chaleur seraient **amortis rapidement** au niveau carbone.
- En projetant sur 50 ans, les émissions chuteraient de 5,8 à 1,1 ktCO₂e. Cela ferait plus de 4,5 ktCO₂e économisé sur 50 ans par rapport au scénario initial.

Opération de restauration de l'Hôtel de ville de Vincennes



Surface (SDP)

4 500 m²

Montants des travaux (HT)

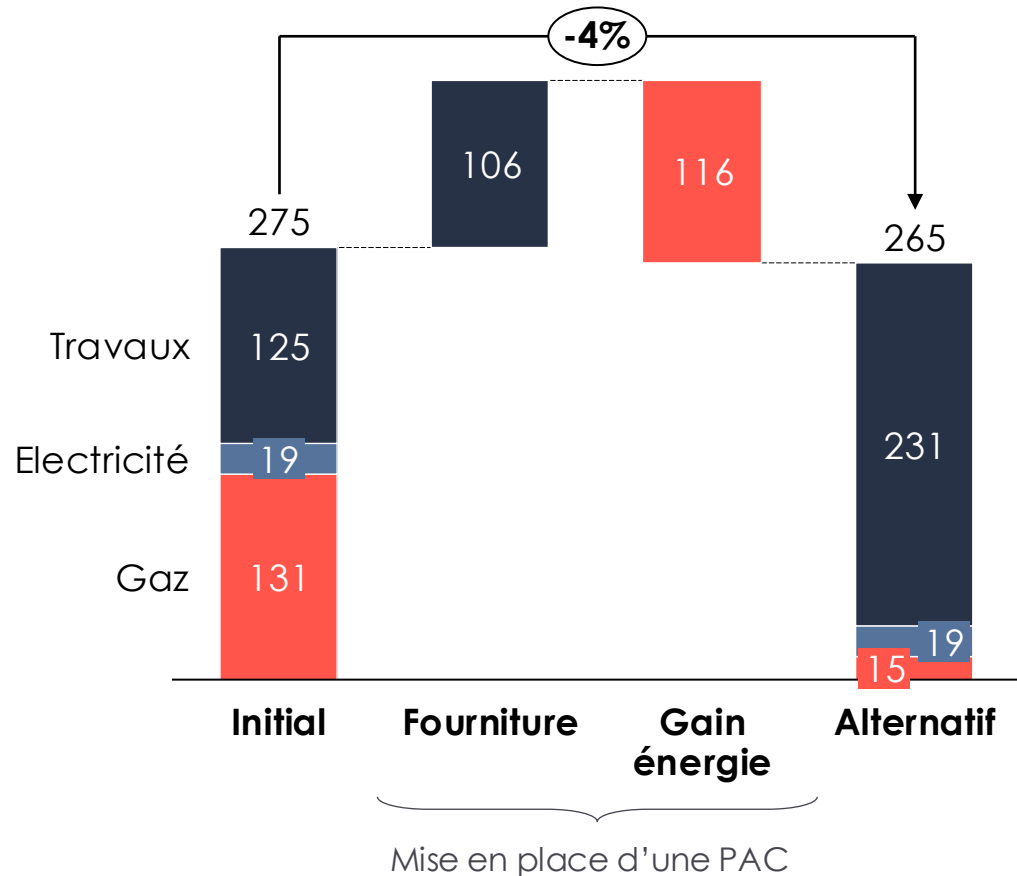
3 000 k€

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

Etude de cas Vincennes | Scénario de travaux alternatifs

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



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).

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

Etude de cas Etretat | Scénario alternatif

- 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 tCO_{2e}

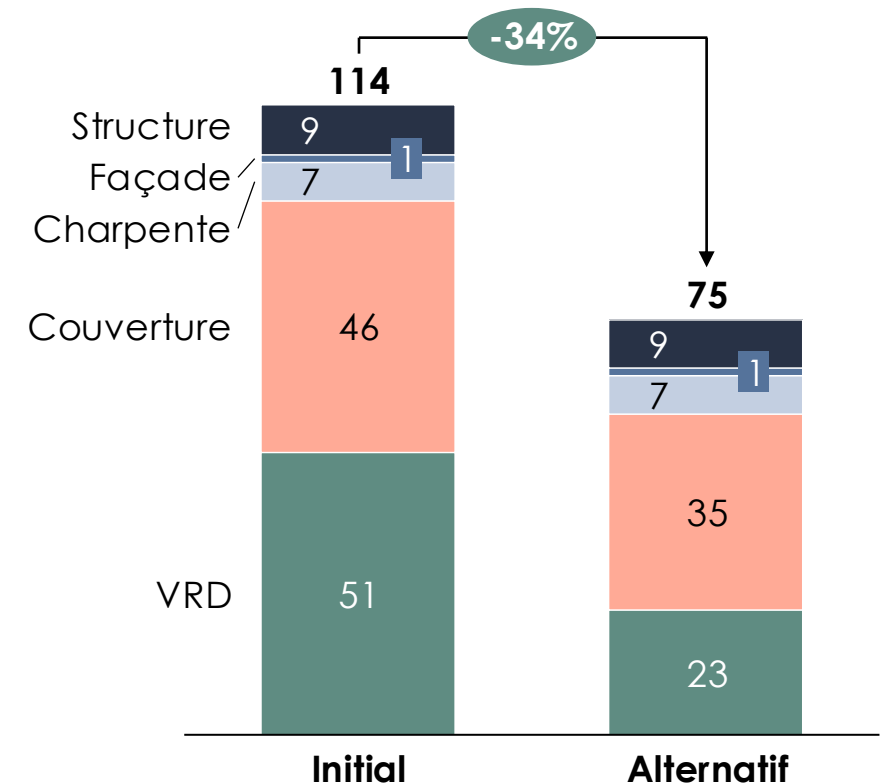
→ L'utilisation de **matériaux moins carbonés** pour la VRD (grave recyclée, regard en PE, remblais en argile les moins carbonés) :

- 19 tCO_{2e}

→ Un **réemploi ex situ** des ardoises déposées :

- 10 tCO_{2e}

Emissions GES par scénario en tCO_{2e} (sur 50 ans)





Paris | Lyon | Toulouse | Rennes | Luxembourg

www.carbone4.com