

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 IV

Détails sur le volet énergie 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 IV : Energie

Empreinte carbone

Section 1 : Base de Données Nationale des Bâtiments

Section 2 : Diagramme à moustaches par typologie

Section 3 : Répartition des consommations par vecteur

Section 4 : Résultat généraux par vecteurs et par typologie

Section 5 : Facteurs d'émissions des vecteurs énergétiques

Section 6 : Zoom sur les MH du secteur résidentiel

Section 7 : Contrôle de cohérence des MH du secteur résidentiel

Section 8 : Zoom sur les MH du secteur tertiaire

Section 9 : Analyse par zone climatique pour les MH du tertiaire

Section 10 : Focus sur les 15 MH les plus émissifs du tertiaire

Section 11 : Contrôle de cohérence pour les MH du tertiaire

Section 12 : Zoom sur les MH du culte

Section 13 : Analyse de la répartition des vecteurs énergétiques

Leviers d'action et trajectoire carbone

Section 14 : Approche méthodologique

Section 15 : Levier sobriété

Section 16 : Levier substitution

Section 17 : Levier efficacité

Section 18 : Méthode et gains exogènes des scénarios

Section 19 : Décarbonation des réseaux d'énergie

Section 20 : Résultats 2035 et 2050

Section 21 : Freins et opportunités principaux



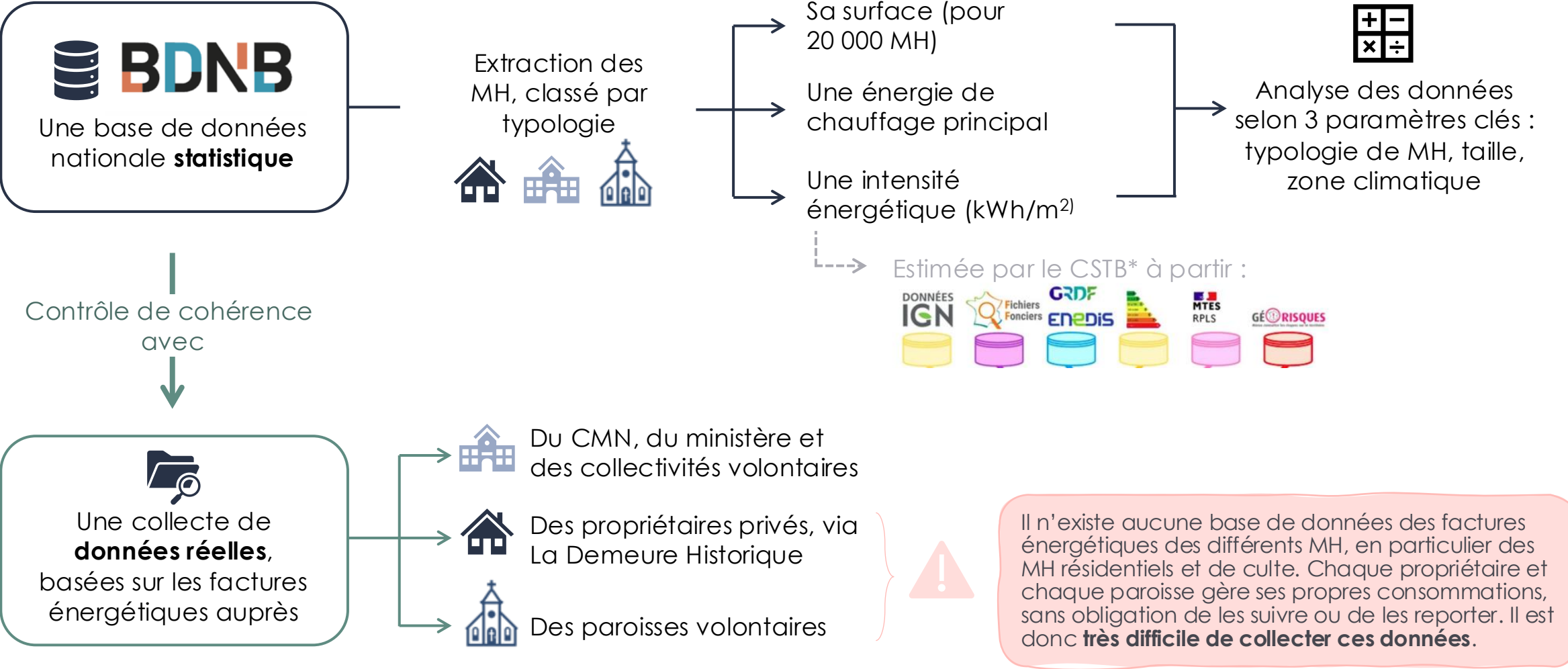
carbone4



Empreinte carbone

Gros Horloge, Rouen

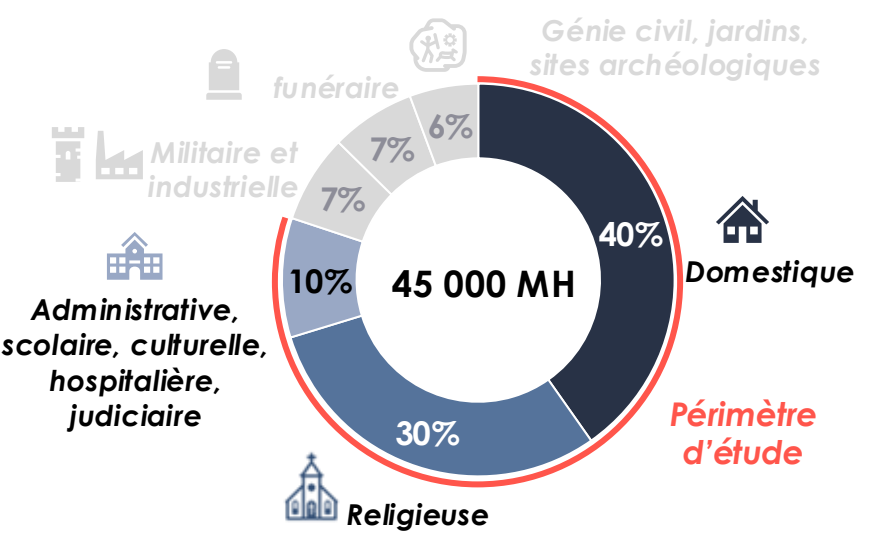
Méthode d'obtention et de traitement des données de consommation énergétique des MH



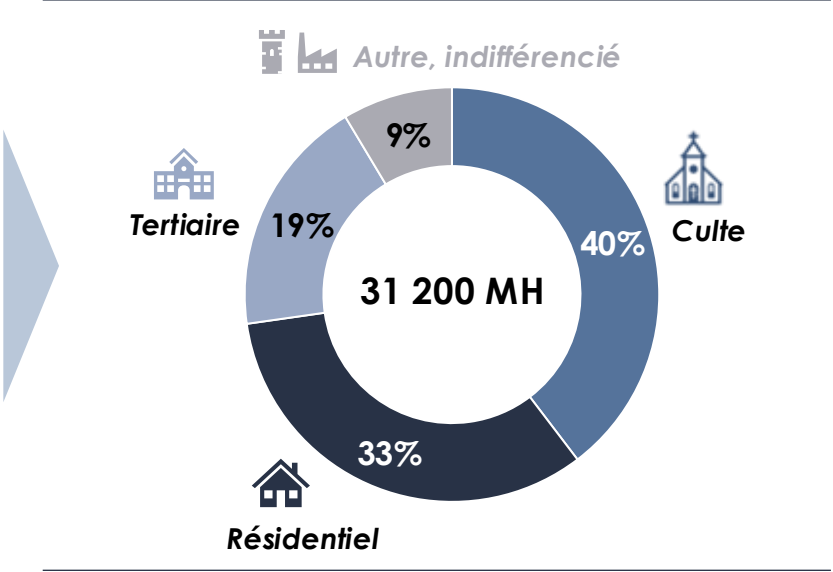
*Centre scientifique et technique du bâtiment

Répartition des typologies de bâtiment étudiés avec l'extraction de la BDNB

Répartition du nombre de MH par type d'architecture (selon la base Mérimée)



Répartition du nombre de MH par typologie d'usage dans la BDNB



La BDNB contient
31 200 MH
dont :

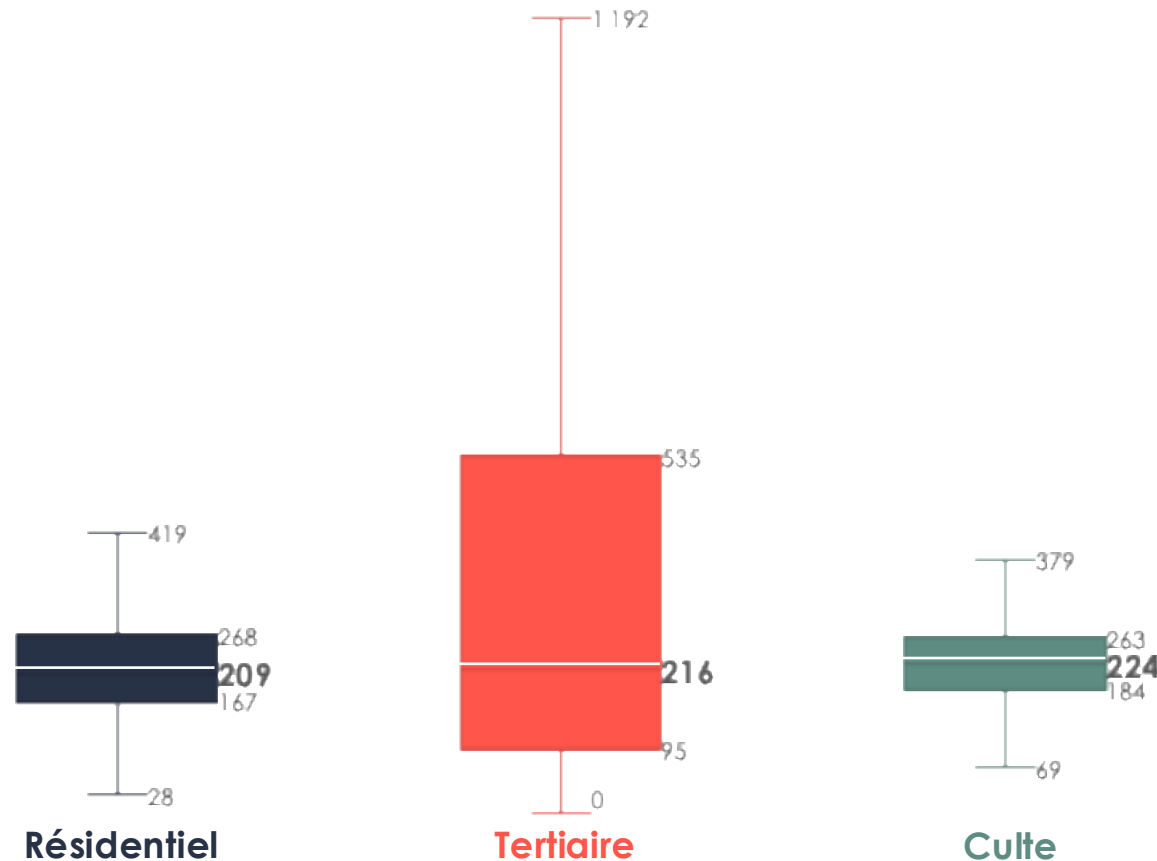
58 %
avec des données de
surface (22 Mm²)

19%
avec des **surfaces** et des
consommations
énergétiques (13 Mm²)

À gauche : Analyse Carbone 4 à partir de la liste des MH de la base Mérimée, disponible sur data.culture.gouv.fr
À droite : BDNB expert, périmètre MH, catégories retraitées par Carbone 4

Diagramme à moustache de l'intensité énergétique (énergie primaire) par typologie de MH

Consommation surfacique par typologie d'usage
Médiane en kWh/(m².an) – *Energie primaire*

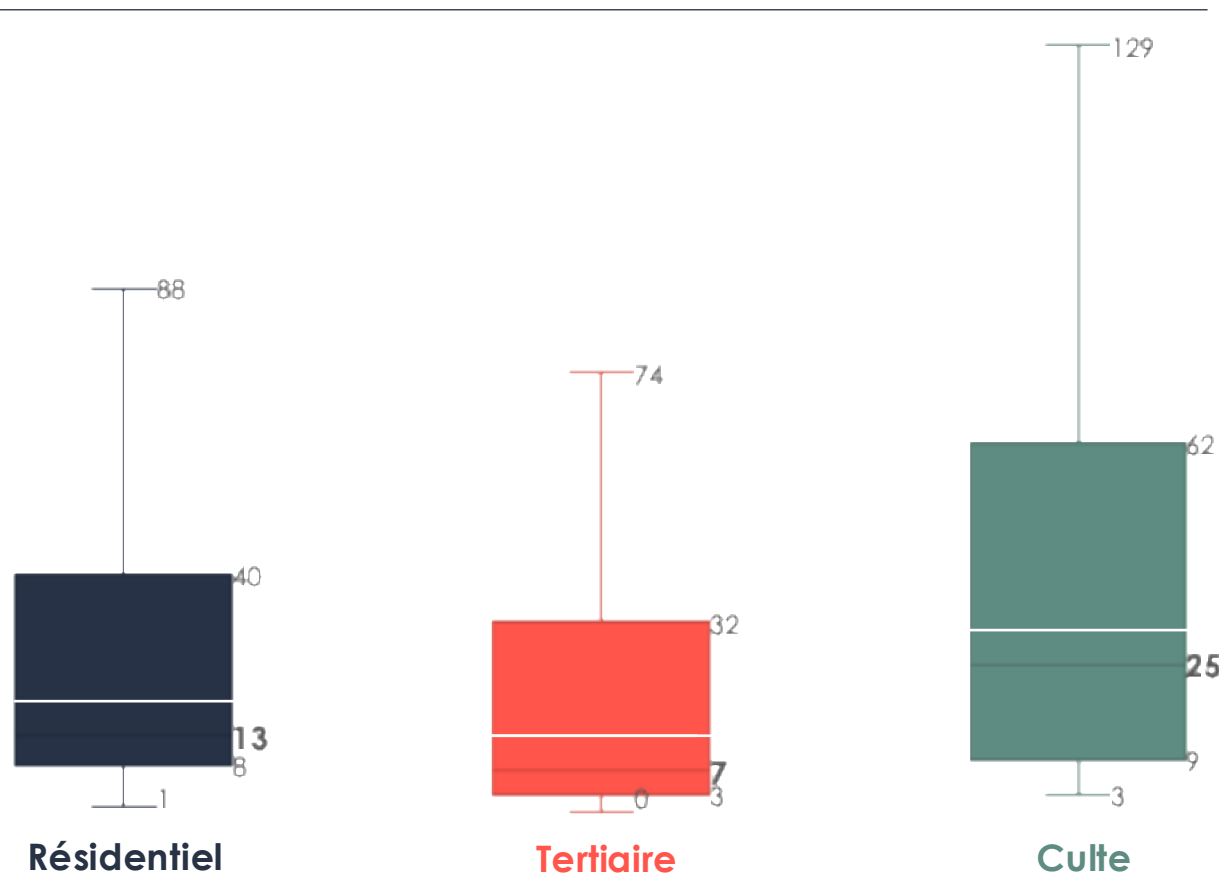


Pistes d'analyse et messages clés

- Les bâtiments du tertiaire ont **des consommations énergétiques beaucoup plus variables que les autres typologies**. On y retrouve de nombreux bâtiments avec une **consommation très importante** allant jusqu'à plusieurs dizaines de MWh/m².
- La grande variabilité des données du tertiaire peut être expliquée par trois raisons principales : **l'importante diversité des typologies d'usage** au sein de la catégorie, la **disparité des surfaces**, et un **manque de fiabilité des données** de cette catégorie.

Diagramme à moustache des émissions surfaciques de GES par typologie de MH

Emissions surfaciques par typologie d'usage
Médiane en kgCO₂e/(m².an)

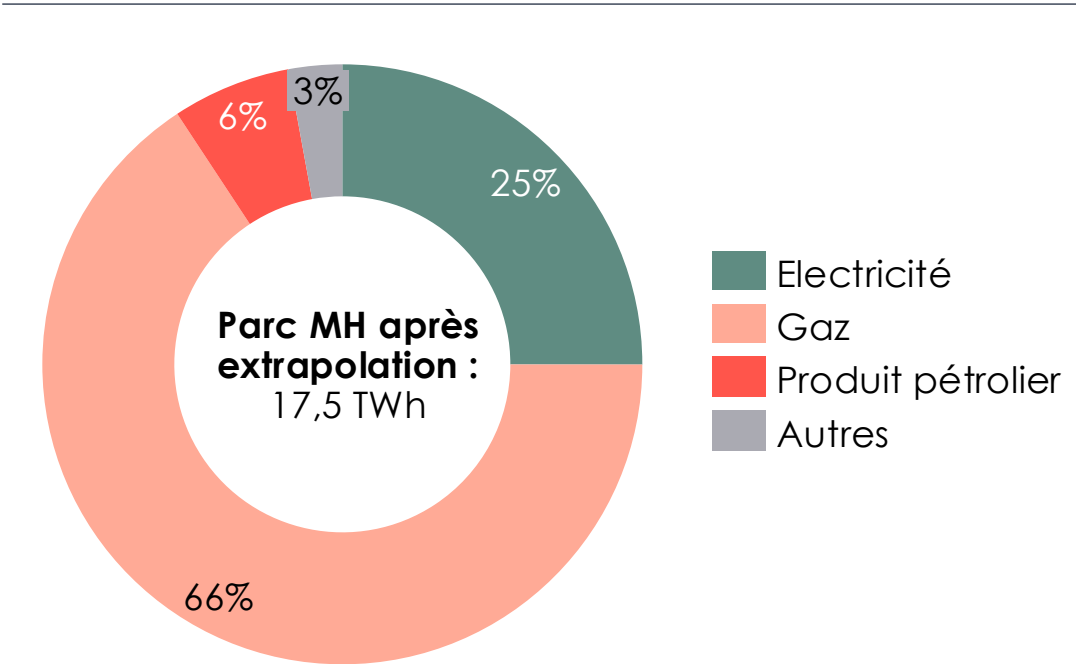


Pistes d'analyse et messages clés

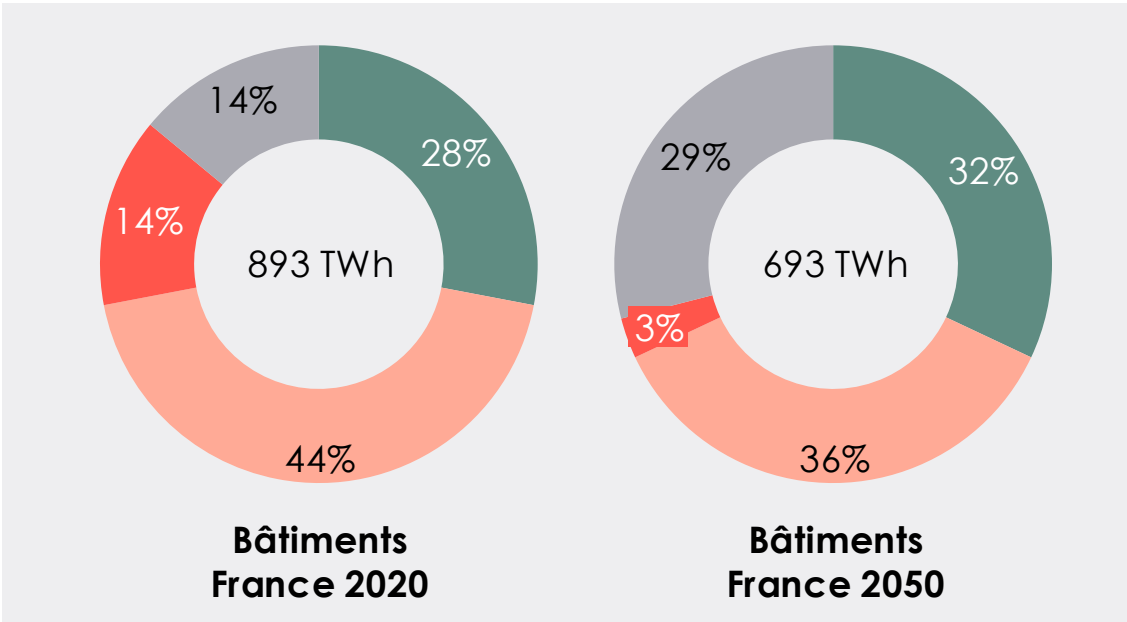
- En considérant les émissions de GES, on remarque que les tendances se sont ici inversées, le tertiaire a des émissions médianes par m² plus basses.
- Cela s'explique par le **mix énergétique du tertiaire indiqué par la BDNB**:
 - 72 % des monuments du tertiaire n'utilisent que de l'électricité et 26% utilisent un mix de gaz et d'électricité.
- Cette **forte part d'électricité** joue sur le résultat en kgCO₂e/m², calculé avec l'énergie finale (ratio de 2,3 plus bas que l'énergie primaire) et un facteur d'émission plus faible que les autres énergies.
- Pour les autres typologies de monument, l'électricité ne compte que pour 50% des consommations.

Répartition des consommations énergétiques du parc des MH par vecteur énergétique et éléments de comparaison

Répartition des consommations par vecteur, en TWhEF/an



Éléments de comparaison | SNBC*

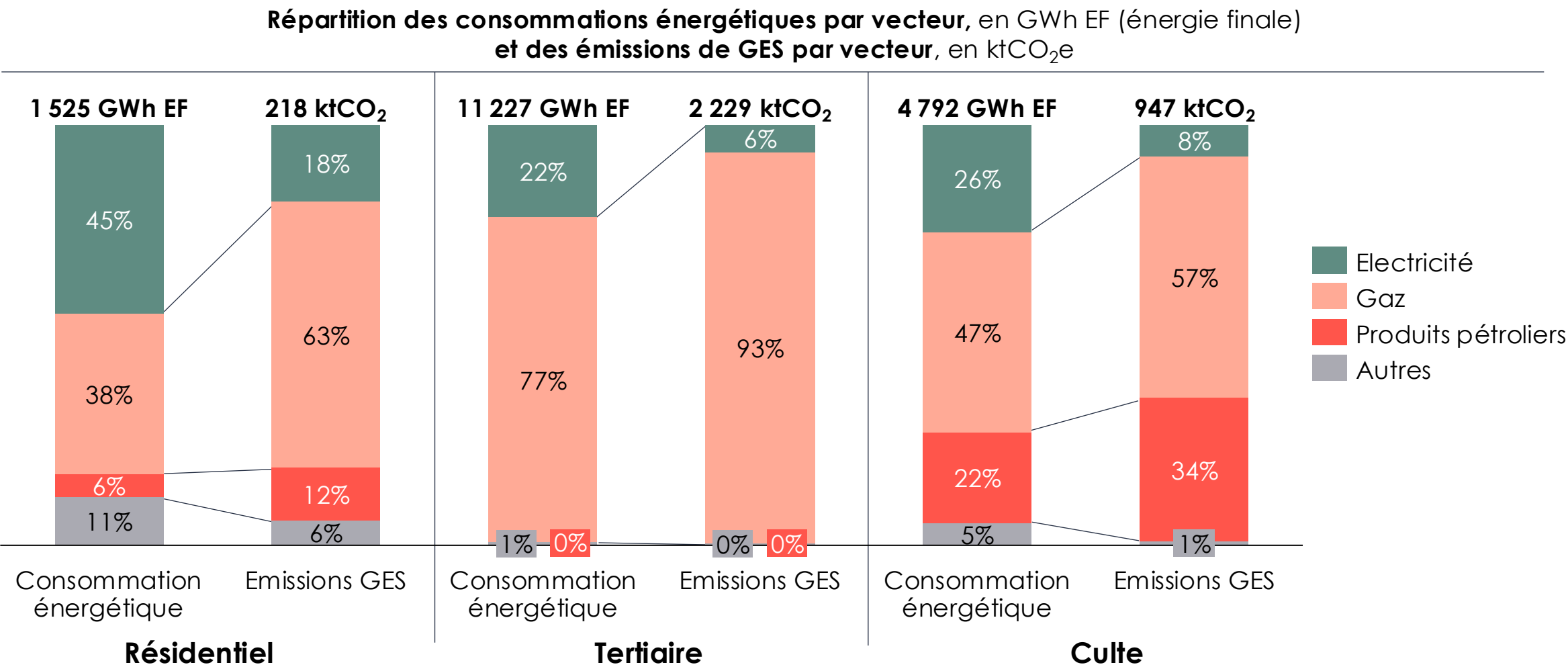


Analyse et messages clés

- D'après les données de la BDNB, les deux énergies les plus consommées sont le **gaz** (66%) et **l'électricité** (25%). La part du fioul et du bois est très probablement sous-estimée dans la BDNB en raison du manque de centralisation des données.
- La décarbonation du parc national en 2050 (selon la SNBC) repose sur le développement des **réseaux de chaleur**, et la réduction des consommations (-22%) par la **sobriété et l'amélioration de l'efficacité énergétique**.

* : La catégorie 'Autre' inclut le bois, les réseaux de chaleur et le charbon.
*SNBC : Stratégie Nationale Bas Carbone (scénario AME 2024, consommations des bâtiments résidentiels et tertiaires)

Répartition des consommations énergétiques et des émissions de GES du parc de MH, par vecteur et par typologie

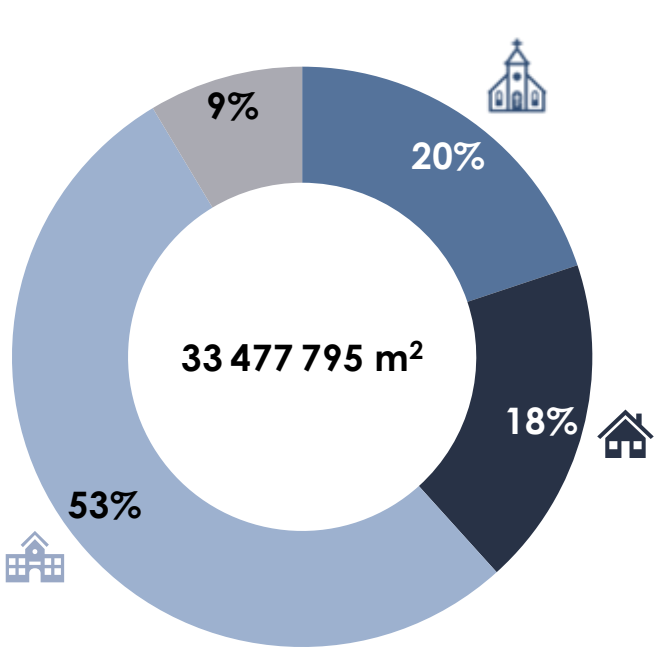


¹ : La catégorie 'Produits pétroliers' incluent le fioul, le propane, le butane et le GPL.
² : La catégorie 'Autre' inclut le bois et les réseaux de chaleur.

Répartition des surfaces, des consommations énergétiques et des émissions de GES du parc de MH par typologie

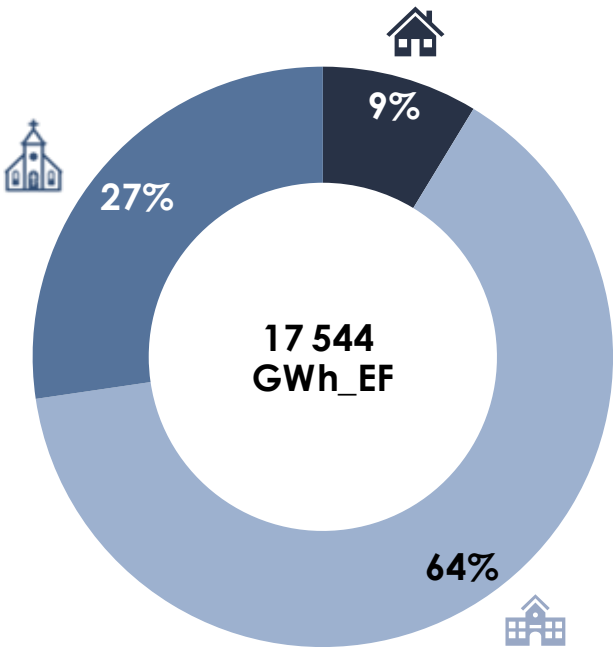
Répartition des surfaces

Après extrapolation en m²



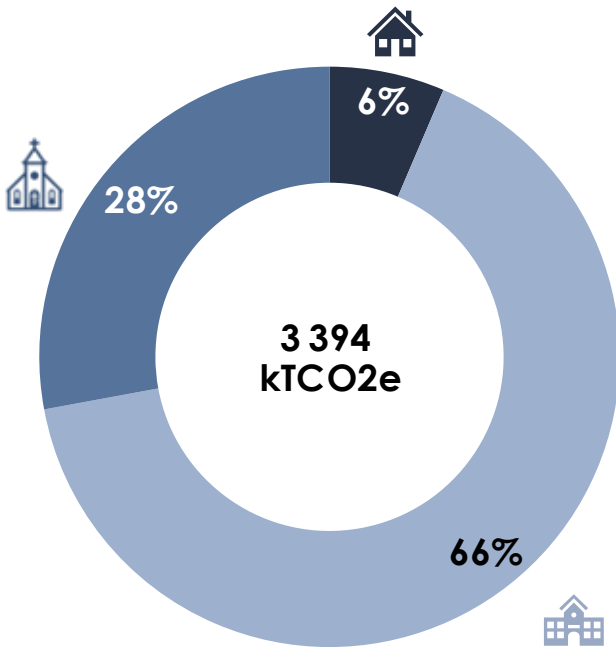
Répartition des consommations énergétiques,

en GWh EF (énergie finale)



Répartition des émissions de GES,

en ktCO₂e



■ Résidentiel ■ Tertiaire ■ Cult

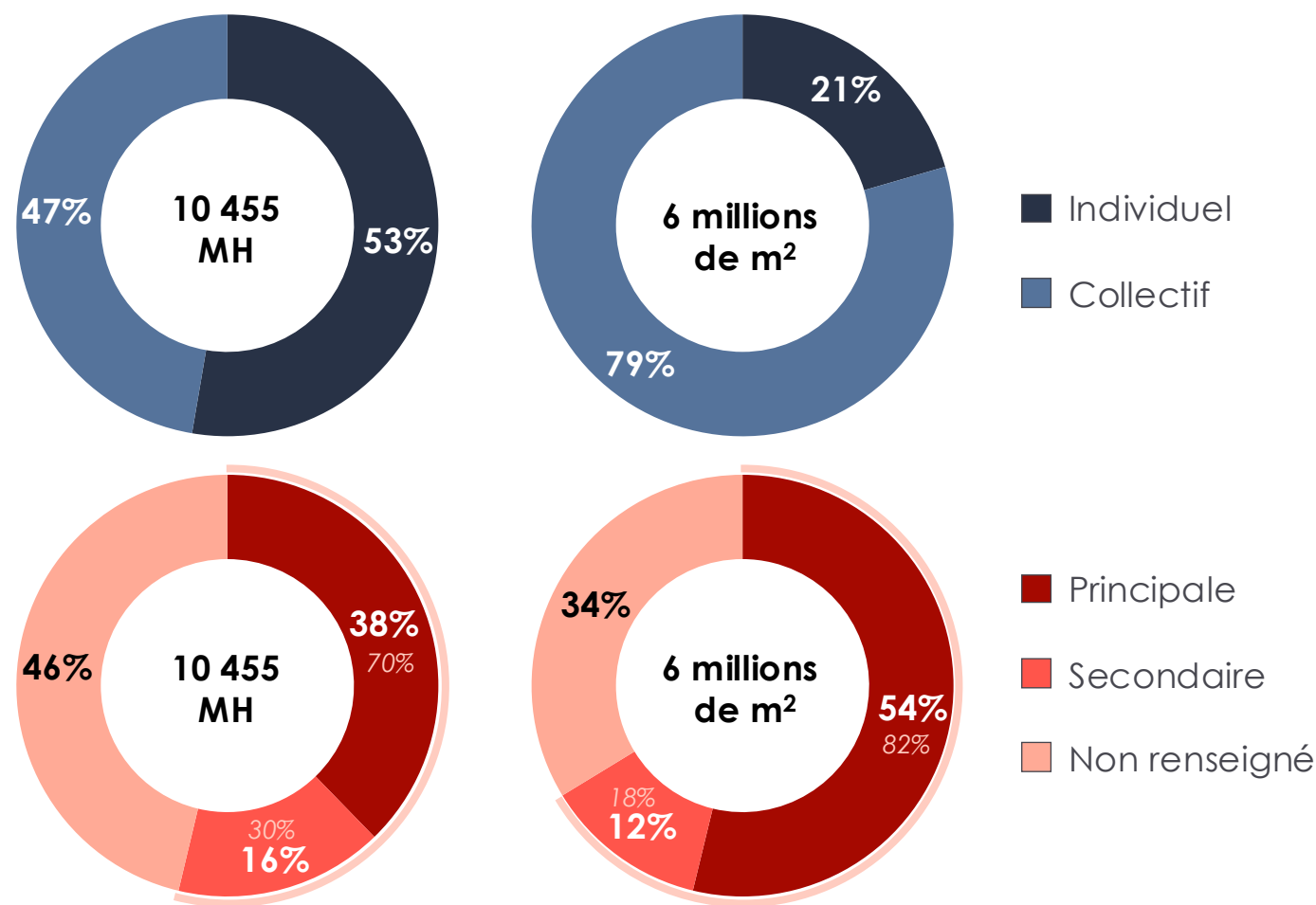
Les surfaces de la catégorie « indifférenciée » ont été réparties proportionnellement dans les trois catégories principales, pour estimer les consommations et émissions globales.

Liste des facteurs d'émissions des différents vecteurs énergétiques utilisées dans les MH

Catégorie	Intitulé	FE	Unité	Source
Energie	Gaz naturel – France/2022/mix moyen/consommation – amont et combustion (PCI)	0,239	kgCO2e/kWh PCI	Base Empreinte ADEME
Energie	Electricité France 2023 – Combustion + Amont + transport et distribution (pertes)	0,058	kgCO2e/kWh	Base Empreinte ADEME
Energie	Fioul domestique – France - amont et combustion	0,324	kgCO2e/kWh PCI	Base Empreinte ADEME
Energie	Bois granulé	0,027	kgCO2e/kWh	Base Empreinte ADEME
Energie	Bois bûches	0,032	kgCO2e/kWh	Base Empreinte ADEME
Energie	Charbon - amont et distribution	0,380	kgCO2e/kWh PCI	Base Empreinte ADEME
Energie	RCU – moyenne France	0,125	kgCO2e/kWh	Base Empreinte ADEME
Energie	Propane	0,271	kgCO2e/kWh	Base Empreinte ADEME

Répartition des logements classés MH et leurs surfaces par type de résidence

Répartition¹ du nombre de MH et des surfaces par type de résidence



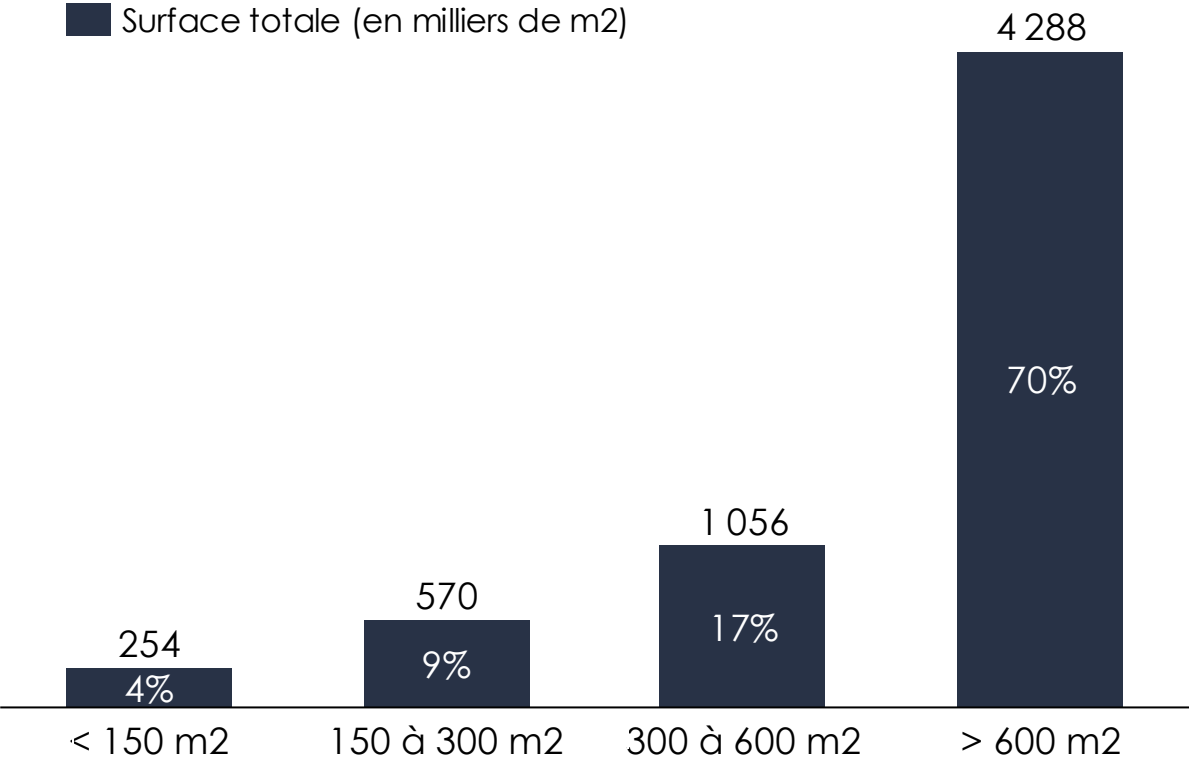
Messages clés

- Sur les 10 455 MH catégorisés en résidentiel dans la BDNB, près de **la moitié sont classés comme des logements collectifs**. En termes de surfaces, ils représentent près de **80%**.
 - Lorsqu'on regarde les médianes, le bâtiment collectif est **trois fois plus grand que le logement individuel** :
 - Collectif : 637 m²
 - Individuel : 180 m²
- Du côté de **l'occupation temporelle des MH**, les informations sont incomplètes (46% non renseigné). Sur les 54% de données 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.

¹ : Les données proviennent de la base de données nationale des bâtiments (BDNB)

Répartition des surfaces des MH du résidentiel par quartiles

Répartition des surfaces totales par quartiles – en milliers de m²



Messages clés

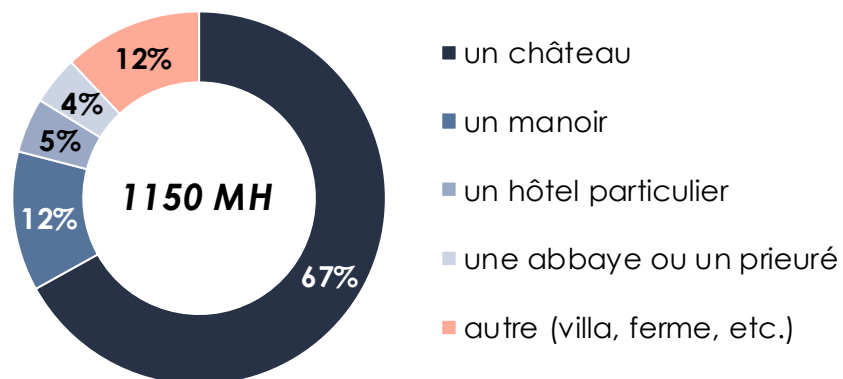
Sur l'ensemble du jeu de données où la surface est disponible (10 455 bâtiments), nous avons regardé la **répartition des surfaces** :

- 1^{er} Quartile : 150 m²
- Médiane : 300 m²
- 3^{ème} Quartile : 600 m²
- **Moyenne MH**: 590 m², et 230 m² pour les logements individuels, 991 m² pour le collectif
 - A titre de comparaison, la surface moyenne des maisons individuelles en France est de 113 m² (données 2020 du CEREN).
- **Min & max** : ces valeurs semblent incohérentes (de 1 à 40 000 m²)

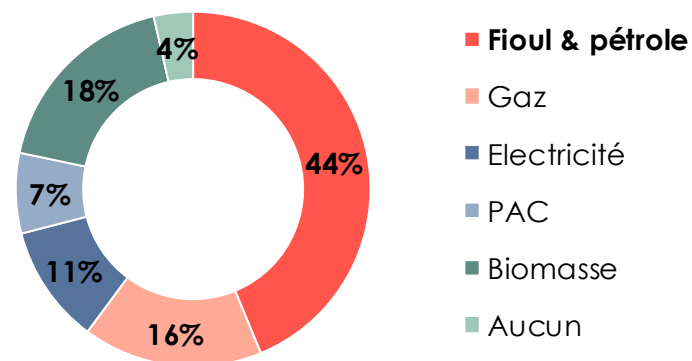
Résultats du sondage de la Demeure Historique



Répartition des MH de la DH par typologie



Répartition des MH par modes de chauffage

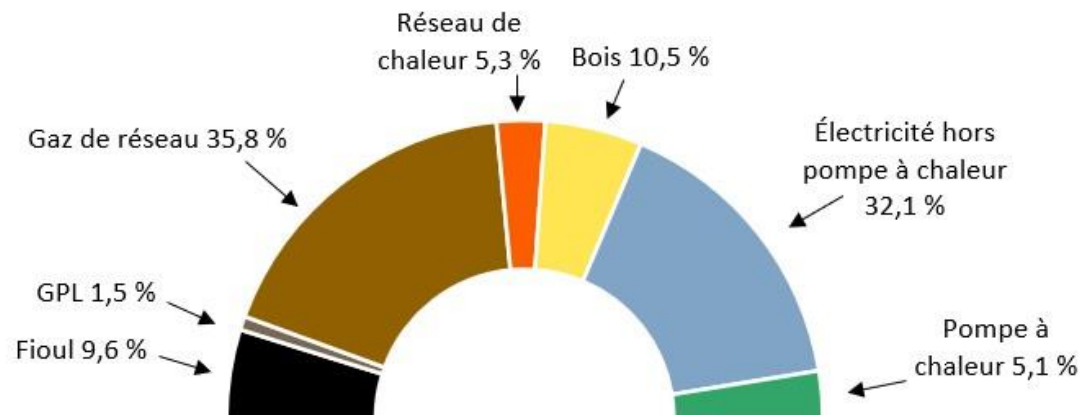


Messages clés issus des données de l'enquête DH

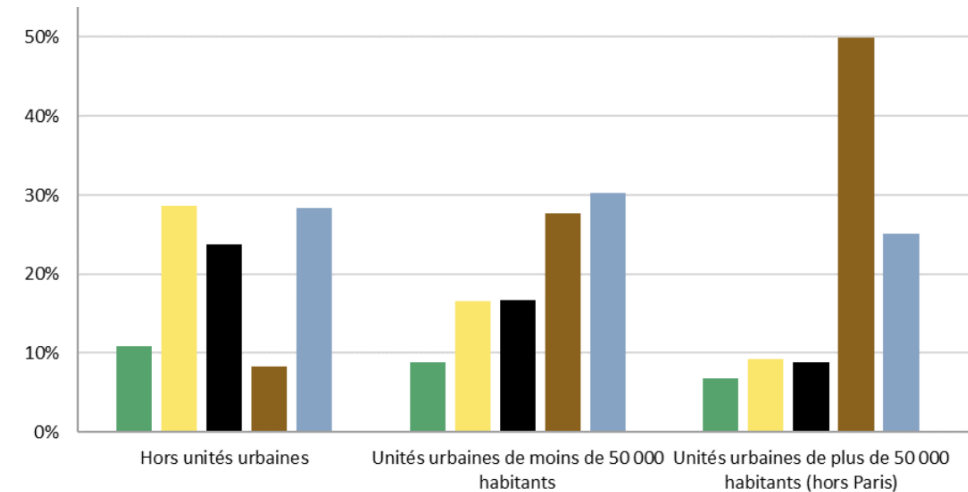
- **60% de résidences secondaires** (contre 30% dans la BDNB)
 - 15% sont chauffées normalement
 - Plus de la moitié sont chauffées partiellement
 - 17% sont en hors gel et 15% sont non chauffées ou vidangées,
- **40% de résidences principales**
 - 42% chauffées normalement et 48% chauffées partiellement,
 - Moins de 10% vidangées ou non chauffées
- La plupart des répondants possède **plusieurs systèmes de chauffage** :
 - Une chaudière centrale ou de relais (fioul, gaz, PAC)
 - Des cheminées, poêles (biomasse, pétrole) ou radiateurs électriques par pièce
- À la fois étant un risque et une opportunité, les systèmes de chauffage reposent encore beaucoup sur **les énergies fossiles (fioul et gaz : 60%)**, et sur la biomasse (18%).
- Le changement vers des **énergies bas carbone est un axe prioritaire**, déjà identifié pour une partie des propriétaires : 30% affirmant avoir réalisé des travaux énergétiques, et 17% avoir un projet à l'étude.

Statistiques nationales sur les modes de chauffage en rural isolé

Répartition des logements par énergie de chauffage



Energie de chauffage des maisons selon l'unité urbaine



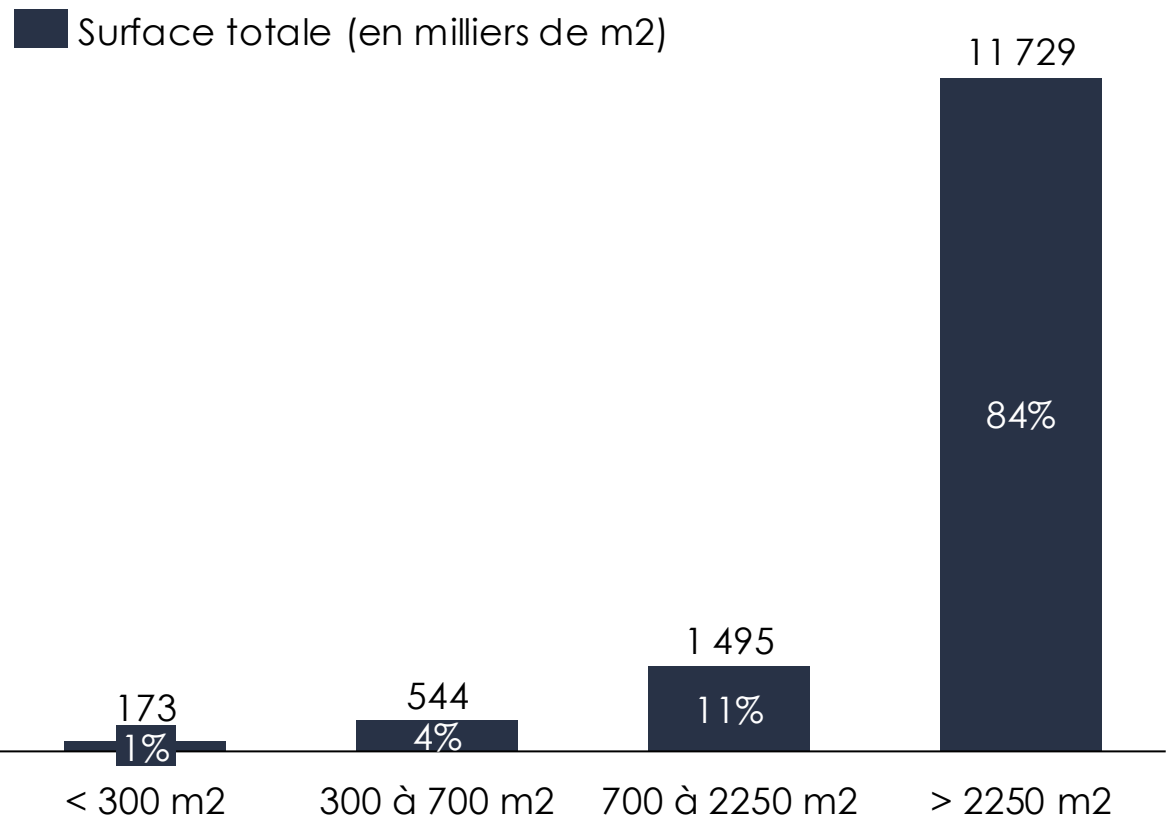
« Les **retraités de 75 ans et plus** utilisent beaucoup plus fréquemment le **fioul** pour chauffer leur maison que les autres CSP (**24%** contre 12%). S'agissant des retraités âgés, ce constat peut en partie s'expliquer par l'occupation plus fréquente de maisons construites de 1949 à 1974 (dans 32 % des cas contre 18 % au niveau global) et vraisemblablement par leur moindre inclination à modifier leur installation thermique. »

- D'après l'enquête logement (SDES 2020¹), le fioul est plus utilisé dans des maisons avec des **grandes surfaces**, dans les **zones rurales peu denses** et par les **retraités**.

¹ : SDES, enquête logement 2020, maisons résidences principales de France métropolitaine

Répartition des surfaces des MH du tertiaire par quartiles

Répartition des surfaces totales par quartiles – en m²



Messages clés

Sur l'ensemble du jeu de données où la surface est disponible (4 637 bâtiments), nous avons regardé la **répartition des surfaces** :

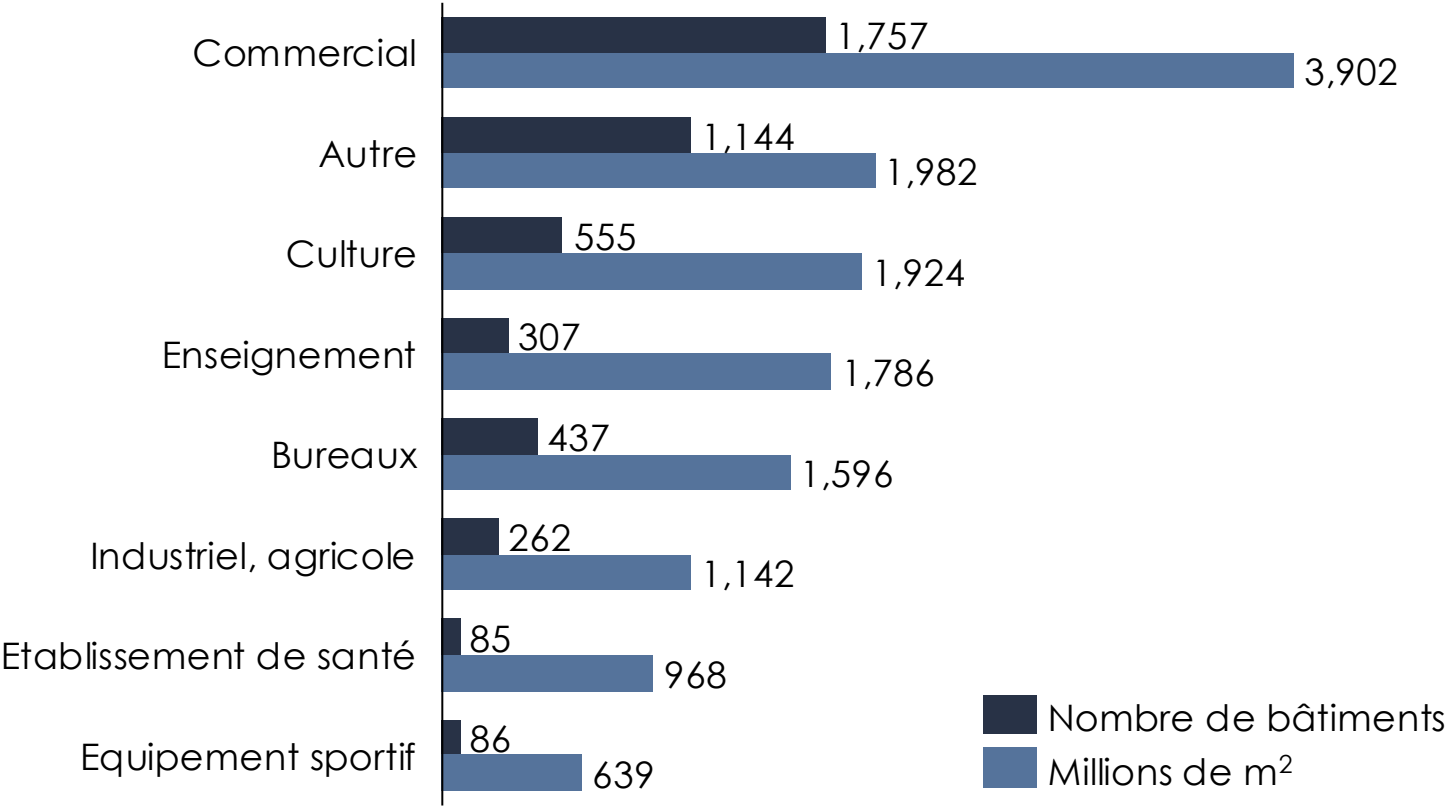
- 1^{er} Quartile : 300 m²
- Médiane : 700 m²
- 3^{ème} Quartile : 2250 m²

Le tertiaire **concentre une grande partie des bâtiments de +758 m²** avec 49% de ses surfaces renseignées pour **95% de la surface totale du tertiaire**.

- **Moyenne** : 3 006 m²
- **Min** : 4 m² (Chapelle notre dame des affligées)
- **Max** : 176 171 m² (Hôpital Necker)

Répartition des MH du tertiaire et de leurs surfaces par catégorie d'usage

Répartition¹ par catégorie d'usage du nombre de MH et des surfaces



Messages clés

Pour la catégorie tertiaire, on retrouve **5 922 bâtiments**. Parmi ces bâtiments, **4 637** ont une **surface renseignée**.

La **surface totale** est de **13 940 341 m²**.

On retrouve une majorité de bâtiments **commerciaux et indifférenciés**.

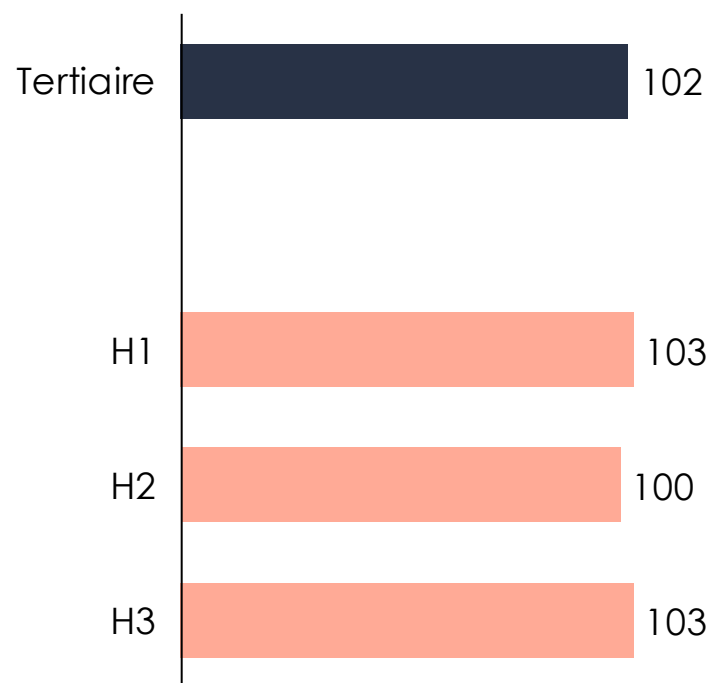
Surface par bâtiment (Médiane) :

- Bureaux : 1 915 m²
- Commercial : 1 953 m²
- Autre : 2 129 m²
- Industriel, agricole : 2 702 m²
- Culture : 2 929 m²
- Enseignement : 3 129 m²
- Etablissement de santé : 4 727 m²
- Equipement sportif : 6 126 m²

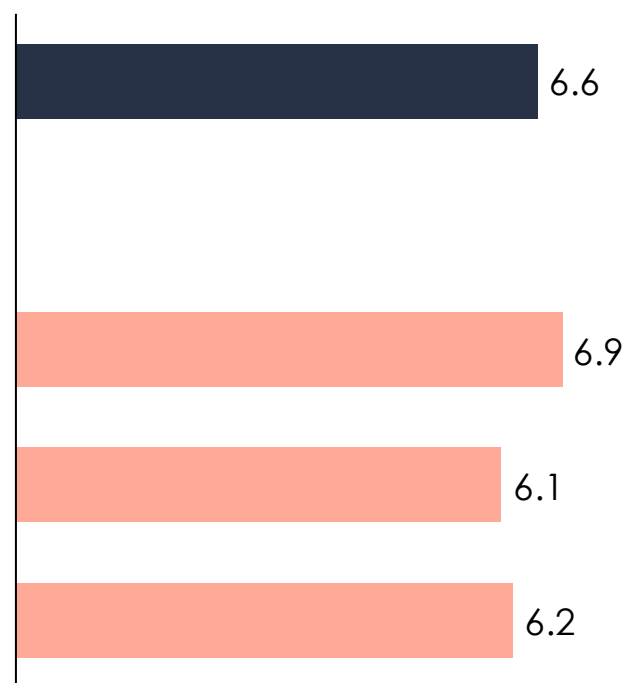
¹ : Les données proviennent de la base de données nationale des bâtiments (BDNB)

Intensité énergétique et intensité carbone des MH du tertiaire par zone climatique

Consommation énergétique par zone climatique – Médiane, kWh/(m².an)



Intensité carbone par zone climatique – Médiane, kgCO₂e/(m².an)



Messages clés et pistes d'analyse

- Dans le cas du tertiaire, les intensités carbonées par zone climatique sont assez proches. L'écart entre la zone H1 et la zone H3 est faible (10%).
- **Le climat extérieur** paraît donc être une **variable peu significative** dans l'intensité énergétique et carbone du tertiaire.
- Leurs usages et contraintes sont des facteurs bien plus importants, comme illustré dans la slide précédente.
- **Piste d'analyse** : pour les bâtiments du tertiaire, la climatisation dans la zone H3 aurait une consommation énergétique suffisamment importante pour équilibrer les consommations énergétiques entre les zones (les zones H1 et H2 chauffant davantage en hiver)

Analyse détaillée des 15 MH tertiaires de la BDNB les plus émissifs au m²

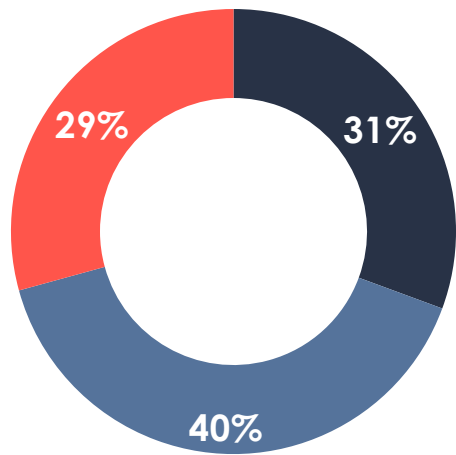
Nom	Ville	Fonction	Surface (m²)	Consommation énergétique (MWh/m²)	Emissions surfaciques (CO ₂ e/m²)	Emissions absolues (tCO ₂ e)
Couvent des Cordeliers	Toul	Lycée	548	35,1	8,25	4 522
Immeuble, dit aussi hôtel Jacquet	Nancy	Musée	52	31,4	7,52	390
Ancien quartier Tirlet	Châlons-en-Champagne	Services	20	30,3	7,24	144
Bibliothèque Sainte-Geneviève	Paris 5e	Bibliothèque	246	35,2	6,94	1 706
Gare Lisch	Asnières-sur-Seine	Futur Musée	14	27,7	6,62	92
Ancien restaurant Rougeot,	Paris 6e	Enseignement	680	27,3	6,44	4 378
Groupe scolaire	Paris 13e	Enseignement	294	24,6	5,82	1 711
Eglise Saint-Lô (ancienne)	Rouen	Enseignement	738	22,5	5,34	3 940
Abri antiaérien conique	Villenoy	Mairie	2 774	22,2	5,22	14 468
Palais de la Porte Dorée	Paris 12e	Musée	266	22,6	4,26	1 132
Lycée Marie Curie	Sceaux	Enseignement	2 152	17,6	4,18	9 003
Hospice Brézin (ancien)	Garches	Hôpital	55 669	17,2	4,11	228 612
Hôtel du Gouvernement, dit Hôtel R	Versailles	Militaire	4 335	16,7	3,99	17 284
Cour des Comptes	Paris 1er	Administratif	558	15,3	3,67	2 046
Hôpital	Brienne-le-Château	Hôpital	9 876	15,0	3,58	35 376

Les 15 bâtiments de l'extraction de la BDNB les plus émissifs au m² proviennent du **tertiaire**, de la **zone climatique H1** et utilisent le **gaz** comme source principale d'énergie. Certaines données de surface issues de la BDNB ne sont pas fiables.

Contrôle de cohérence pour le tertiaire : Répartition des MH et de leurs surfaces

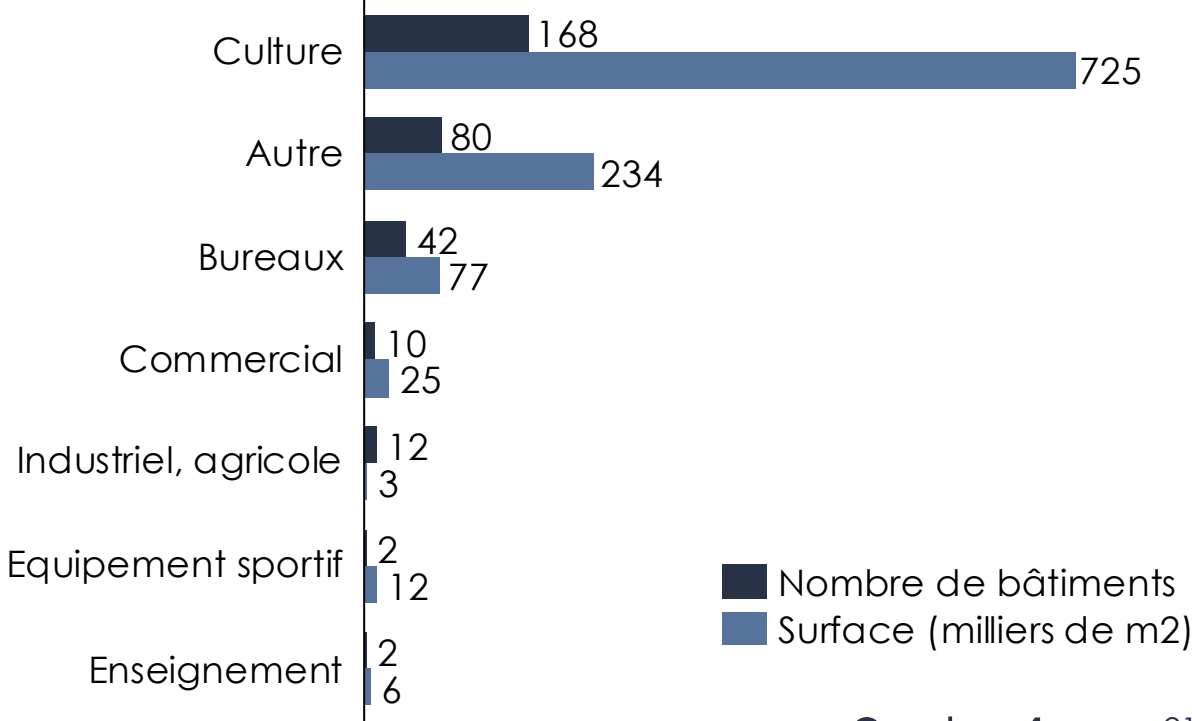
- Afin de vérifier la **cohérence des données de la BDNB**, un appel a été fait auprès des **collectivités** (grâce aux contacts du Cerema), du **CMN** et du **ministère**, qui sont gestionnaires de monuments, à usage culturel principalement (musées).

Répartition du nombre de bâtiments
par source de données de l'enquête



■ CMN
■ Ministère
■ Collectivités

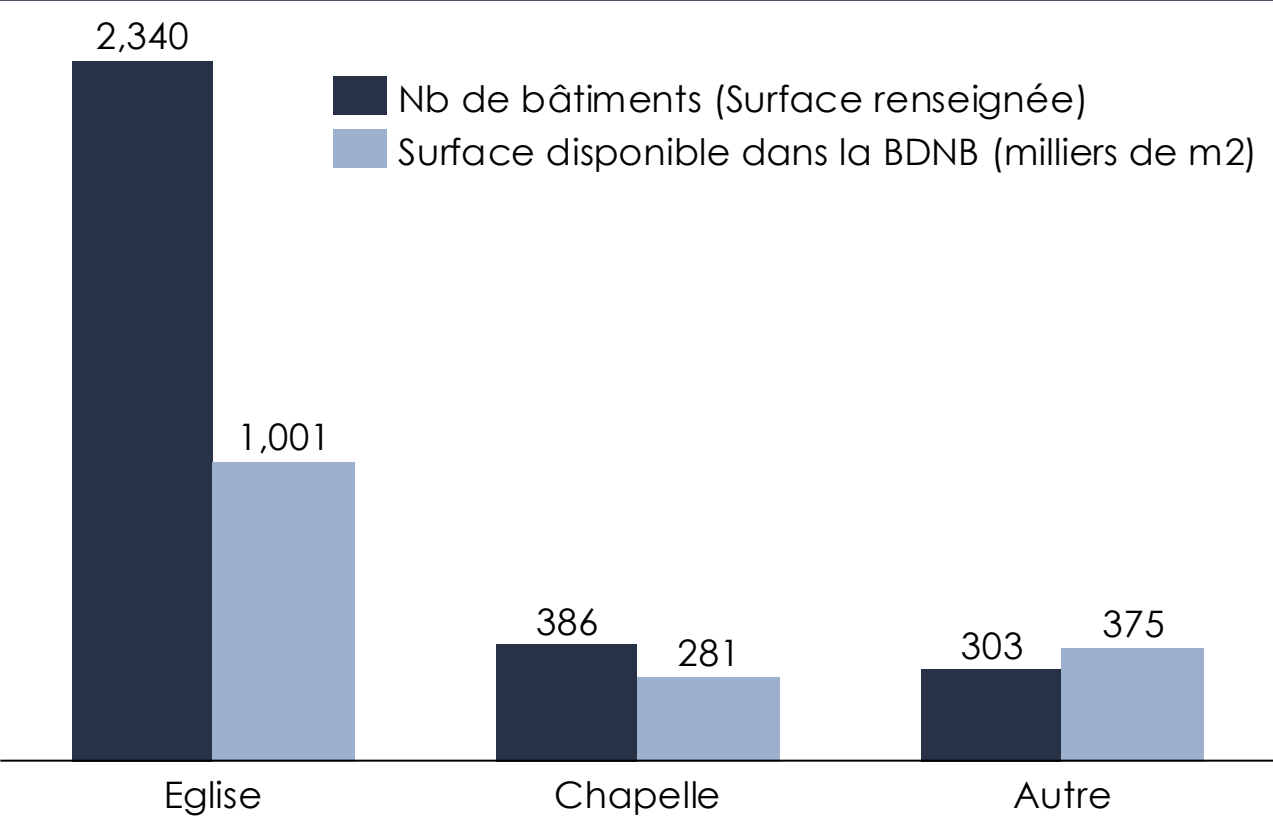
Répartition des surfaces
par typologie de cette enquête



■ Nombre de bâtiments
■ Surface (milliers de m²)

Répartition des MH du culte et de leurs surfaces par type de bâtiment (Église, Chapelle ou Autre)

Répartition¹ par catégorie d'usage du nombre de MH et des surfaces



Messages clés

Pour le culte, on retrouve **12 177 MH**. Parmi eux, seulement **3 029** ont une **surface renseignée**.

La **surface totale dont la donnée est disponible** est de **1 657 300 m²**.

On retrouve majoritairement des **églises**, des chapelles et des **bâtiments divers** (abbaye, couvent, monastère, etc.).

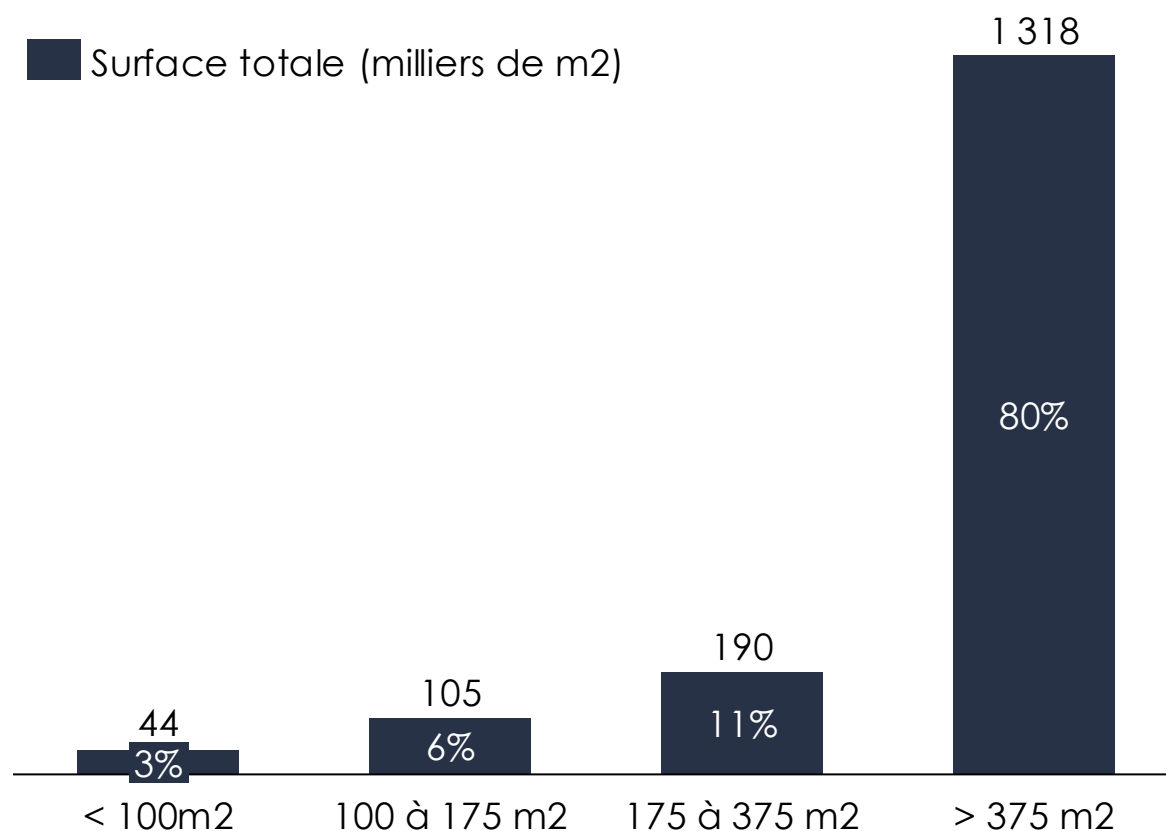
À noter que parmi les églises et les chapelles, peuvent également **se cacher des surfaces des bâtiments annexes** (salle paroissiale, presbytères, etc.).

Il apparait que les données de surface ne sont pas cohérentes dans la BDNB, impactant la fiabilité des résultats sur cette typologie.

¹ : Les données proviennent de la base de données nationale des bâtiments (BDNB)

Répartition des surfaces des MH du culte par quartiles

Répartition des surfaces totales par quartiles – en m²



Messages clés

Sur l'ensemble du jeu de données où la surface est disponible (3 029 bâtiments), nous avons regardé la **répartition des surfaces** :

- 1^{er} Quartile : 100 m²
- Médiane : 175 m²
- 3^{ème} Quartile : 375 m²

Pour le culte, on retrouve une **répartition assez proche de celle du résidentiel**.

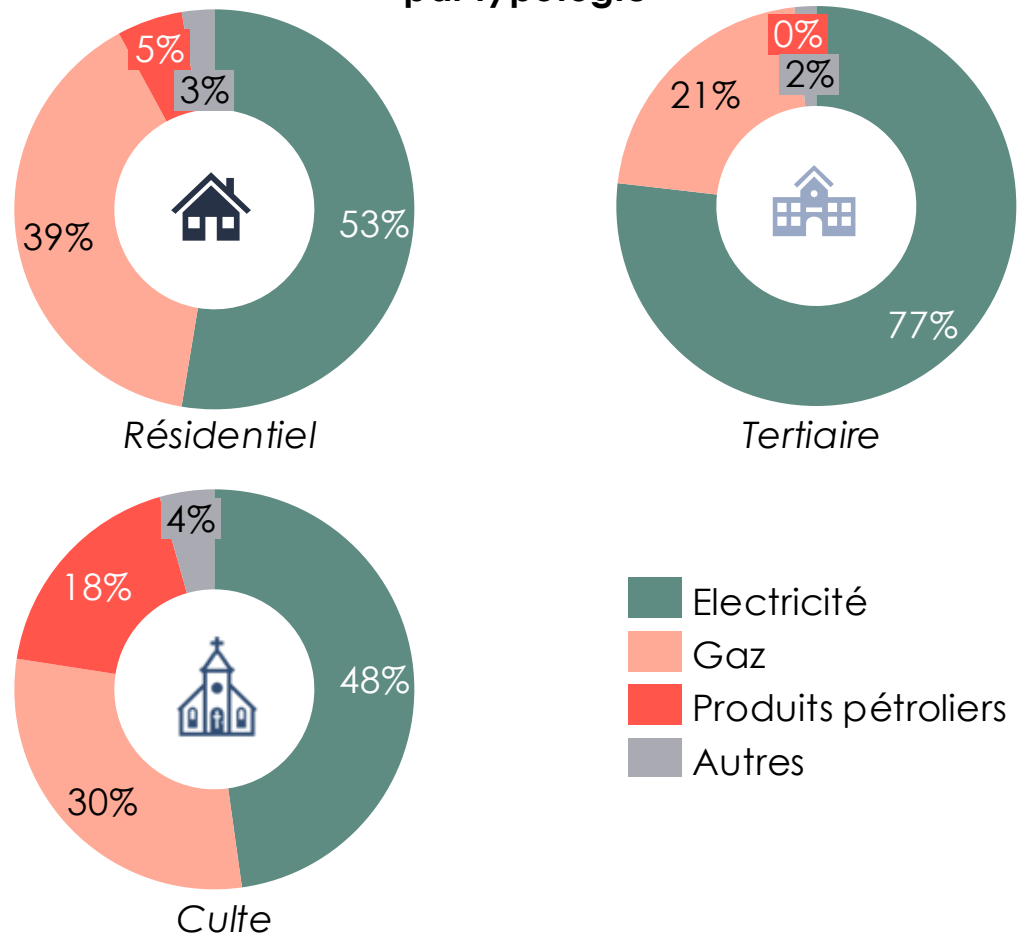
Environ 69 % de la surface totale est due à 14% des bâtiments (+ 758 m²)

- **Moyenne** : 544 m²
- **Min** : 1 m² (Eglise de la Sainte Trinité à Parassy)
- **Max** : 24 519 m² (Abbaye de Saint-Gildas-des-Bois)

Les min et max montrent le **manque de fiabilité des surfaces** des fichiers fonciers pour les bâtiments culturels.

Répartition des MH (en nombre) par source principale de chauffage et par typologie

Répartition du nombre de MH par source de chauffage principal, par typologie

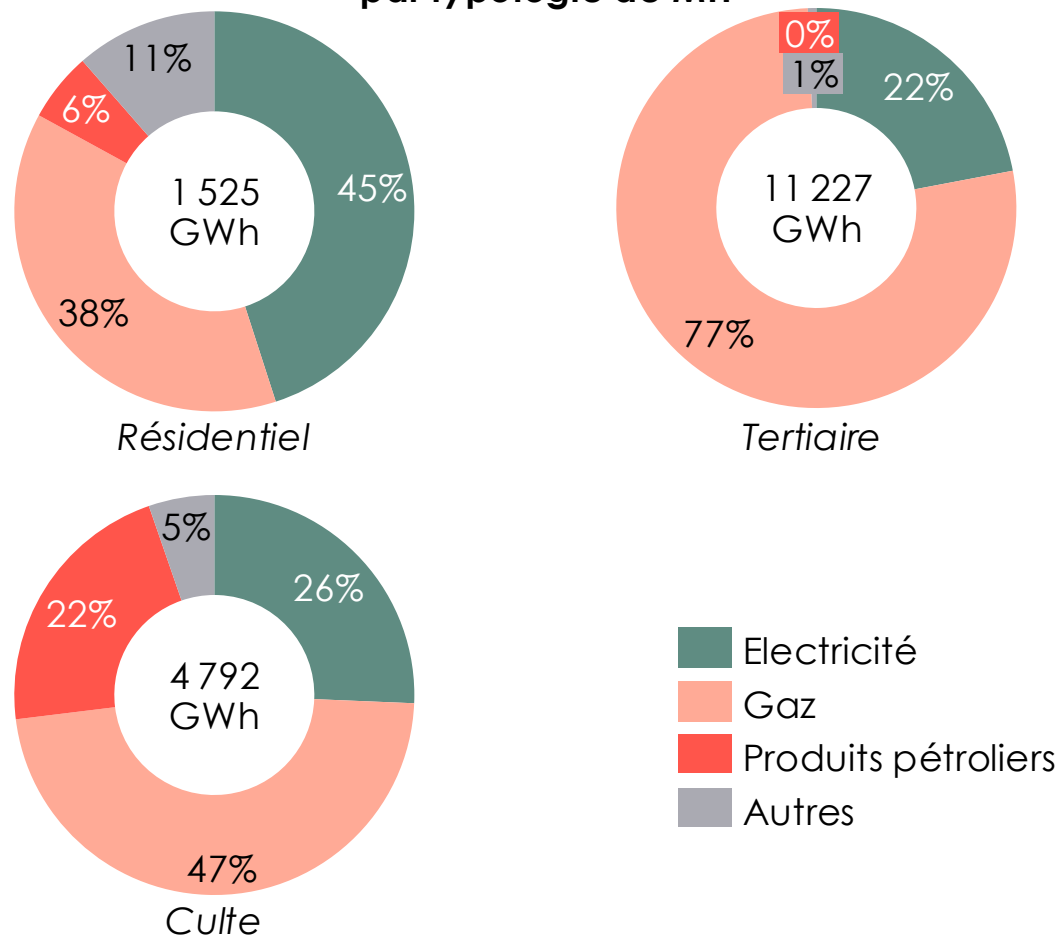


Pistes d'analyse et messages clés

- Lorsque l'on regarde le nombre de monument par source principale de chauffage, **l'électricité** ressort comme le premier vecteur, et particulièrement pour le tertiaire (77% des MH).
- Le **gaz** est le deuxième vecteur principal de chauffage (39% des MH résidentiels, 21% des MH tertiaires), suivi par les **produits pétroliers** — le fioul principalement, (18% des MH cultuels, 5% des MH résidentiels).
- Cette donnée est à prendre avec précaution, étant donné la **probable sous-estimation du fioul** (pour le résidentiel et le tertiaire) et **du bois** par la BDNB.

Répartition des consommations énergétiques des MH par source principale de chauffage et par typologie

Répartition des consommations énergétiques par vecteur principal par typologie de MH



Pistes d'analyse et messages clés

- Lorsque l'on regarde la répartition des vecteurs en fonction de la consommation énergétique finale, celle-ci change fortement. Cela est liée aux disparités de surfaces et aux intensités par m² (cf. slide suivante pour les détails).
- Le **gaz est l'énergie la plus consommée par le tertiaire** (liées à des très grandes surfaces chauffées intensément au gaz) et par le culte.
- Pour le résidentiel, l'électricité paraît être la première énergie consommée (45%), suivi par le gaz (38%)— avec toujours la limite du fioul et du bois qui ont sûrement été sous estimés.
- Les **énergies fossiles sont encore prédominantes** dans l'exploitation des monuments historiques, toute catégorie confondue.

Détails sur la consommation énergétique totale et en intensité par quartile de surface et par typologie (avant extrapolation)

Répartition des consommations énergétiques absolues par vecteur énergétique (sur la base des consommations totales en TWh par catégorie de MH; avant extrapolation)

	Résidentiel				Tertiaire				Culte			
Quartile des surfaces (m²)	< 150	150 à 300	300 à 600	+ 600	< 300	300 à 700	700 à 2250	> 2250	< 100	100 à 175	175 à 375	> 375
Consommation énergétique en intensité (kWh/m²)	213	184	164	145	1274	169	76	93	240	219	202	165
Consommation énergétique totale (MWh)	50 396	100 744	167 508	630 378	46 486	158 931	304 065	4 621 675	4 950	11 229	11 374	14 733



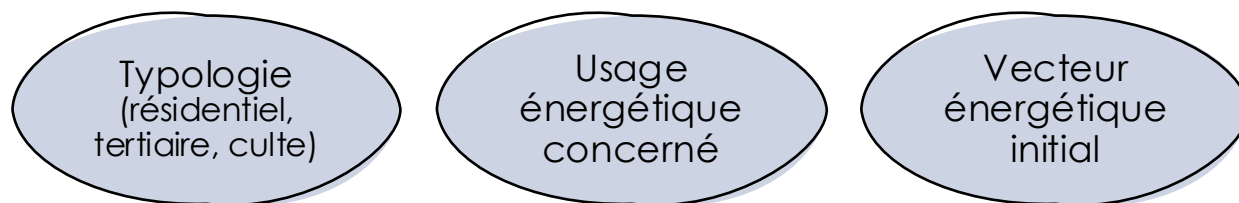
Trajectoire carbone Méthodologie

Comment définir une trajectoire de réduction des émissions carbone des monuments historiques ?

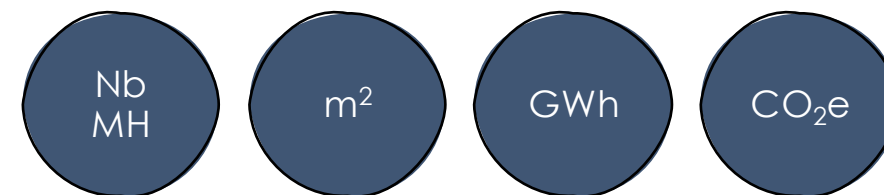
Méthodologie de calcul des estimations de l'empreinte et des gains carbone sur le parc MH à horizon 2035 et 2050

Pour chaque action :

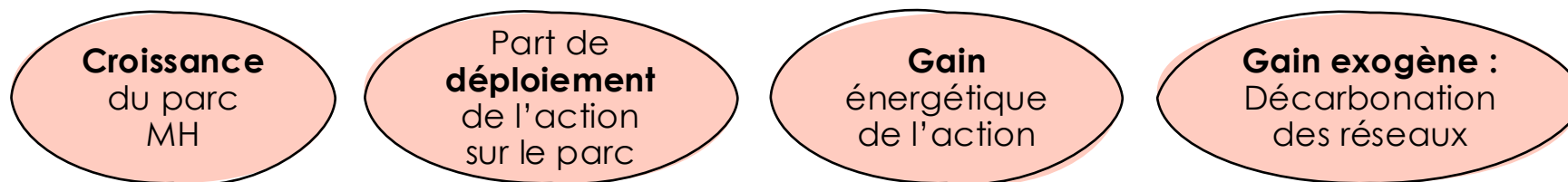
1. Définition du **périmètre concerné** par l'action



2. Transposition en **données physiques**



3. Définition des **hypothèses de projection** à horizon 2035 et 2050



+ 0,7% par an
(Projection
tendancielle
homogène)

Atelier priorisation
Entretien MOA
Stratégies nationales

Expertise
Carbone 4

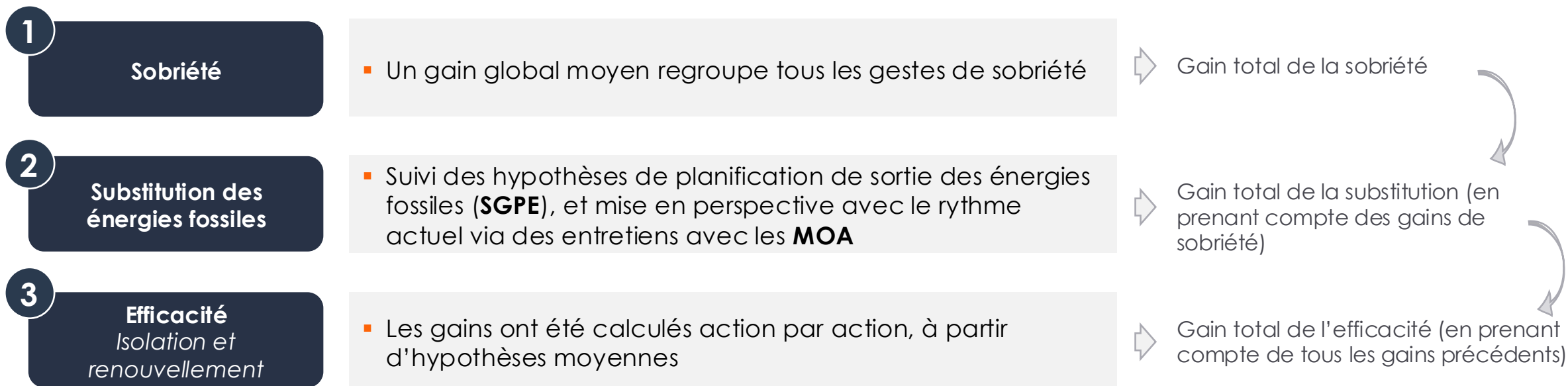
2 scénarios pour
l'électricité, le gaz et
les RCU

Les 3 grands types de leviers pour réduire les émissions carbone

Ordre de priorité	Objectif	Pour l'énergie d'exploitation
1 Sobriété	➤ Questionner les besoins ➤ Comment réduire la demande ?	➤ Comment réduire les besoins de chauffage ? ➤ Quels usages pertinents par rapport aux performances du bâtiment ?
2 Efficacité	➤ Réduire la quantité d'énergie pour satisfaire le même besoin ➤ Comment réduire les pertes et optimiser le système ?	➤ Comment travailler sur l'enveloppe et l'isolation du bâtiment ? ➤ Comment améliorer les rendements des équipements ?
3 Substitution bas carbone	➤ Produire et utiliser de l'énergie bas carbone ➤ Comment substituer une énergie par une autre ?	➤ Comment remplacer l'utilisation du gaz et du fioul par d'autres énergies et systèmes décarbonés ?

Méthode de quantification des gains

- Les leviers de **sobriété** ont été calculé en premier.
- Les leviers de **substitution** ont été calculés avant ceux d'efficacité, étant donné :
 - **L'importance des énergies fossiles** dans les résultats de l'étude et la **capacité** relative des acteurs à changer de vecteur,
 - La **fiabilité des gains** entre deux vecteurs et la **disponibilité des objectifs nationaux** sur ces changements d'énergie.
- Les leviers **d'efficacité** sont plus **incertains**, les gains étant dépendants des spécificités de chaque bâti (un diagnostic spécifique est nécessaire en amont de toute décision, pour préserver les valeurs patrimoniales). Les leviers d'efficacité ont été calculés un à un, en prenant compte des gains réalisés par les actions précédentes.



Sobriété : changements de comportements et des usages

1

Sobriété

Liste des actions à mettre en œuvre pour actionner le levier sobriété

- **Sensibiliser** les occupants et les gestionnaires
- **Chauffer & isoler les corps** plus que les grands volumes (mettre des pulls, chauffage radiant à proximité, etc.)
- **Améliorer le confort & la température ressentie**, en jouant sur **l'effusivité** des surfaces : avec des tapis, tentures murales, rideaux, planchers, enduits, etc.
- **Augmenter la densité** d'occupant par m²
- Réduire les **températures de chauffage**
- **Questionner** et adapter les usages du monument à ses performances thermiques et aux contraintes climatiques
 - Quels sont les usages possibles en période de canicule ou de grand froid par exemple ?
 - Aller jusqu'à arrêter le chauffage, voire fermer certain MH lors des pics de température
- Bien **entretenir** les équipements et bâtiments

Définition des gains potentiels associés aux actions de sobriété

Résidentiel et tertiaire



- Selon le concours Cube, les économies d'énergie sont de **15%** par an par bâtiment en moyenne, et peuvent monter jusqu'à 40%.¹
- Selon Incub, 1°C de chauffage en plus augmente de **15% à 30%** les consommations.
- ➔ Il est décidé d'utiliser le **15% de gain en moyenne** pour la somme des actions de sobriété.

Culte (églises)

- Pour les églises, il n'existe pas de source connue sur les gains des actions de sobriété.
- Les gains de sobriété paraissent avoir un **fort potentiel couplé à des changements de vecteurs**.
 - Par exemple, le fait d'arrêter de chauffer les volumes des églises avec de l'air pulsé chauffé au gaz pour chauffer uniquement les corps lors des messes avec du radiant électrique permettrait **de diviser par 2 jusqu'à 10 la puissance à installer, et les consommations associées**.
- ➔ Il est décidé d'utiliser un **gain moyen de 30%** pour le volet sobriété sur le culte.

Définition de la vitesse de déploiement des actions de sobriété

	2035	2050
Part du parc de MH avec les leviers sobriété déployés à horizon	40 %	95 %

¹ Ces gains ne sont obtenus qu'au prix d'un engagement continu et volontaire des acteurs pendant au moins 1 année. Il faut un signal de la hiérarchie en amont, une désignation de porteurs internes et un accompagnement technique par des experts externes.

Substitution : remplacement des chaudières à énergie fossile vers des équipements à énergies renouvelables et bas carbone

2

Substitution bas carbone

Liste des actions à mettre en œuvre pour actionner le levier substitution

- **Réduction des énergies fossiles :**
 - Suppression des chaudières au fioul et au pétrole
 - Réduction de l'utilisation du gaz
- **Augmentation des systèmes décarbonés :**
 - Électrification des usages, mise en place de pompes à chaleur
 - Utilisation des ENR : géothermie, panneaux thermiques & photovoltaïques, biomasse
 - Raccordement aux réseaux de chaleur pour les MH en zone urbaine
- Réduction des **fluides frigorigènes** les plus émissifs (climatiseurs)

Déploiement des actions de substitution des énergies fossiles

Part de substitution* entre 2024 et		2035			2050		
							
Substitution du fioul vers	 PAC air/eau	30 %	/	20 %	50 %	/	40 %
	 Biomasse	10 %	/	10 %	15 %	/	15 %
	 Réseau de chaleur	5 %	/	5 %	5 %	/	5 %
	 Géothermie	5 %	/	5 %	15 %	/	15 %
	 Radiant électrique	/	/	5 %	/	/	5 %
	 Gaz	/	/	5 %	/	/	5 %
Substitution du gaz vers	 PAC air/eau	5 %	8 %	5 %	10 %	10 %	10 %
	 Biomasse	5 %	2 %	5 %	5 %	5 %	5 %
	 Réseau de chaleur	5 %	10 %	5 %	5 %	15 %	5 %
	 Géothermie	10 %	10 %	10 %	20 %	20 %	20 %

→ 50 % du fioul remplacé d'ici 2035 (5% par an)
→ 85% d'ici 2050

→ 29% du gaz remplacé d'ici 2035 (2,6% par an)
→ 48% d'ici 2050
En priorité sur le tertiaire

*Part de substitution des consommations en % cumulé à l'année d'échéance.
SGPE : suppression de 75% des chaudières au fioul d'ici 2030. Sortie complète pour les bâtiments de l'Etat. Suppression de 20% des chaudières gaz d'ici 2030.

Efficacité : actions d'isolation et de gestion technique pour améliorer la performance du bâti et des équipements

3

Efficacité

ISOLATION

Liste des actions à mettre en œuvre pour actionner le levier efficacité

- **Perméabilité à l'air et isolation entre les liaisons** : améliorer l'étanchéité à l'air, réduire les fuites d'air et ponts thermiques (notamment au niveau des jonctions maçonnerie-menuiserie)
- **Menuiseries extérieures** :
 - Calfeutrement, rideaux, volets, ajout ou changement du vitrage et/ou des châssis, en dernier recours remplacement par des menuiseries performantes
- **Murs & façades** :
 - Enduits isolants, isolation par l'intérieur ou par l'extérieur, en fonction des contraintes patrimoniales et techniques (impact point de rosée, renouvellement d'air, etc.)
- **Planchers** bas et **combles** aménagés ou non
- **Tuyaux énergétiques** : calorifugeage

GESTION
TECHNIQUE

- Solutions techniques **intégrées et automatisées** :
 - GTB, détecteurs de présence et luminosité, thermostat, économiseurs d'eau
- **Renouveler** les équipements par des plus **performants**, avec des meilleurs rendements
 - Relamping led
 - Renouvellement des systèmes de chauffage, ventilation & climatisation
 - Installer des inserts dans les cheminées ouvertes

Déploiement des actions retenues sur l'efficacité (hors culte)

Action		Potentiel de surfaces*	Limites	Déploiement* à		Gain unitaire*
				2035	2050	
Efficacité Isolation	Etanchéité à l'air & calfeutrement	100 %		35 %	83 %	15 %
	Combles	80 % à 100 %	20% occupées (à refaire isoler)	30 %	71 %	15 %
	Murs	70 %	Contraintes patrimoniales : protection des façades, décors et menuiseries de certaines pièces	20 %	47 %	10 %
	Plancher	70 %		20 %	47 %	5 %
	Remplacement verre	50 %		10 à 20 %	47 %	10 %
	Remplacement fenêtre	30 %		5 à 10 %	24 %	15 %
	Calorifugeage	100 %		30 %	71 %	10 %
Efficacité Gestion technique et renouvellement des équipements	GTB Résidentiel	50%	Petites surfaces non pertinentes	20 %	47 %	15 %
	GTB Tertiaire	80%		40 %	80 %	
	Ventilation	30 %	Peu de MH avec une ventilation	13 %	30 %	1 %
	Equipements électriques	100 % des 25% kWh = électricité		30 %	71 %	15 %
	Eclairage	100 %		35 %	83 %	50 %

→ 3% du parc restauré par an avec des actions embarquées d'isolations et de renouvellement systématiquement.

→ À horizon 2050, plus de 70% du parc aura réduit les fuites d'air, isolé les combles, les fenêtres et les tuyaux, et renouveler ses équipements.

*Potentiel de surfaces estimé (des études approfondies mériteraient d'affiner ces hypothèses issues des dire d'experts).

*Déploiement en % sur la totalité du parc (le % 2050 est forcément inférieur ou égal au potentiel estimé).

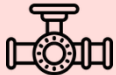
*Gain unitaire moyen sur l'usage chauffage/ECS (sauf action Eclairage). Le **culte est exclu** des actions d'isolation et de GTB.

Méthode et gains exogènes du scénario <2°C sur la décarbonation des réseaux d'énergie ?

Scénario <2°C

Méthode pour le scénario aligné <2°C :

- Carbone 4 part du **mix de production** et des **facteurs d'émissions** des scénarios nationaux, pour construire les trajectoires d'émissions de chaque réseau en kgCO₂e/kWh d'énergie consommée.

	Source des scénarios	Hypothèses de décarbonation
L'électricité 	Scénario N1 de Futurs Énergétiques 2050 de 	- Production 2030 : 60% nucléaire, 33% ENR - Production 2050 : 71% ENR, 26% nucléaire
Le gaz de réseau 	- PNEC 2024, jusqu'à 2035 - SNBC 2019 scénario gaz haut de 2035 à 2050	Développement de la méthanisation , et injection progressive du biométhane dans le réseau (33% en 2035, 100% en 2050)
Les réseaux de chaleur 	Fedene jusqu'en 2030, puis extrapolation tendancielle de - 3,5% par an jusqu'en 2050	Croissance du taux d'ENR et d'énergie de récupérations (75% en 2030) pour réduire à 79 gCO ₂ e/kWh en 2030

Méthode et gains exogènes du scénario modéré sur la décarbonation des réseaux d'énergie

Scénario modéré

Méthode pour le scénario modéré :

- Etant donné que le **scénario <2°C reste incertain**, malgré **l'engagement de l'Etat et des filières dessus**, un autre scénario moins ambitieux, appelé modéré, a été calculé pour **étudier la sensibilité des actions à ces facteurs extérieurs**.
- **Ce scénario modéré, non aligné avec les objectifs nationaux**, prend pour hypothèse que la décarbonation des réseaux sera plus faible à horizon 2050. Les hypothèses prises restent proches à horizon 2035 (étant donné que de nombreuses actions sont déjà engagées)

Hypothèses de décarbonation



L'électricité



Le gaz de réseau



Les réseaux de chaleur

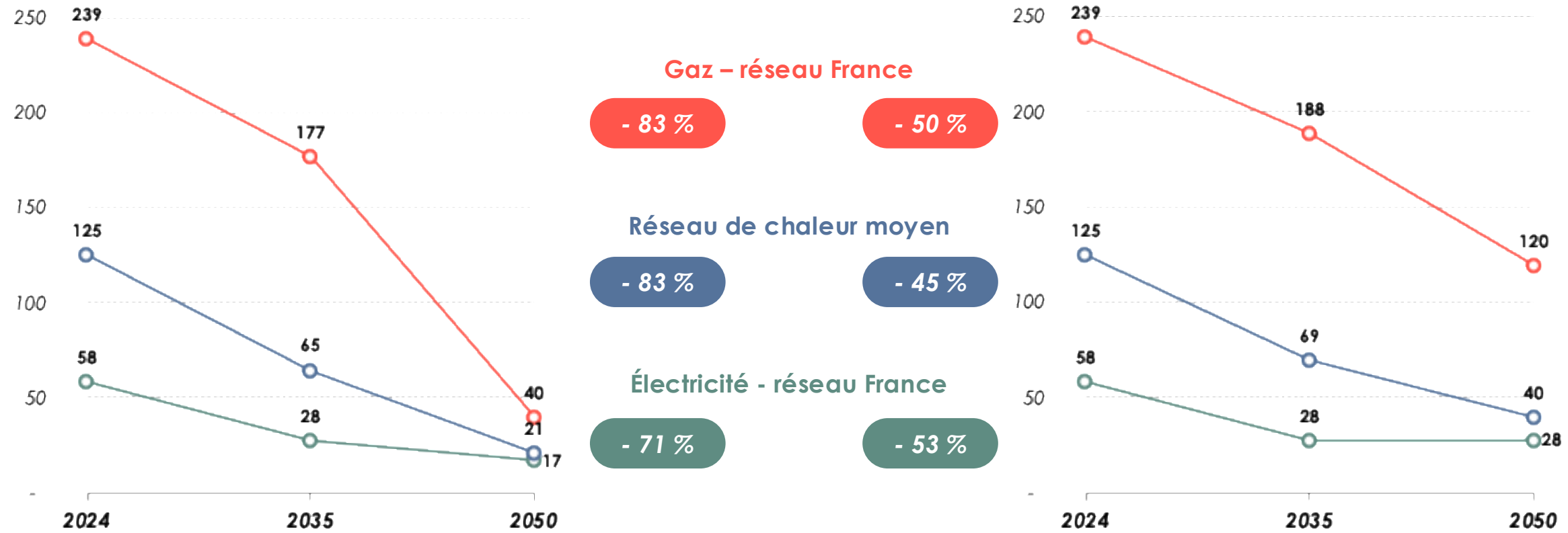
- Décarbonation similaire jusqu'à 2035 (les réductions d'émissions étant déjà bien engagées), puis émissions stagnantes jusqu'à 2050 due à la difficulté d'abattre les dernières émissions.
- Décarbonation par 2 du réseau entre 2024 et 2050, due à un déploiement plus limité de la méthanisation (60% du mix de production en 2050, vs.). Projection linéaire entre 2024 et 2050.
- Décarbonation similaire jusqu'en 2030 (action engagées), puis décarbonation par 2 de la moyenne nationale entre 2030 et 2050.

Décarbonation des réseaux énergétiques français entre 2024 et 2050

Evolution des facteurs d'émissions énergétiques (gCO₂e/kWh PCI)

Scénario <2°C

Scénario modéré

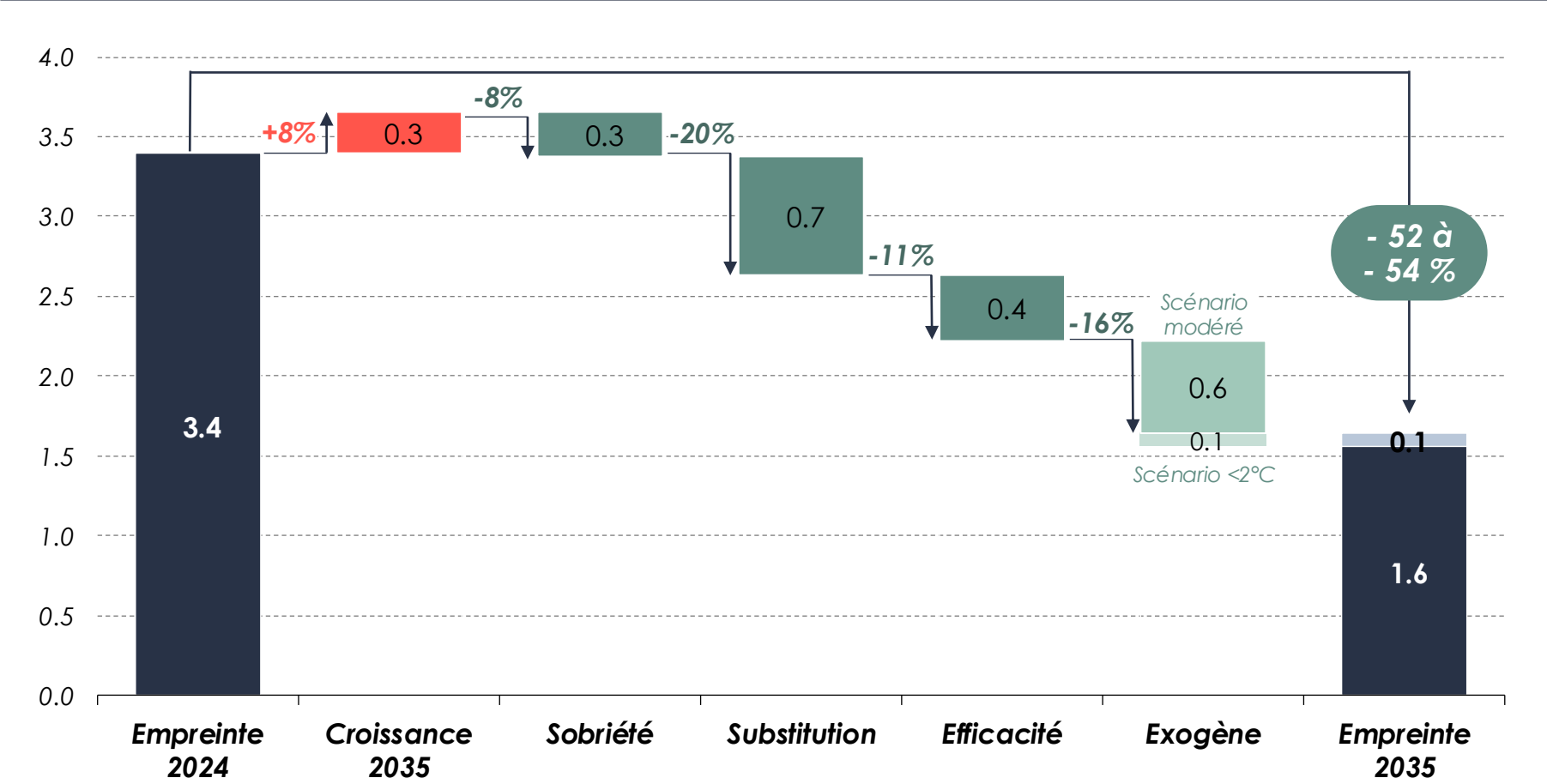


Trajectoire carbone Résultats

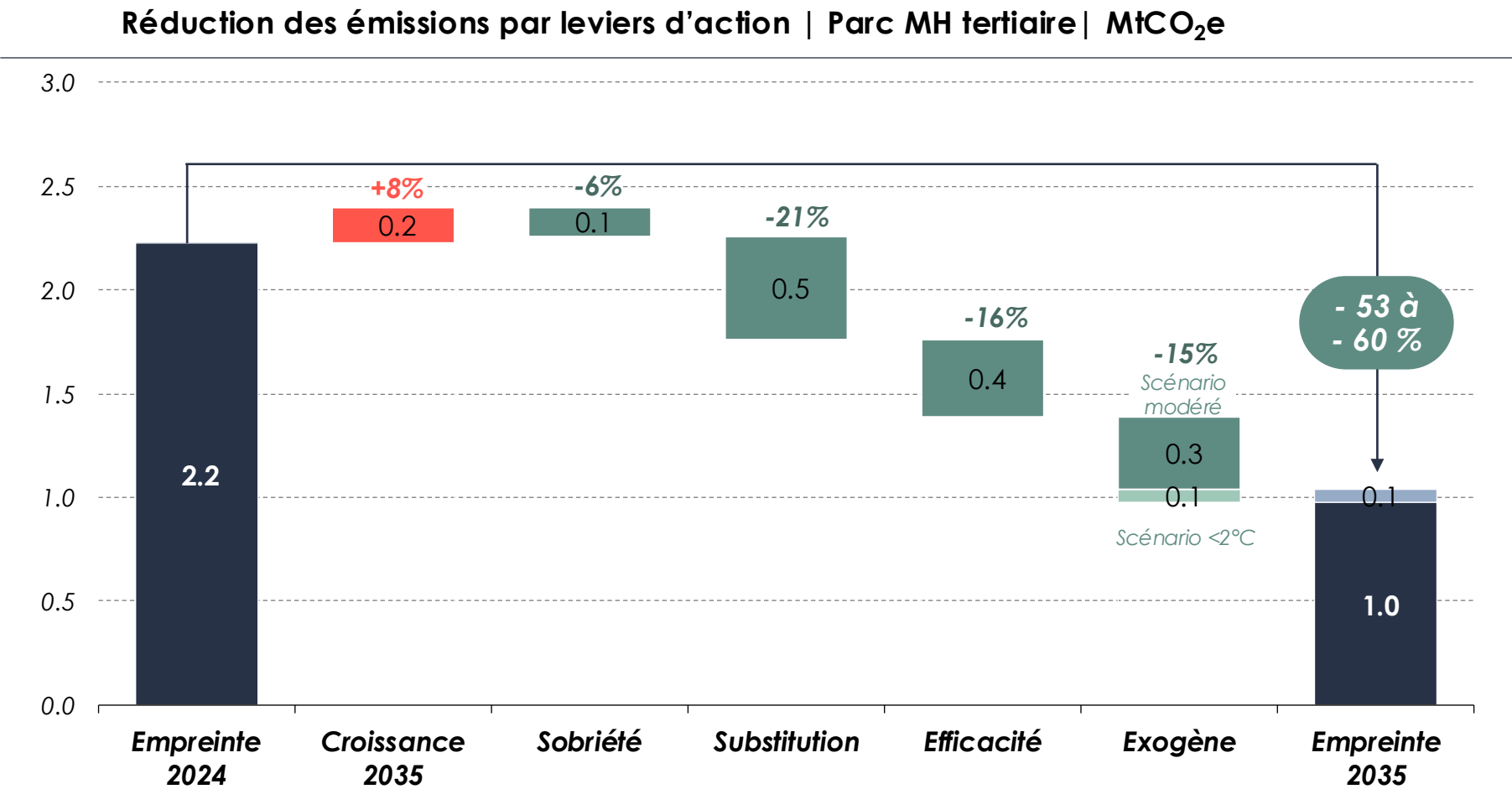


Résultats généraux des gains carbone à horizon 2035

Réduction des émissions par leviers d'action | Parc MH | MtCO₂e

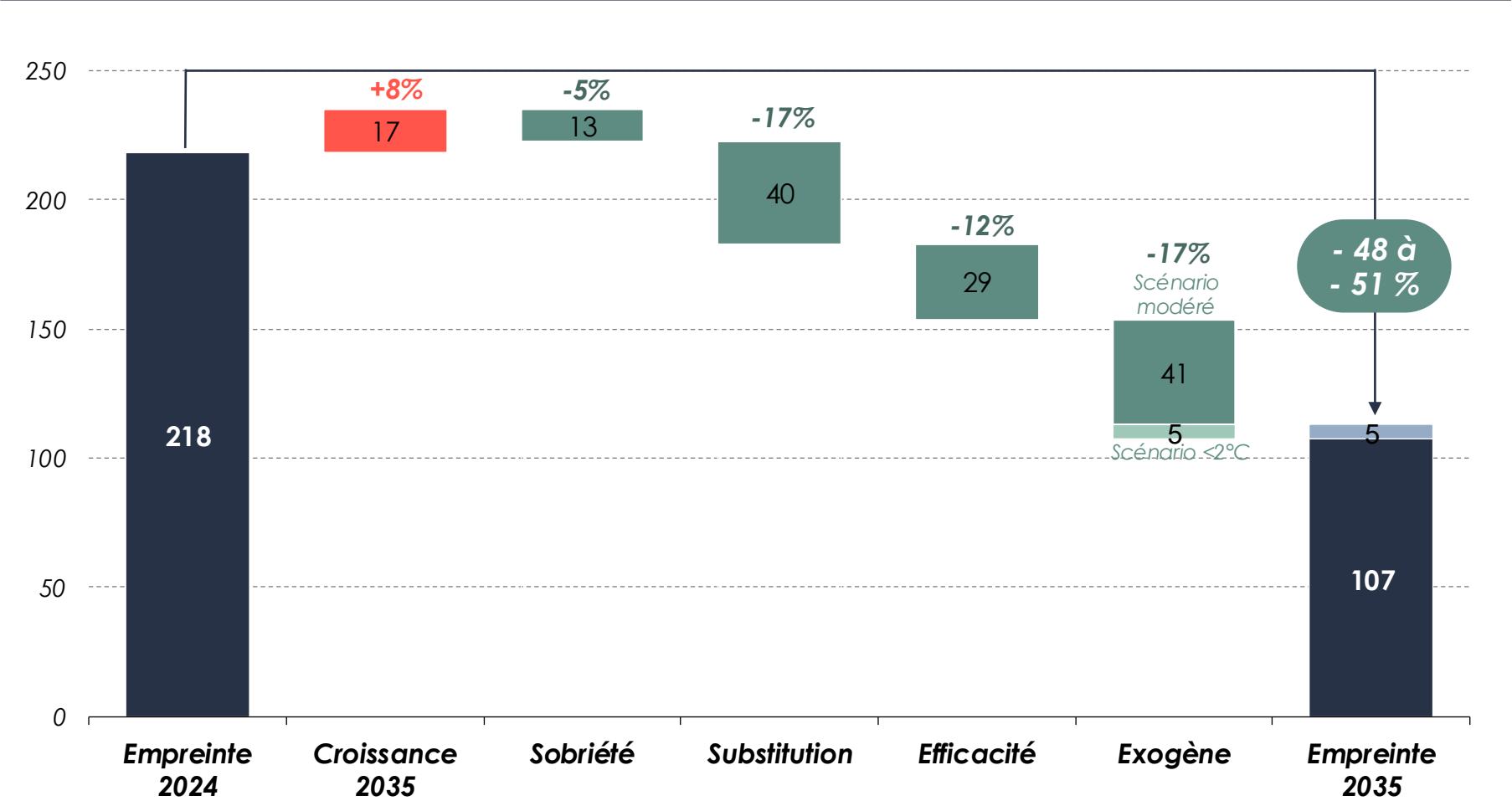


Résultats généraux des gains carbone à horizon 2035 – Tertiaire



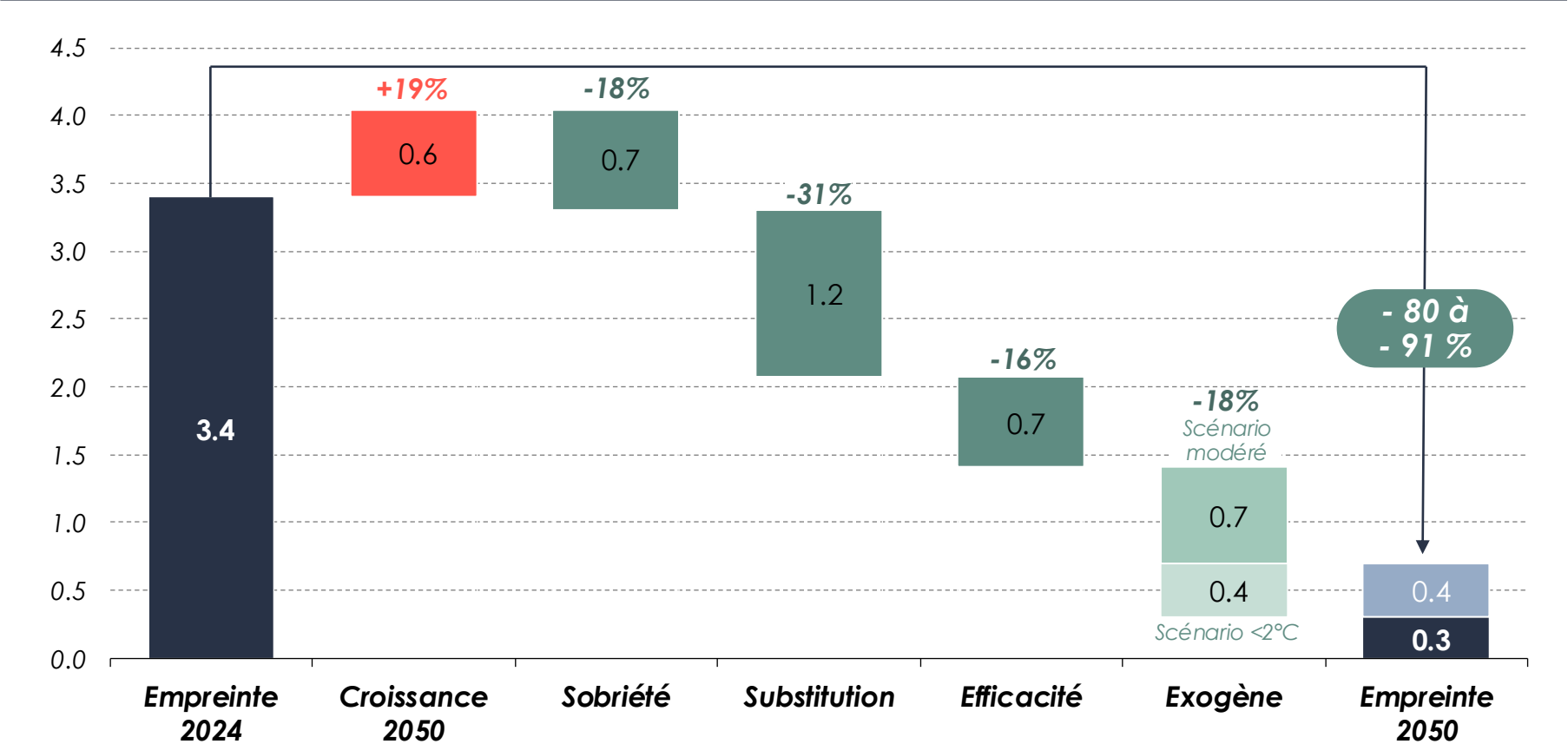
Résultats généraux des gains carbone à horizon 2035 – Résidentiel

Réduction des émissions par leviers d'action | Parc MH résidentiel | ktCO₂e



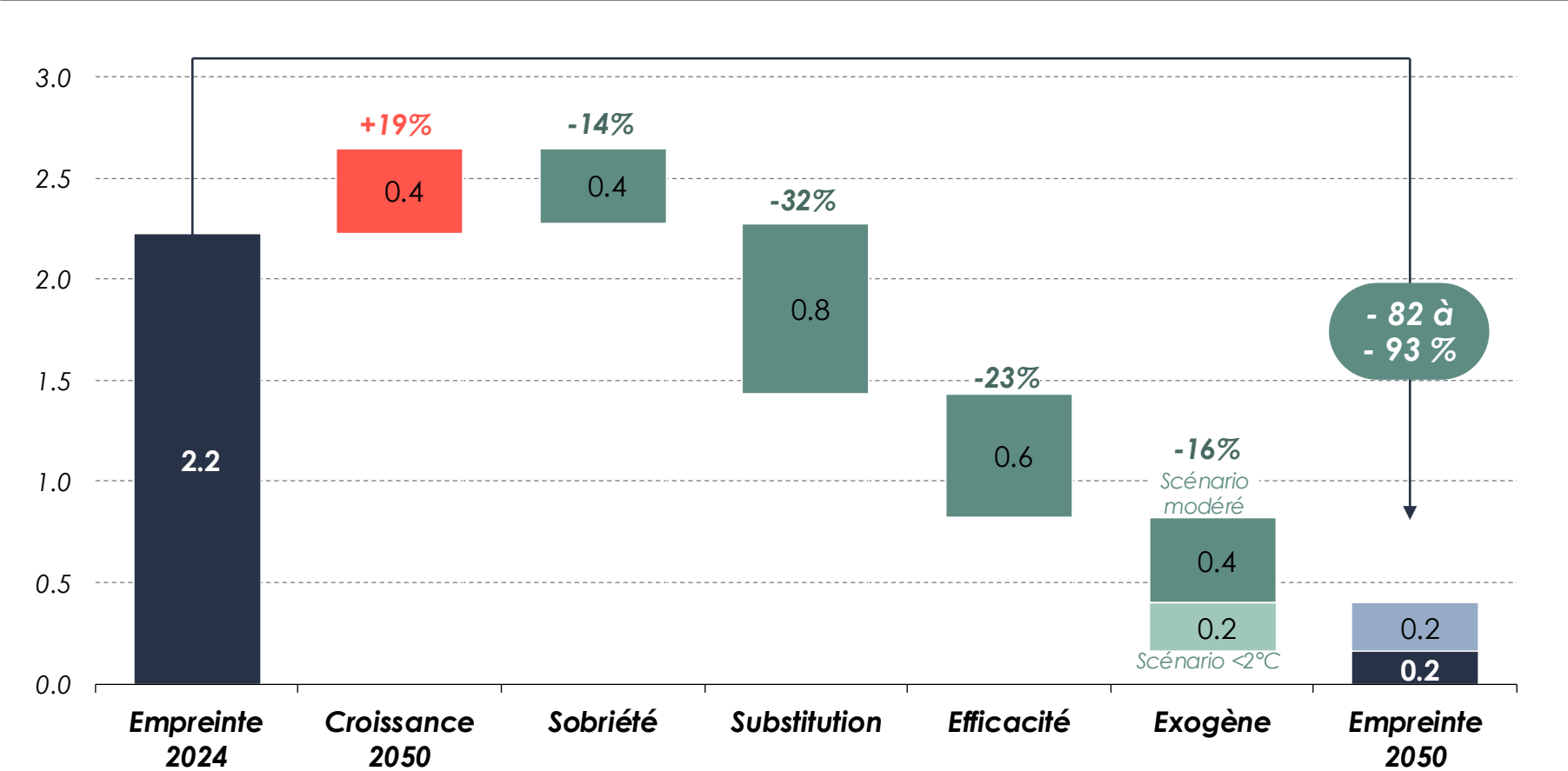
Résultats généraux des gains carbone à horizon 2050

Réduction des émissions par leviers d'action | Parc MH | MtCO₂e



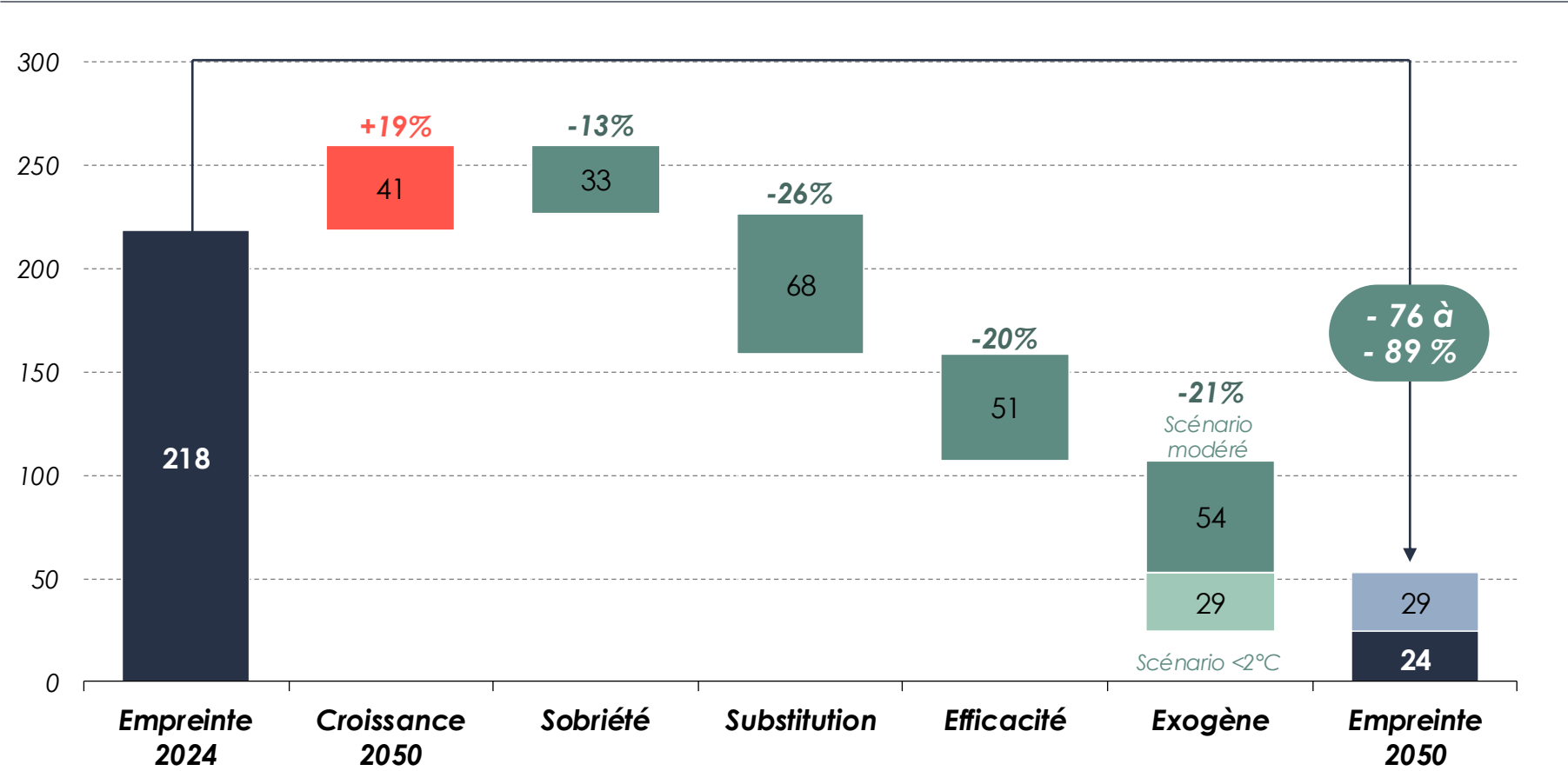
Résultats généraux des gains carbone à horizon 2050 – Tertiaire

Réduction des émissions par leviers d'action | Parc MH tertiaire | MtCO₂e



Résultats généraux des gains carbone à horizon 2050 – Résidentiel

Réduction des émissions par leviers d'action | Parc MH résidentiel | ktCO₂e





Freins et opportunités sur les leviers d'action



Freins et opportunités des actions identifiées pour les systèmes et réseaux d'énergie

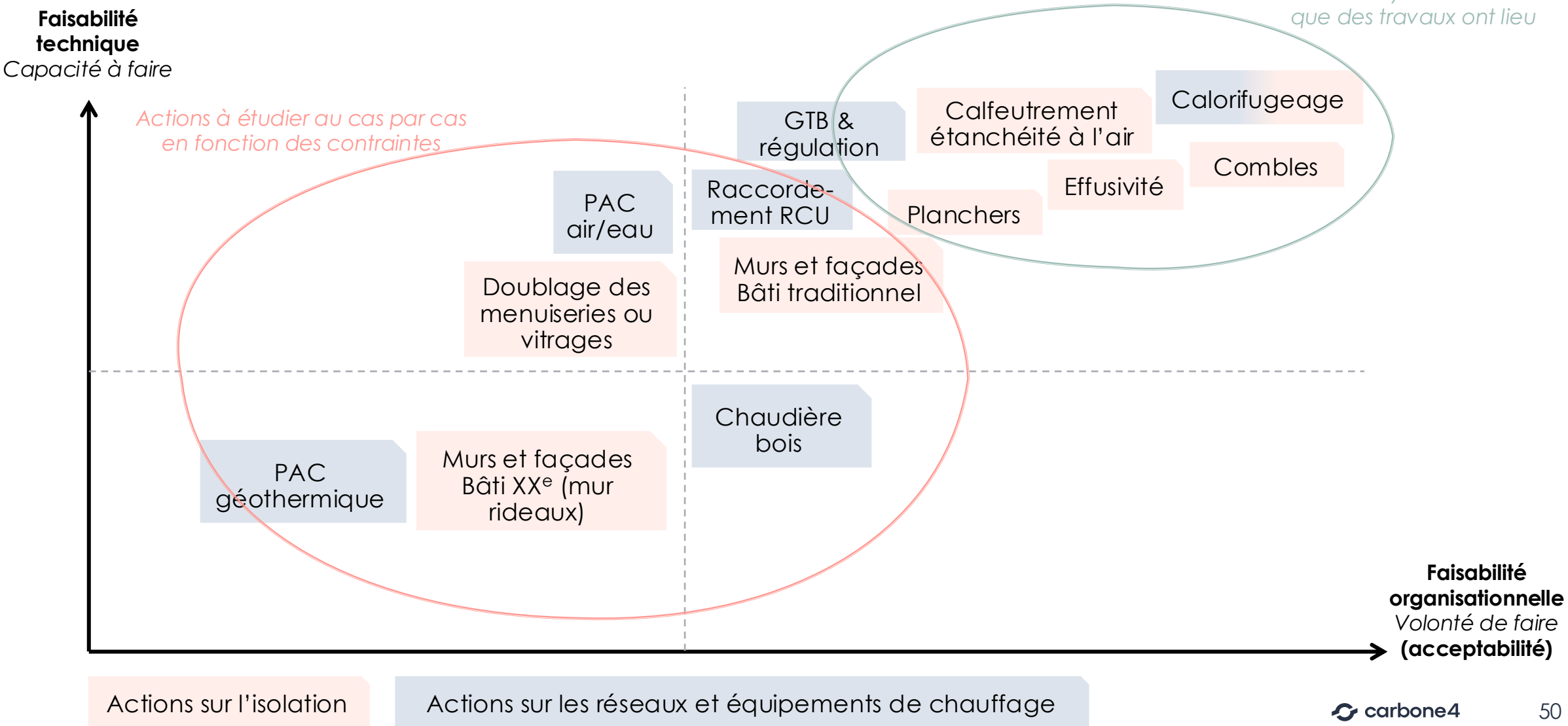
	Freins techniques	Freins économiques et organisationnels	Opportunités
GTB & Régulation	• Complexité pour trouver le bon réglage (inertie, volume, etc.) • Installation électrique existante vétuste	• Manque de professionnels formés et chargés de gérer la GTB et de suivre le comptage	• Facilité d'installation des thermostats et compteurs • Thermostats intelligents qui apprennent le comportement d'un bâtiment
PAC	• Manque d'espaces (copro. ville), et beaucoup de réseaux (air/air) • Acoustique des unités extérieures • Géothermie complexe	• Manque d'acceptabilité • Filière de pose, exploitation et maintenance encore à développer • Géothermie : études coûteuses	• Conservation des radiateurs (air/eau) • Utiliser les combles disponibles pour les équipements • Procurer du froid de manière maîtrisée
Bois	• Stockage du bois ou des granulés • Pb des conduits pas aux normes • Pollution aux particules fines • Compliqué en ville	• Disponibilité / conflit d'usage de la ressource en bois	• Facilité d'installation des inserts • Chaudière aux granulés permet de conserver et utiliser les radiateurs existants



Freins et opportunités des actions identifiées pour l'isolation de l'enveloppe

	Freins techniques	Freins économiques et organisationnels	Opportunités
Menuiseries extérieures	● Haute technicité des études et chantiers ● Compatibilité avec les dispositions patrimoniales	● Coût (technicité + survitrage) ● Programme: absence de vision globale ● Travaux partiels en site occupé	● Intégrer d'autres aspects aux travaux motivés par des questions de conservation : logique de travaux embarqués
Murs et façades	● Compatibilité avec les dispositions patrimoniales ▪ → Etudes et analyses au cas par cas ▪ Effusivité et inertie inhérente au bâti traditionnel → peu de besoin d'isolation des façades	● Programme: absence de vision globale ● Travaux partiels en site occupé	● Logique de travaux embarqués ● Affichage publicitaire (en zone très dense) pour réduire les coûts ● La valeur esthétique (façade visible) peut permettre d'obtenir plus facilement des prêts
Combles	● Si non aménagées (en zone rurale) : très peu de freins	● Si aménagées : pb avec l'activité ? ● Budget et vision segmentée des travaux et des espaces	● Logique de travaux embarqués ● Faible coût ● Facilité de mise en œuvre dans la majorité des cas.
Planchers	● Pour le bâti traditionnel : Pb de compatibilité constructive technique	● Budget et vision segmentée des travaux et des espaces	● Logique de travaux embarqués

Priorisation des actions en fonction de leur faisabilité technique et de leur acceptabilité





Actions ressortant prioritaires par typologie d'usage des MH



Résidentiel

Améliorer le confort (effusivité)

Calfeutrement étanchéité à l'air

Isolation/Doublage des combles

GTB

Remplacement des vecteurs énergétiques

Calorifugeage



Tertiaire

Remplacement des vecteurs énergétiques

GTB

Améliorer le confort (effusivité)

Isolation/Doublage des combles

Calfeutrement étanchéité à l'air

Calorifugeage



Culte

Améliorer le confort (effusivité → parquet, coussins, etc.)

Si chauffage : chauffer uniquement les corps

GTB

Points d'attention soulevés pendant l'atelier :

- Avant toute opération de travaux, chaque MH nécessite au cas par cas un **diagnostic** pour identifier un plan pluriannuel adapté aux spécificités du bâti. La **sensibilisation des occupants** est également un préalable à tout travaux.
- Pour avoir une meilleure finesse, au-delà de la répartition résidentiel/tertiaire/culte, il serait pertinent de répliquer la réflexion pour chaque typologie représentative, en **fonction des modes constructifs** (notamment différencier ceux traditionnels vs. ceux du XX^e siècle) et des types d'usage (ex: bureaux, musées, école, etc. notamment pour le tertiaire).



Paris | Lyon | Toulouse | Rennes | Luxembourg

www.carbone4.com