



High Council
of Finance



Health
Food Chain Safety
Environment

Comité d'étude sur les investissements publics & SPF Santé publique, DG Environnement

*Scénarios d'émissions « zéro net »
en Belgique : analyse comparative
des investissements additionnels*

Mars
2025

Membres du Comité d'étude sur les investissements publics

M. B. Regout, président, désigné par le Bureau fédéral du Plan ;

Mme G. Gentil, désignée par le Bureau fédéral du Plan ;

Mme M. Druant, désignée par la Banque nationale de Belgique ;

Mme F. Lepoivre, désignée par le ministre de l'Économie ;

M. K. Devoldere, désigné par le ministre des Finances ;

M. V. Van Steenberghe, désigné par la ministre du Climat ;

M. T. Hermans, désigné par la secrétaire d'État au Budget.

Secrétariat du Comité d'étude sur les investissements publics :

Mme P. de Radiguès, M. B. de Hemptinne et M. M. Van der Beeuren.

Experte du SPF Santé, DG Environnement :

Mme E. Taylor.

Dépôt légal : D/2025/11.691/4

Résumé exécutif

En tant que membre de l'Union européenne, la contribution de la Belgique à la transition de l'UE vers la neutralité climatique d'ici 2050 nécessite des changements significatifs en termes de niveau et de nature des investissements. L'évaluation des investissements nécessaires à la décarbonation de l'économie est cruciale pour comprendre l'impact macroéconomique de la transition climatique en Belgique et pour éclairer le débat sociétal et politique.

Une approche basée sur des scénarios

Ce rapport compare une série de scénarios de neutralité climatique publiés ces dernières années par des auteurs publics et privés au niveau belge. Ces scénarios ont été élaborés dans leurs contextes technologiques et réglementaires spécifiques. Comme ce contexte est en constante évolution, comme par exemple suite à l'accord de gouvernement fédéral 2025, d'autres scénarios pourraient être proposés à l'avenir par différents auteurs et pourraient utilement être ajoutés à une mise à jour de cette étude.

Ces différents scénarios présentent différentes options pour la transition. Ces options reflètent des choix stratégiques importants qui doivent encore être opérés par les décideurs politiques. L'étude identifie les principales orientations possibles et évalue leurs besoins d'investissement relatifs ainsi que leurs implications en termes de coûts/économies récurrents.

Les scénarios ont en commun, tous secteurs confondus, de recourir à de nombreux leviers d'efficacité énergétique (isolation des bâtiments et installation de pompes à chaleur) et à l'énergie non fossile notamment par l'électrification (véhicules, pompes à chaleur, sources d'énergie renouvelables et renforcement des réseaux électriques). Toutefois, ces scénarios se distinguent très nettement en fonction du recours plus ou moins important à la modération de la croissance, voire la baisse de certains volumes d'activité, tels que les nouvelles constructions ou encore les kilomètres parcourus en voiture personnelle (par exemple, l'utilisation accrue du co-voiturage ou des transports en commun), ou au transfert de certaines activités (transfert modal par exemple).

Quatre grandes conclusions se dégagent de l'analyse et de la comparaison des scénarios

En premier lieu, on observe que des niveaux d'investissement potentiellement très importants devront être mobilisés d'ici 2050. En effet, les scénarios de décarbonation étudiés conduisent à un niveau d'investissement (CAPEX) total moyen sur la période égal ou le plus souvent supérieur à celui observé en 2024¹. Les niveaux d'investissement peuvent s'élever jusqu'à un montant de l'ordre de 25 milliards d'euros supplémentaires par an en moyenne par rapport à 2024.

En deuxième lieu, les niveaux d'investissement dans les différents scénarios divergent sensiblement. Cette différence du niveau d'investissement entre les scénarios s'explique principalement par le degré d'utilisation des leviers de sobriété (traduction de l'anglais « sufficiency »). En effet, la réduction de volume d'une série d'activités (dont la réduction du nombre de véhicules privés et la baisse du nombre

¹ Le niveau d'investissement de l'année 2024 est estimé selon les mêmes méthodologies de calcul que décrites en Annexes et n'est donc pas basé sur des chiffres réels d'investissement en 2024 puisque ceux-ci ne sont pas disponibles dans le niveau de granularité nécessaire à cet exercice.

de mètres carrés construits) conduit à limiter, potentiellement très significativement, le niveau total des investissements correspondant à ces scénarios.

Les dépenses additionnelles en investissement entre 2025 et 2050, par rapport à l'année 2024, se présentent comme suit. Le haut de la fourchette correspond à des investissements supplémentaires de 25 milliards d'euros (4,3% du PIB) en moyenne annuelle, et lorsque les investissements non liés aux technologies de décarbonation dans le bâtiment sont inclus, ce montant repasse à 17 milliards d'euros (2,9% du PIB). Le bas de la fourchette correspond aux scénarios recourant le plus aux leviers de sobriété et est caractérisée par une augmentation de 11 milliards d'euros (1,9% du PIB) en moyenne annuelle, ramenée à pratiquement zéro par la diminution des investissements non liés aux technologies de décarbonation dans le bâtiment.

En troisième lieu, la composition des investissements change au niveau des secteurs.

- Dans le secteur de la production d'énergie, tous les scénarios de décarbonation étudiés envisagent une hausse drastique des besoins en investissements. Cette hausse est liée à l'augmentation de la demande en électricité, au changement du mix énergétique en faveur de sources décarbonées et au développement nécessaire des réseaux et de la gestion de l'intermittence. Elle constitue une augmentation comprise entre 3 et 8 milliards en moyenne annuelle par rapport à la situation de 2024 (une augmentation d'un facteur 3 à 7).
- Au niveau du secteur des transports, plusieurs effets sont à l'œuvre. D'une part, l'achat de véhicules décarbonés a tendance à augmenter les coûts d'investissement liés au remplacement des véhicules. D'autre part, selon les scénarios, une partie de cette mobilité est transférée vers les moyens de transport collectifs (rail ou bus principalement). Ces derniers nécessitent des dépenses en investissements additionnels conséquents mais qui s'avèrent toutefois moindres que la baisse qu'ils engendrent en termes d'investissement dans des véhicules individuels. Enfin, dans certains scénarios, la demande de mobilité individuelle est réduite ou transférée vers des modes doux, ce qui a pour effet de réduire directement les dépenses d'investissement. Au final, les scénarios qui ont peu ou pas recours au transfert modal et à la réduction de la mobilité conduisent à des dépenses d'investissement jusqu'à 71% supérieures au niveau de 2024. Les scénarios qui s'appuient fortement sur les leviers de transfert et de réduction de la demande de mobilité conduisent quant à eux, dans ce secteur, à une diminution de 6% des dépenses d'investissement par rapport à 2024.
- Au niveau du secteur des bâtiments, on observe un glissement, voire un basculement, des dépenses d'investissement des nouveaux bâtiments hors technologies de décarbonation (cf. parties hachurées des figures 1 et 2) vers les dépenses d'investissement de décarbonation des nouveaux bâtiments et, surtout, des bâtiments existants, en ce y compris la démolition-reconstruction. Ces dépenses en rénovation des bâtiments existants et de décarbonation des nouveaux bâtiments augmentent considérablement dans tous les scénarios. Elles augmentent d'un niveau compris entre 7 milliards d'euros et 10 milliards d'euros².

² En excluant des scénarios supposant un niveau particulièrement élevé de démolition et de reconstruction, hypothèse qui est actuellement révisée par les auteurs de ces scénarios.

Pour rappel, le secteur industriel n'a pas pu être modélisé en détail, et nous renvoyons à des études spécifiques sur ce sujet (voir la section industrie), qui estiment les besoins d'investissement supplémentaires pour décarboner l'industrie belge d'ici 2050 dans une fourchette allant de **10 à 40 milliards** d'euros (entre 0,4 et 1,6 milliard d'euros par an). Cette fourchette doit être ajoutée aux résultats présentés ci-dessus afin d'obtenir une image plus complète des investissements supplémentaires totaux.

Il est à noter que les niveaux d'investissement supplémentaires issus de ces études semblent relativement faibles par rapport aux dépenses d'investissement supplémentaires dans les autres secteurs. Toutefois, cela ne signifie pas que ces montants ne sont pas significatifs au niveau d'une industrie ou d'une entreprise spécifique.

En quatrième lieu, tous les scénarios de décarbonation augmentent les dépenses d'investissement mais diminuent les coûts opérationnels par rapport à un scénario de référence à politique constante. Par rapport à la situation historique, seuls deux scénarios contiennent plutôt que diminuent les coûts opérationnels.

Cela s'explique par la combinaison de deux facteurs.

- D'abord, de nombreux leviers de décarbonation consistent à réaliser des investissements permettant de réduire la demande d'énergie. Il s'agit par exemple de l'isolation des bâtiments ou encore du transfert modal ou de l'efficacité énergétique permise par l'électrification de véhicules.
- De plus, du côté de l'offre, l'électrification accrue s'appuie sur un recours massif aux énergies renouvelables qui sont plus intensives en capital que leurs alternatives carbonées. Les scénarios de décarbonation conduisent donc à une baisse drastique des coûts opérationnels (OPEX) liés à l'usage des énergies carbonées. Même si le prix de l'électricité et, en particulier, celui des carburants synthétiques pourraient s'avérer plus élevés que celui des combustibles carbonés, leur coût total est généralement moindre que celui de ces derniers en raison des volumes réduits.

Implications pour les politiques publiques et travaux futurs

Les scénarios analysés reposent chacun sur un ensemble de leviers de décarbonation. Le choix d'un scénario plutôt qu'un autre est une décision sociétale/politique qui doit prendre en compte de nombreux facteurs qui ne sont pas examinés dans ce rapport.

Les scénarios étudiés ne précisent pas les politiques publiques à mettre en œuvre pour activer les leviers sur lesquels ils reposent. Néanmoins, on peut s'attendre à ce que l'intervention publique soit essentielle pour activer les leviers et mobiliser les investissements identifiés dans cette étude.

Ce rapport représente la première phase d'un travail visant à identifier les besoins d'investissement. Une deuxième phase pourrait consister à analyser ces différents types d'intervention publique sous l'angle de l'investissement public.

Table des matières

1. Introduction.....	1
2. Revue de la littérature	3
3. Question de recherche et méthodologie	6
4. Les scénarios de neutralité climatique et les leviers qu'ils activent	12
5. Principaux résultats par secteur	17
5.1. Secteur du bâtiment	17
5.1.1. Approches « zéro net » pour les bâtiments	17
5.1.2. CAPEX et OPEX de la décarbonation des bâtiments	18
5.1.3. Coûts de la consommation d'énergie dans les bâtiments : analyse de sensibilité	22
5.2. Secteur des transports	22
5.2.1. Approches « zéro net » pour les transports	23
5.2.2. CAPEX et OPEX de la décarbonation des transports	25
5.2.3. Coûts de la consommation d'énergie dans les transports : analyse de sensibilité	29
5.3. Secteur de l'énergie	30
5.3.1. Approches « zéro net » pour le système d'approvisionnement en électricité	30
5.3.2. CAPEX et OPEX de la décarbonation du système d'approvisionnement en électricité	33
5.3.3. Nouveaux réseaux d'énergie	35
5.4. Secteur industriel	36
6. Agrégation des résultats	39
6.1. Introduction	39
6.2. Scénarios et dépenses d'investissements : comparaison de leurs niveaux et compositions	40
6.2.1. Approches « zéro net » à travers les secteurs	40
6.2.2. Dépenses d'investissement (CAPEX)	41
6.2.3. Les dépenses opérationnelles (OPEX)	45
7. Investissement public et politiques publiques : pistes pour des travaux futurs	47
Bibliographie	49

Liste des graphiques

Graphique 1	Projections des émissions de GES pour la Belgique	7
Figure 2	Émissions de GES de la Belgique en 2022	8
Graphique 3	Le modèle calcule l'investissement « additionnel » entre un scénario de référence et un scénario de transition	10
Figure 4	Les CAPEX et OPEX sont modélisés à partir des activités des scénarios.....	10
Figure 5	Champ d'application sectoriel des scénarios de transition	12
Figure 6	Leviers activés par les scénarios	16
Figure 7	3 approches « zéro net » dans le secteur du bâtiment	18
Graphique 8	Investissements, maintenance et dépenses énergétiques dans le secteur des bâtiments	19
Graphique 9	Coûts de la consommation d'énergie en 2050 dans le secteur du bâtiment, avec différentes hypothèses de prix de l'électricité (en milliards d'euros)	22
Figure 10	2 et 3 approches de « zéro net » dans les secteurs du transport de passagers et de marchandises, respectivement.....	24
Graphique 11	Investissements, maintenance et dépenses énergétiques dans le secteur des transports	25
Graphique 12	Ventilation des véhicules électriques et à moteur à combustion interne - CAPEX cumulés 2025-2050 (en milliards d'euros)	28
Graphique 13	Investissements dans les infrastructures - CAPEX cumulés 2025-2050 (en milliards d'euros)...	29
Graphique 14	Coûts de la consommation d'énergie en 2050 dans le secteur des transports, avec différentes hypothèses de prix de l'électricité (en milliards d'euros)	30
Graphique 15	Approvisionnement en électricité par source en 2050 par scénario (en TWh)	31
Figure 16	4 approches « zéro net » dans le secteur de l'énergie	32
Graphique 17	Investissements, maintenance et dépenses énergétiques dans le secteur de l'approvisionnement énergétique	33
Graphique 18	Besoins d'investissement dans le réseau et la flexibilité (moyenne annuelle de 2025 à 2050, en milliards d'euros)	35
Graphique 19	CAPEX dans les nouveaux réseaux d'énergie (cumulés de 2025 à 2050, en milliards d'euros) ..	36
Graphique 20	Dépenses d'investissement supplémentaires cumulées pour le secteur industriel jusqu'en 2050 (en milliards d'euros).....	38
Figure 21	Illustration de regroupements de scénarios en fonction de la prégnance de leviers de sobriété.....	41
Graphique 22	Dépenses d'investissement par scénario sur l'ensemble de la période considérée (2025-2050) par rapport à 2024, (en milliards d'euros).....	42
Graphique 23	Dépenses d'investissement par scénario sur l'ensemble de la période considérée (2025-2050) par rapport au scénario à politique inchangée (WEM), (en milliards d'euros)	43
Graphique 24	Dépenses opérationnelles par scénario en 2050, (en milliards d'euros)	45

1. Introduction

En tant que membre de l'Union européenne, la contribution de la Belgique à la transition de l'UE vers la neutralité climatique d'ici 2050 nécessite des changements significatifs en termes de niveau et de nature des investissements. L'évaluation des investissements nécessaires à la décarbonation de l'économie est cruciale pour comprendre l'impact macroéconomique de la transition climatique en Belgique et pour éclairer le débat sociétal et politique.

Le rôle de l'investissement public dans la transition climatique est essentiel et fait partie du mandat de recherche du Comité d'étude sur les investissements publics (CEIP) : « identifier les besoins et les opportunités d'investissement public, notamment dans le cadre de la double transition (écologique et numérique) »³. Afin de tirer parti de la meilleure expertise disponible au niveau fédéral, le CEIP a mené cette recherche conjointement avec la DG Environnement du SPF Santé publique.

Ce document répond à la question de recherche suivante : « Quels sont les besoins d'investissement additionnels pour atteindre l'objectif d'émissions nettes nulles à l'horizon 2050 en Belgique ? » La question complémentaire du « rôle des finances publiques dans ce domaine » nécessite une exploration supplémentaire.

En examinant cette question, notre objectif est non seulement de détailler le niveau des besoins d'investissement, mais également de mettre en évidence le poids relatif des secteurs dans lesquels des investissements sont nécessaires. Les dynamiques qui déterminent les besoins d'investissement dans chacun des secteurs sont également détaillées.

Le présent document se base sur une sélection des scénarios de transition vers la neutralité climatique disponibles publiés au cours de ces dernières années par des acteurs publics et privés en Belgique. De plus, l'analyse harmonise les hypothèses de coûts et certaines hypothèses technologiques pour tous les scénarios afin de pouvoir comparer leurs implications de manière neutre. Par conséquent, les niveaux d'investissements estimés dans cette analyse diffèrent de ceux qui sont présentés par les auteurs des travaux analysés.

Les différents scénarios présentent différentes options pour réaliser la transition. Ces options reflètent des choix stratégiques importants qui doivent encore être opérés par les décideurs politiques. Par exemple, une option possible pour le secteur du transport est une électrification massive du secteur, tandis qu'une autre option peut également inclure un transfert modal. L'étude identifie les principales orientations possibles et évalue leurs besoins d'investissement additionnels ainsi que leurs implications en termes de coûts/économies récurrents par rapport aux scénarios de référence pour ces secteurs qui sont responsables de 90% des émissions de GES en Belgique.

La deuxième section de cette étude est une revue de la littérature des principales études internationales et belges menées sur les besoins d'investissement pour l'atténuation du changement climatique et la transition vers une économie climatiquement neutre. La troisième section détaille la question de

³ Arrêté royal du 16 février 2023.

recherche et présente les principaux éléments de notre méthodologie. La quatrième section présente les scénarios sélectionnés et les principaux leviers de transition qu'ils activent (sobriété, efficacité et technologie). La cinquième partie présente et aborde les principaux résultats, en termes d'investissements sectoriels et d'estimations des dépenses opérationnelles. La section six présente l'agrégation des investissements totaux et ses implications. Le document propose, enfin, des pistes de réflexion pour des analyses ultérieures.

2. Revue de la littérature

Dans le cadre des efforts déployés actuellement pour parvenir à des émissions nettes nulles à l'horizon 2050, il est nécessaire d'examiner et de mieux comprendre la dimension financière et d'investissement de la transition climatique afin d'orienter les choix politiques en tenant compte des contraintes qui pèsent sur les finances publiques et privées. Si 2050 peut sembler un horizon lointain, il convient de s'intéresser dès maintenant à ces problèmes et aux choix politiques qui en découlent, étant donné que le cycle de vie des actifs concernés s'étend sur plusieurs décennies et que le changement des comportements demande du temps.

À ce jour, plusieurs études ont déjà été menées au niveau international et national sur les besoins d'investissement supplémentaires pour l'atténuation du changement climatique dans l'économie. Ces études montrent généralement un besoin d'investissements s'élevant à quelque 2 à 3% du PIB mondial en moyenne jusqu'en 2050 (voir ci-dessous).

Une grande partie de la littérature va dans le même sens, mentionnant un écart d'investissement substantiel entre le financement de la transition climatique actuel et ce qui est nécessaire pour parvenir à une économie climatiquement neutre d'ici 2050. Diverses institutions ont mené des recherches sur des questions analogues, en s'appuyant sur un éventail de méthodologies différentes dans diverses régions géographiques et divers secteurs. Nous citons ici plusieurs de ces études, qui fournissent des indications précieuses pour notre travail. La littérature ne fournit généralement pas d'estimation des investissements supplémentaires annuels jusqu'en 2050.

L'AIE (2021) et IRENA (2021) ont estimé les besoins d'investissement totaux d'ici 2030 à quelque 4,8 et 5 billions de dollars américains par an pour atteindre la neutralité climatique à l'échelle mondiale. De la même manière, BNEF (2022) a calculé un déficit d'investissement total de 4,5 billions de dollars américains par an. Il est toutefois important de souligner que ces estimations fournissent uniquement une vision à l'horizon 2030. La littérature ne fournit généralement pas d'estimation du besoin d'investissement supplémentaire annuel jusqu'en 2050. Néanmoins, on peut affirmer que les chiffres projetés jusqu'en 2030 sont environ trois fois plus élevés que l'investissement total observé en 2023, qui oscillait entre 1,8 et 2 billions de dollars américains, selon l'AIE et IRENA.

Des études ont également été menées au niveau européen. L'Institut Rousseau (2024) et I4CE, l'Institute for Climate Economics (2024), ont suggéré que respectivement 360 et 406 milliards d'euros supplémentaires seraient annuellement nécessaires pour atteindre l'objectif d'émissions nettes nulles à l'horizon 2050 dans l'UE. Cela implique un besoin s'élevant à quelque 2 à 3% du PIB actuel de l'UE-27. Par ailleurs, l'Institut Rousseau souligne que les secteurs des transports et du bâtiment (respectivement 45% et 29%) devraient représenter la plus grosse part dans les besoins d'investissement totaux cumulés jusqu'en 2050, soit 1 520 milliards d'euros. Néanmoins, seuls 360 milliards d'euros de ce montant sont considérés comme des investissements supplémentaires par rapport à un scénario « business as usual ». La plupart des besoins d'investissement supplémentaires se situent dans les secteurs du bâtiment et de l'énergie (39% et 22% respectivement).

Début 2025, la BCE⁴ a publié une analyse approfondie des besoins d'investissements supplémentaires d'ici 2030 pour décarboner l'UE. Cette analyse se base sur une revue de la littérature au niveau de l'UE et avance des chiffres de 2,9% à 4,0% du PIB de l'UE de besoins d'investissement supplémentaires par an par rapport aux niveaux d'investissements actuels. L'analyse souligne le degré élevé d'incertitude de ces estimations et insiste également sur le fait que les secteurs privé et public ont tous les deux un rôle à jouer pour canaliser ces financements.

De plus, le rapport phare de Mario Draghi sur l'avenir de la compétitivité européenne (2024) estime que l'UE devra augmenter ses investissements de 5 points de pourcentage de son PIB actuel pour améliorer sa compétitivité. Il ne s'agit pas uniquement des investissements visant à atteindre l'objectif « zéro net » d'ici à 2050. Il prévoit également un besoin d'investissement supplémentaire de 340 milliards d'euros entre 2025 et 2040 pour décarboner les quatre secteurs industriels à plus haute intensité carbone⁵ de l'UE.

Au niveau national, les données demeurent relativement hétérogènes, seul un nombre limité de sources ayant calculé les besoins d'investissements supplémentaires à l'échelle d'un pays. Ainsi, les études les plus notables ont été menées au Royaume-Uni (CCC, 2020) et en France (Pisani-Ferry & Mahfouz, 2023). Ces études ont mis en exergue des besoins d'investissements supplémentaires de 56 milliards et 85 milliards d'euros, respectivement, soit entre 2 et 3% du PIB.

En ce qui concerne la Belgique, nous pouvons citer sept publications qui traitent de ces questions :

- Une section du PNEC⁶ se concentre sur les investissements nécessaires pour mettre en œuvre les ambitions des pays et les estime, avec peu de détails, à 60 milliards d'euros cumulés jusqu'en 2030. Toutefois, le PNEC belge ne devrait pas permettre, dans sa forme actuelle, d'atteindre un niveau d'émissions nettes proche de zéro d'ici 2050.⁷
- McKinsey (2023) a calculé un besoin d'investissement supplémentaire annuel moyen équivalent à 2 à 3% du PIB.
- La Banque nationale de Belgique (2024) estime, sur base de calculs rapides « back-of-the-envelope », que les coûts d'abattement pour atteindre la neutralité climatique en Belgique s'élèvent à approximativement 17 milliards d'euros par an, soit environ 3,5% du PIB actuel du pays, et environ 2 à 3% du PIB estimé en 2050.
- EnergyVille (2022) a évalué les coûts d'investissement et les coûts récurrents (fonctionnement et maintenance) liés à la transition énergétique et climatique, sans toutefois partager le scénario de référence qui permettrait d'évaluer l'investissement *additionnel*.
- EPOC (2023), BFP (2022), Elia (2022), ont évalué les coûts du système énergétique dans un contexte de neutralité climatique dans un cadre plus étroit, à savoir les coûts du système électrique uniquement.

⁴ Mentionné dans la bibliographie au nom de ses auteurs Nerlich et al. (2025)

⁵ Produits chimiques, métaux, minéraux non métalliques et produits de la pâte à papier et du papier

⁶ Plan national énergie-climat

⁷ Bureau fédéral du Plan (2024), Perspectives énergétiques en Belgique avec les politiques annoncées

Les études existantes utilisent donc des horizons temporels, des périmètres sectoriels et des points de référence différents, ce qui rend la comparaison difficile.

Cette analyse vise à comparer les investissements additionnels des différents scénarios et suit donc une approche holistique et commune en termes de secteurs inclus, d'objectif climatique (net-zéro d'ici 2050), et de niveau de détail des estimations dans chaque secteur afin d'examiner les impacts des différents scénarios (investissements/dépenses en capital et dépenses récurrentes/opérationnelles).

3. Question de recherche et méthodologie

Le mandat du CEIP fait référence à la transition écologique, que nous entendons comme un terme englobant les diverses questions environnementales et socio-économiques. Le Stockholm Resilience Centre, par exemple, définit pas moins de 9 frontières planétaires à prendre en compte pour une transition écologique, parmi lesquelles le changement climatique dû aux émissions de GES, la perte de biodiversité et le changement d'affectation des sols, l'acidification des océans, l'utilisation et l'accès à l'eau douce, etc.

En matière de changement climatique, trois catégories d'actions sont généralement identifiées : l'atténuation,⁸ l'adaptation⁹ et la réparation des pertes et dommages¹⁰. Ce travail se concentre sur l'atténuation, c'est-à-dire sur toutes les actions permettant d'atteindre l'objectif de zéro émission nette de GES d'ici 2050 pour l'économie belge. Il convient toutefois de noter que les approches en matière d'atténuation peuvent avoir des répercussions sur les efforts d'adaptation et/ou sur d'autres frontières planétaires (et vice-versa).

L'objectif principal de ce rapport est de fournir, pour les principales options possibles permettant d'atteindre l'objectif de neutralité climatique, des estimations « d'ordre de grandeur » des investissements et de dépenses/économies récurrentes, afin d'informer les décideurs des secteurs public et privé en Belgique.

Ces dépenses et économies potentielles sont estimés pour chaque secteur d'émission clé pour atteindre la neutralité climatique en Belgique d'ici 2050, et pour différents scénarios de transition publiés par des acteurs publics et privés au cours des dernières années (voir ci-dessous). L'analyse harmonise les hypothèses de coûts (et en partie les hypothèses technologiques) de ces différents scénarios afin de pouvoir comparer leurs implications en termes d'investissements.

Dans cette section, nous affinons notre question de recherche et notre variable d'intérêt (besoins d'investissements supplémentaires), nous détaillons les secteurs économiques couverts par l'analyse et nous expliquons notre approche de modélisation par scénario.

Question de recherche

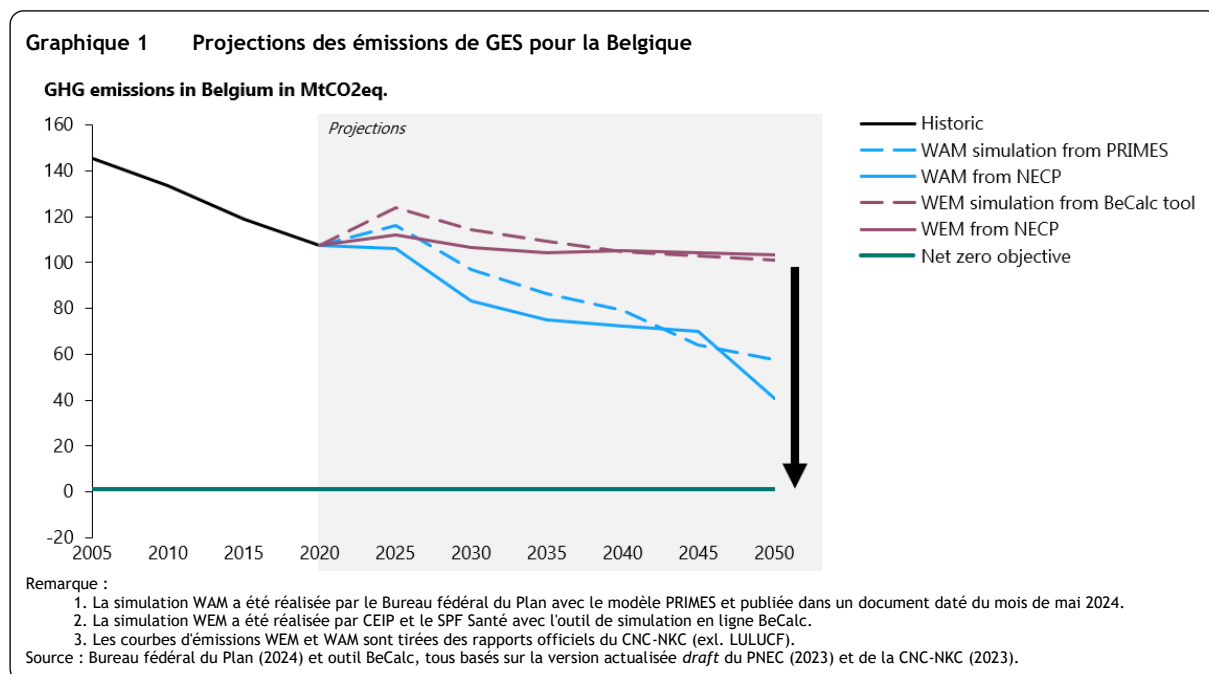
Le plan national belge pour l'énergie et le climat (PNEC), le plan officiel de la Belgique en matière de changement climatique, fournit une projection des émissions dans une situation « avec mesures existantes » (*With Existing Measures* - WEM) et dans une situation « avec mesures supplémentaires » (*With Additional Measures* - WAM). Le graphique 1 illustre les trajectoires d'émissions estimées pour les projections WEM et WAM jusqu'en 2050. Ces trajectoires d'émissions démontrent que la Belgique n'est pas encore sur la bonne voie pour atteindre la neutralité climatique d'ici 2050.

⁸ les actions visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre

⁹ les actions relatives à l'adaptation aux effets du changement climatique

¹⁰ les actions liées à la réparation des dommages causés par les risques induits par le changement climatique

Dès lors, le présent document répond à la question de recherche suivante : « Quels sont les besoins d'investissement supplémentaires pour atteindre l'objectif de neutralité climatique à l'horizon 2050 en Belgique ? » Afin de discuter des investissements *supplémentaires*, il convient de fixer un point de référence auquel se comparer (voir ci-dessous).



Variables d'intérêt

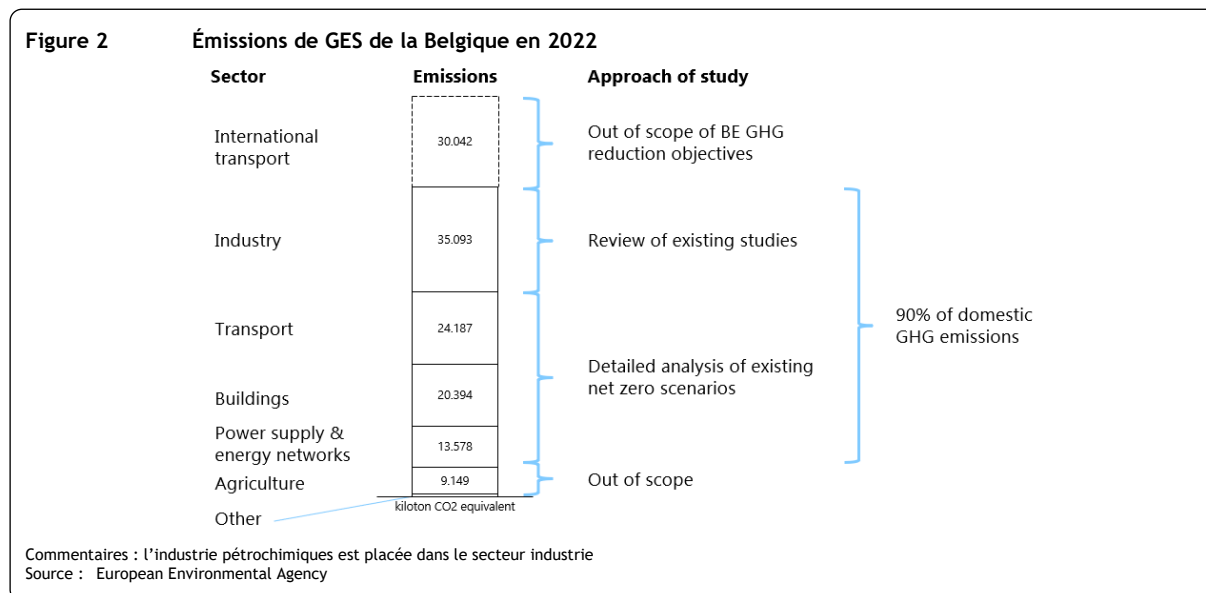
Cette analyse se concentre sur les dépenses en capital (CAPEX) pour les investissements physiques et les dépenses opérationnelles (OPEX) qui y sont liées. Les investissements s'étendent parfois au-delà de la catégorie comptable de formation brute de capital fixe pour inclure des biens de consommation tels que les véhicules particuliers. Les OPEX peuvent être fixes ou variables et se rapportent à l'exploitation et à la maintenance ou à l'utilisation de vecteurs énergétiques. Tous les prix sont exprimés en euros de 2024 et toutes taxes comprises (accises, TVA, ETS 1¹¹). Les CAPEX n'incluent pas d'hypothèses de coût du capital.¹²

Les investissements non physiques (tels que la R&D, les investissements dans les ressources humaines, le développement de programmes de formation, etc.) ne sont pas inclus. Les investissements pour l'adaptation ou les pertes et dommages ne sont pas non plus inclus en tant que tels, mais certains des investissements d'atténuation, tels que l'isolation thermique des bâtiments, peuvent avoir des externalités positives sur les efforts d'adaptation.

¹¹ 'Emissions Trading System 1' ou Système d'échange de quotas d'émission 1, mécanisme européen de tarification du carbone pour les secteurs de l'énergie et de l'industrie fortement émettrice.

¹² Le CMPC est maintenu à 0

L'analyse couvre quatre grands secteurs d'émission de GES : l'approvisionnement en électricité et les réseaux énergétiques, les bâtiments, les transports et l'industrie.¹³ Comme l'illustre la figure 2, ces secteurs sont responsables de 90% des émissions nationales belges de GES en 2022.¹⁴ Les secteurs du transport maritime et aérien international, de l'agriculture, du traitement des déchets et de l'UTCF¹⁵ ne sont pas couverts.



Pour les secteurs de l'approvisionnement en électricité et des réseaux énergétiques, des bâtiments et des transports, nous avons construit un modèle technico-économique « bottom-up » détaillé, qui calcule les besoins d'investissement par secteur pour les différents scénarios. Pour le secteur industriel, nous fournissons une fourchette entre un besoin d'investissement minimum et maximum sur la base d'estimations issues de la littérature existante.

Dans la modélisation, nous avons identifié 14 sous-secteurs dans les secteurs de l'énergie, des bâtiments et des transports, qui ont été considérés comme des sous-secteurs clés pour réaliser la transition (par exemple : les voitures particulières, les chemins de fer, la rénovation des bâtiments, les réseaux électriques, les réseaux d'hydrogène, etc., voir la liste complète dans la figure 5).¹⁶

¹³ Nous considérons que l'industrie pétrochimique fait partie du secteur industriel car les scénarios de transition prévoient un avenir sans combustibles fossiles comme vecteur d'énergie.

¹⁴ Les chiffres proviennent de l'Agence européenne pour l'environnement.

¹⁵ Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie.

¹⁶ Dans le secteur des transports, les laissés-pour-compte notables sont le métro et les tramways, pour lesquels aucun développement clair n'est envisagé dans les scénarios, pas plus que les motos ou les actifs de mobilité active tels que les vélos. Dans le secteur de l'énergie, les actifs de conversion pour la production de biomasse, d'e-carburants et le stockage de ces gaz et liquides n'ont pas été estimés. Pour les bâtiments, des éléments tels que le renforcement structurel des bâtiments lorsque des rénovations profondes sont nécessaires, ou l'utilisation d'appareils électriques plus efficaces, ne sont pas inclus. Voir la liste complète des éléments inclus et exclus dans le modèle aux annexes 5, 6 et 7.

Choix du scénario de référence

Comme mentionné dans les sections précédentes, l'objectif de cette étude est d'évaluer les besoins d'investissement supplémentaires pour un ensemble de scénarios de neutralité climatique au niveau belge. Il est donc nécessaire de définir une référence à laquelle les scénarios seront comparés afin de déterminer la part des investissements qui est supplémentaire. Cette référence doit nécessairement avoir le même périmètre (secteurs, durée, niveau de granularité) que les scénarios « zéro net ».

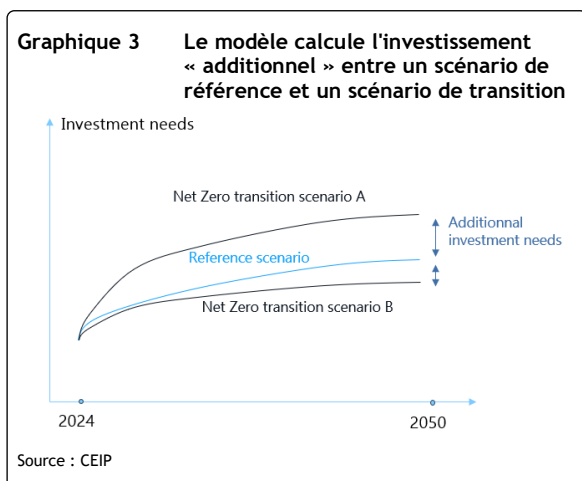
Il est important de noter que la définition d'un scénario de référence a un impact significatif sur les résultats finaux et sur la manière de les interpréter. En effet, le choix de la référence définit ce qui est considéré comme le niveau d'investissement de base et ce qui est considéré comme un « investissement supplémentaire », ce qui est toujours discutable. Différents choix de référence sont donc possibles, et nous avons décidé d'en sélectionner deux.

Tout d'abord, nous avons reconstruit un scénario « avec mesures existantes » (WEM) basé sur le Plan National Énergie et Climat belge (PNEC) à l'aide de l'outil « 2050 Pathways Explorer » mis à disposition en ligne par le SPF Santé publique.¹⁷ Ce scénario n'atteint pas zéro émission nette d'ici 2050, mais il inclut déjà certains investissements nécessaires pour l'atténuation des GES, principalement en termes de capacité de production d'électricité renouvelable. Il est également important de noter que l'hypothèse de nouvelle construction de bâtiments de ce scénario est relativement élevée, ce qui impacte les résultats finaux.

Un autre scénario de référence se base sur les niveaux d'investissement de 2024. Ce scénario suppose que les niveaux d'investissement restent constants par rapport à 2024, et ce pendant toute la période 2025-2050. Le niveau d'investissement de l'année 2024 est estimé selon les mêmes méthodologies de calcul que décrites en Annexes, et n'est donc pas basé sur des chiffres réels d'investissement en 2024 puisque ceux-ci ne sont pas disponibles dans le niveau de granularité nécessaire à cet exercice.

Les besoins d'investissement supplémentaires de la Belgique sont définis et calculés comme la différence entre les besoins d'investissement dans les scénarios de transition et ceux du scénario de référence (voir graphique 3), cumulés sur la période allant de 2025 jusqu'en 2050 inclus. Les besoins d'investissement supplémentaires annuels moyens sont les besoins supplémentaires cumulés divisés par 25 ans. Dans chaque graphique, la ou les références utilisées sont explicitement mentionnées.

¹⁷ La simulation à l'aide de l'outil a été réalisée pour reproduire autant que possible les mesures politiques du PNEC afin de pouvoir modéliser les besoins d'investissement dans le scénario WEM basé sur un ensemble d'activités de la même manière que les autres scénarios. Le WEM simulé est cohérent avec les courbes WEM officielles du PNEC pour les quatre secteurs analysés dans ce travail.

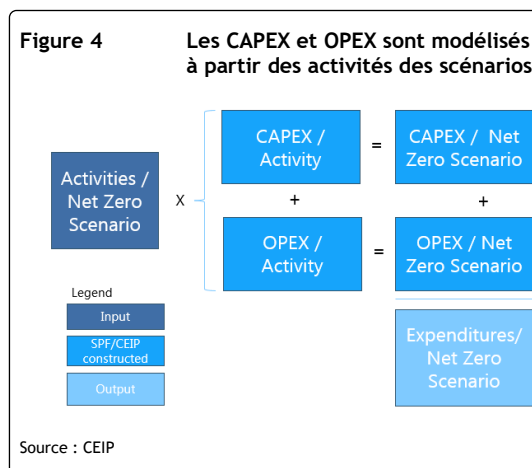


Approche de la modélisation et logique de calcul

Nous utilisons une approche « bottom-up », en partant de scénarios de neutralité climatique existants pour la Belgique.¹⁸ Les scénarios « zéro net » sélectionnés sont décrits dans la section suivante. Les données d'activité disponibles¹⁹ sont collectées pour tous les scénarios et complétées par des hypothèses propres si nécessaire (pour plus de détails sur la méthodologie, voir les annexes 5, 6 et 7). Des hypothèses harmonisées de coûts unitaires sont ensuite appliquées à chaque donnée d'activité afin d'obtenir les dépenses totales de chaque scénario en termes

de dépenses d'investissement (« CAPEX ») et de dépenses récurrentes (« OPEX »).

En d'autres termes, les combinaisons d'activités sont des données d'entrée de notre modèle dérivées directement des différents scénarios, tandis que les facteurs de coûts sont nos propres estimations. L'harmonisation des coûts unitaires est nécessaire pour une comparaison cohérente des implications des scénarios de transition. Par conséquent, les estimations d'investissement peuvent différer des estimations avancées dans les études par les auteurs des scénarios, le cas échéant (voir revue de la littérature).



Lorsque c'est nécessaire pour le calcul des besoins d'investissements et des OPEX, nous utilisons également certaines hypothèses technologiques communes pour tous les scénarios (par exemple, les taux d'efficacité, la durée de vie des actifs, etc.) La liste complète figure à l'annexe 4.

Hypothèses de coûts et prix unitaires

Les hypothèses de coûts comprennent des hypothèses sur trois types de coûts unitaires : les coûts d'investissement (CAPEX), les coûts d'exploitation et de maintenance et les coûts énergétiques (OPEX). Ces coûts unitaires de CAPEX et OPEX sont issus de la littérature et comprennent des hypothèses sur l'évolution des prix jusqu'en 2050 (pour la liste complète des hypothèses de coûts, voir l'annexe 3). L'OPEX lié à la consommation d'énergie, en particulier, dépend principalement de l'évolution des prix des vecteurs énergétiques, pour lesquels nous envisageons deux scénarios (prix dans un scénario de

¹⁸ Nous ne recourons pas à la méthode souvent utilisée des « courbes de coûts d'abattement », qui ne nous permet pas de disposer d'une modélisation détaillée par secteur, sous-secteur et type d'actif. Les courbes d'abattement classent les activités ou les technologies en fonction de leur intensité en GES et de leur coût. Cela permet de classer les activités ou les technologies en fonction de leur rapport coût-efficacité en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

¹⁹ Par données d'activité, nous entendons les données qui décrivent le niveau d'activité des scénarios, telles que : les passagers-kilomètres par voiture ou train, le nombre de voitures, les tonnes-kilomètres par camion, bateau ou train pour le fret, la surface bâtie totale, le taux de rénovation des bâtiments, la capacité totale de production d'électricité solaire ou éolienne installée, etc.

référence et prix dans des scénarios de transition)²⁰. Nous menons des analyses de sensibilité sur des prix d'énergie plus élevés dans les secteurs du bâtiment et du transport pour tester la robustesse de nos messages, étant donné que les projections des prix de l'énergie sont confrontées à une incertitude substantielle.²¹

²⁰ Dans ces scénarios de référence et de transition, on suppose que la Belgique et le reste de l'Europe se trouvent systématiquement dans un scénario WEM ou dans un scénario de transition, étant donné que la voie suivie par d'autres pays influence les niveaux de prix des vecteurs énergétiques en Belgique.

²¹ Ainsi, les prix de l'énergie sont considérés comme exogènes au modèle. À l'exception du scénario de référence, les prix des carburants ne sont pas influencés par la voie de transition spécifique des différents scénarios de transition.

4. Les scénarios de neutralité climatique et les leviers qu'ils activent

Comme décrit dans la section méthodologique, notre analyse est basée sur une sélection de scénarios de transition/neutralité climatique pour la Belgique. Ces scénarios sont ensuite comparés à un scénario de référence, qui ne prévoit aucun changement majeur des schémas d'investissements actuels, et qui ne mène pas à la neutralité climatique d'ici 2050. Les scénarios de transition, quant à eux, modélisent les changements nécessaires pour parvenir à zéro émission nette à l'horizon 2050.

Nous réalisons une méta-analyse qui passe en revue les différentes options de transition proposées par divers auteurs et disponibles pour la Belgique. Ces scénarios ont des périmètres différents et reposent sur des approches de modélisation différentes. La figure 5 illustre les secteurs et sous-secteurs pour lesquels chaque scénario fournit les données d'activité nécessaires à la réalisation de la méta-analyse.

Figure 5 Champ d'application sectoriel des scénarios de transition

		FPS (2021)					EnergyVille (2022)			TYNDP (2022)			BFP (2021)		Elia (2022)					
Sectors	Subsectors	Reference WEM	SPF CORE 95	SPF Behaviour	SPF Technology	SPF High Demand	Central	Electrification	Clean Molecules	EPOC (2023)	CLEVER (2023)	Distributed Energy	Global Ambition	McKinsey (2023)	Offshore Baseline	Ambitious Offshore Development	ePros	GI	LSaRES	
Energy	Electricity production																			
	Electricity grid																			
Buildings	H2 network (incl. electro.)																			
	Heat network																			
	CO2 network (incl. DACCS)																			
	New buildings																			
Transport	Renovatin buildings																			
	Buildings energy assets																			
	Passenger cars																			
	Busses																			
	Train																			
	Trucks and vans																			
	Inland barges																			
	Transport infrastructure																			
	Net zero scope		BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE	EU	EU	EU	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE

Available

Available but completed with hypotheses

Not available

Available

Available but completed with hypotheses

Not available

Commentaires : L'agriculture n'est comprise que dans le champ d'application « zéro net » des scénarios du SPF.
Source : CEIP sur la base des scénarios des auteurs

L'échantillon que nous avons recueilli se compose de 17 scénarios de transition provenant de 8 auteurs différents. Tous ces scénarios aboutissent à la neutralité climatique pour la Belgique d'ici 2050, à l'exception des scénarios Clever et TYNDP qui reposent sur des modèles européens et qui peuvent engendrer des émissions résiduelles dans un pays européen compensées par des émissions nettes négatives dans un autre pays européen. Lorsque les scénarios ne disposent pas de données suffisantes concernant les activités qu'ils proposent pour certains secteurs, ils ont été complétés par des hypothèses ou le sous-

secteur a été exclu de l'échantillon. De plus amples détails sur les hypothèses utilisées sont disponibles dans les annexes 5, 6 et 7. Les scénarios de transition retenus sont les suivants :

- SPF²² (2021). Le Service public fédéral Santé publique (Direction générale de l'environnement) a élaboré 4 scénarios « zéro net ». Le scénario « SPF Behaviour » met l'accent sur les changements comportementaux dans les domaines de la mobilité, du logement et des habitudes alimentaires, tandis que le scénario « SPF Technology » s'appuie davantage sur les développements technologiques. Un scénario « SPF CORE 95 » est défini sur la base d'une approche équilibrée entre ces deux dimensions. Un quatrième scénario, le scénario « SPF High Demand », vise à explorer les implications d'une trajectoire caractérisée par un niveau de demande énergétique nettement plus élevé que dans les autres scénarios et par des volumes de production industrielle constants en 2050 par rapport à 2015.
- EnergyVille (2022). Trois scénarios PATHS2050 sont élaborés à l'aide du modèle TIMES-BE, qui calcule la trajectoire la plus rentable qui permettrait de répondre à la demande d'énergie jusqu'en 2050. Les scénarios partent de l'hypothèse d'une production constante dans le secteur industriel et se concentrent principalement sur les technologies énergétiques et les solutions d'efficacité, tant du côté de l'offre que de la demande, sans tenir compte des changements significatifs dans le comportement des consommateurs ou des évolutions sociétales. Dans les trois scénarios, l'élimination progressive des combustibles fossiles, l'électrification et l'utilisation de molécules propres entraînent encore un reliquat de 2 millions de tonnes d'émissions de GES, compensé par d'autres mesures pour atteindre la neutralité nette.
- EPOC (2023). Différents auteurs de VITO-EnergyVille et de l'ICEDD ont utilisé l'expertise combinée de divers modèles de répartition de l'énergie, d'adéquation, de transport et de bâtiments pour construire ce scénario. Ce faisant, ils ont créé une version du modèle énergétique TIMES détaillée au niveau régional pour tenir compte des spécificités locales (un TIMES belge tri-régional). La décarbonation complète est principalement réalisée par une poussée significative de l'électrification, pour laquelle une partie de la demande est satisfaite par les importations.
- Le scénario CLEVER (Collaborative Low Energy Vision for the European Region) regroupe les visions nationales en une seule vision européenne. Il a été développé en 2023 par un consortium de scénaristes nationaux et européens issus du monde académique, de la recherche ou de la société civile. Pour ce faire, le scénario évalue et mobilise le potentiel de réduction de la demande d'énergie rendu possible par la sobriété et l'efficacité, ainsi que l'énergie pouvant être fournie par le développement des énergies renouvelables, tant au niveau national qu'européen.
- TYNDP (2022). Deux scénarios sont développés pour projeter la demande et l'offre d'énergie à long terme pour la rédaction des plans décennaux de développement du réseau (*Ten-Year Network Development Plan*- TYNDP) de l'ENTSO-G (European Network of Transmission System Operators for Gas) et de l'ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity) dans le contexte de la transition énergétique en cours. Le scénario « Distributed Energy » cible l'autonomie énergétique grâce aux sources d'énergie renouvelables. Le scénario

²² Service public fédéral

« Global Ambition » est basé sur un large éventail de technologies à faible teneur en carbone ainsi que sur l'utilisation d'un commerce mondial d'énergie décarbonée.

- McKinsey (2023). En juin 2023, McKinsey & Company a publié un rapport intitulé « Net zero or growth? How Belgium can have both ». Il s'agit de concevoir une voie permettant à la Belgique d'atteindre ses objectifs en matière de neutralité climatique. Dans ce rapport, l'outil Decarbonization Scenario Explorer de McKinsey a été utilisé pour modéliser l'évolution de plus de 50 secteurs d'activité économique avec des courbes de coûts de réduction des émissions de gaz à effet de serre associées à diverses solutions technologiques.
- BFP²³ (2021). Deux scénarios sont développés par le Bureau fédéral du Plan à l'aide du modèle de dispatch Artelys Crystal Super Grid. Les projections de la demande se fondent sur une publication antérieure du Bureau fédéral du Plan (Devogelaer, 2020), mais elles explorent des variations dans la stratégie d'approvisionnement en électricité. Le scénario « Offshore Baseline » prévoit l'installation d'un seul hub hybride offshore dans les eaux danoises, permettant tant la production d'énergie éolienne que l'interconnexion. Le scénario « Ambitious Offshore Development » comprend deux plateformes hybrides : une dans les eaux danoises et une autre dans les eaux territoriales néerlandaises.
- Elia (2022). Tous les quatre ans, Elia réalise une étude « Plan de développement fédéral » afin d'évaluer les besoins en matière de développement du réseau électrique. Pour ce faire, Elia élabore différents scénarios, qui sont ensuite traduits en un modèle de *load flow*. Le scénario E-Prosumer (ePros) s'appuie sur le scénario TYNDP « Distributed Energy », dans lequel la décarbonation est réalisée de manière autonome grâce à l'électrification, à l'efficacité énergétique, à la flexibilité et aux énergies renouvelables. Le scénario Global Import (GI) envisage un avenir avec des ambitions moindres en matière d'électrification et d'efficacité énergétique, compensées par un commerce de l'énergie décarbonée. Ce scénario s'aligne sur le scénario « Global Ambition » du TYNDP. Le scénario e-RES à grande échelle (LSeRES) combine des éléments des deux scénarios précédents. Il se caractérise par des niveaux d'électrification plus élevés que ceux du scénario IG, ainsi que par une pénétration importante des sources d'énergie renouvelables.

D'autres scénarios de transition ont été identifiés mais exclus de la méta-analyse pour diverses raisons.

- Blueprint d'Elia (septembre 2024). Dans cette étude, Elia considère de nouveaux scénarios de demande totale d'électricité pour la Belgique, basés sur les scénarios d'autres acteurs que nous avons également inclus dans notre méta-analyse. Il s'agit de Global Ambition et Distributed Energy du TYNDP (2024), de Shift d'EnergyVille et d'un scénario d'électrification. Les capacités de production liées à ces scénarios dans l'étude Blueprint ne sont toutefois pas claires. C'est pourquoi ces scénarios ne sont pas modélisés de manière exhaustive dans le présent document.
- EnergyVille Shift (2024). Le plus récent des scénarios d'EnergyVille, qui vise une plus grande sobriété que la publication initiale de PATHS2050, a été étudié en détail, mais a finalement été écarté de la sélection pour deux raisons. Tout d'abord, le scénario n'est pas assez précis pour

²³ Bureau fédéral du Plan

diverses données d'activité et nécessite un trop grand nombre d'hypothèses pour être intégré dans notre modèle. Deuxièmement, lorsque l'on modélise le scénario avec ses propres hypothèses, les résultats ne sont pas significativement différents des autres scénarios d'EnergyVille, ce qui ajoute peu de valeur à l'analyse.

- Scénarios du BFP²⁴ « Deep Electrification » and « Diversified Energy Supply » à l'horizon 2020. Ils ont été étudiés en profondeur et finalement laissés de côté pour deux raisons principales. Tout d'abord, ils ont été conçus comme des scénarios de « stress test » pour évaluer des situations de transition extrêmes, en partant d'hypothèses telles que « tout l'hydrogène utilisé dans l'économie est produit dans le pays ». Deuxièmement, les choix politiques qui ont été faits entre-temps les excluent. Par exemple, ils s'appuient sur des centrales électriques au gaz avec capture du carbone en 2050, ce qui ne fait plus partie de l'agenda politique.

Les leviers de la transition

Les scénarios utilisés dans cette étude présentent une variété d'orientations politiques pour la transition. Afin d'atteindre la neutralité climatique, les scénarios combinent différents types de leviers : sobriété, efficacité et technologie.

Les mesures de sobriété modifient essentiellement le volume des activités (par exemple, les kilomètres parcourus par personne, la consommation totale d'énergie, les mètres carrés de bâtiment par personne). Les mesures d'efficacité réduisent la consommation d'énergie par unité d'activité (par exemple, l'isolation thermique des bâtiments réduit la consommation d'énergie pour maintenir la même température dans le bâtiment). Les mesures technologiques consistent à remplacer ou à améliorer les actifs physiques par des actifs utilisant des technologies différentes pour le même service afin de réduire les émissions (par exemple, une voiture électrique plutôt qu'un véhicule thermique, une pompe à chaleur plutôt qu'un chauffage thermique traditionnel).

Nous pouvons relier ces leviers aux différents termes d'une identité inspirée de Kaya pour chaque secteur. Cette identité relie les émissions de carbone à des variables d'activité, de démographie et d'énergie (voir figure 6). Même si la frontière entre ces leviers peut parfois être floue, elle fournit une structure pour la comparaison des approches de transition.

²⁴ Ibid

Figure 6 Leviers activés par les scénarios

Adapted from the Kaya identity

$$CO_2emissions = Population \times \frac{Activity\ mix}{Population} \times \frac{Energy}{Activity\ mix} \times \frac{CO_2emissions}{Energy}$$

	Demand driver / Sufficiency	Energy intensity / Efficiency	CO2 emissions intensity of energy / Technology
Buildings	Living space per person, rational use of non-residential area, heating and cooling behaviours	Thermal insulation; appliance efficiency	Electrification of heating; district heating ...
Transport	Passenger distance ; freight transported; modal share; occupancy rate of vehicles, car sharing	Motorization efficiencies, ...	Electrification of vehicles; e-fuel switch ...
Power supply and energy networks	Demand Side Management, Storage	More performing generation assets ...	Energy production share of fossil, renewable, nuclear ...
Industry	Demand for goods and services; lifetime of goods, ...	Efficiency of production processes; material efficiency; recycling, ...	Green fuels or feedstock (electricity, hydrogen, e-fuels, biomass), CCS, ...

Commentaires : le terme « PIB » a été remplacé dans l'identité de Kaya par le terme « mix d'activités » afin de distinguer plus clairement les leviers de la transition. En effet, la relation entre le PIB et l'activité est complexe, et la notion de PIB ne permet pas d'identifier aussi clairement ce qui résulte des variations de prix ou de quantité des activités.

Source : CEIP

Dans la section suivante, nous regroupons, lors de l'examen des résultats de la modélisation, les scénarios qui proposent des combinaisons similaires de ces facteurs pour atteindre la neutralité climatique. Cela nous permet d'établir un lien entre les choix de transition spécifiques et leurs conséquences en termes d'investissement et de dépenses courantes.

5. Principaux résultats par secteur

Dans cette section, nous présentons les résultats de notre modèle estimant les dépenses d'investissement et d'exploitation supplémentaires pour les bâtiments, les transports et le secteur de l'énergie des différents scénarios de transition par rapport au scénario de référence WEM et par rapport au niveau 2024. Pour les secteurs du bâtiment et des transports, nous vérifions si les conclusions relatives aux dépenses opérationnelles restent valables dans différentes projections d'évolution des prix de l'énergie. Nous partageons également les estimations des besoins d'investissements supplémentaires dans l'industrie provenant d'autres études existantes.

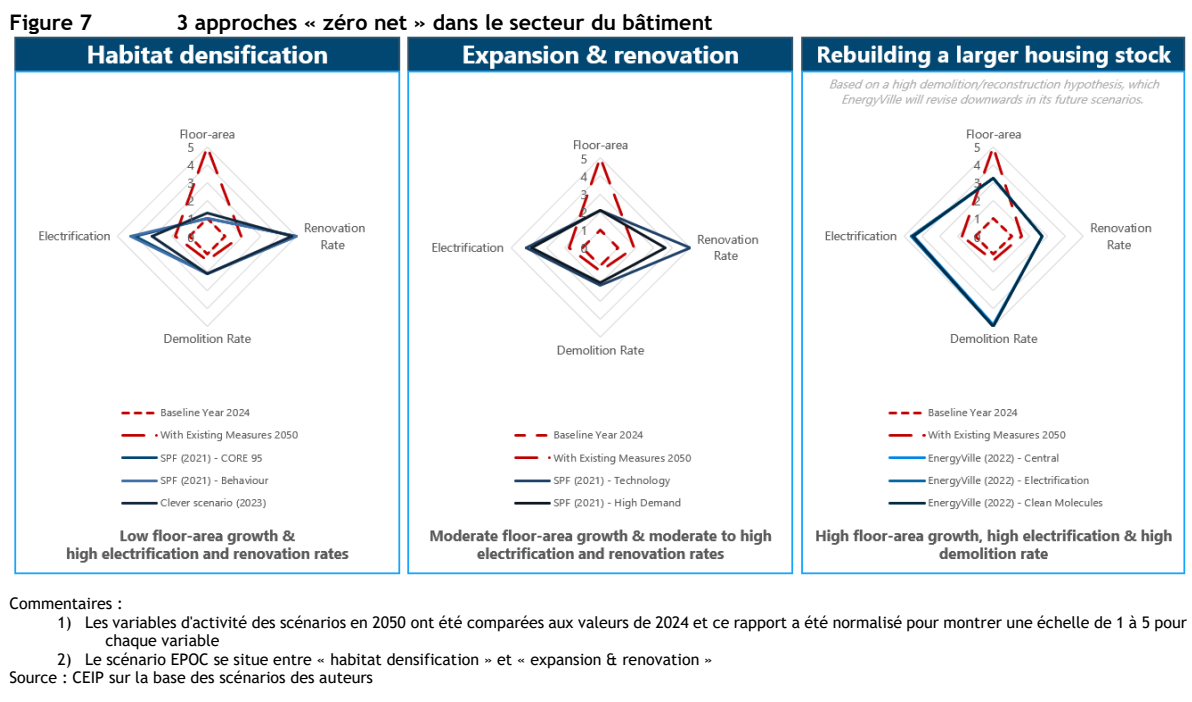
5.1. Secteur du bâtiment

Nos estimations couvrent les bâtiments tant résidentiels que non résidentiels et se concentrent sur les appareils de chauffage et la rénovation des bâtiments à des fins d'isolation. Les scénarios de décarbonation présentent des approches sensiblement distinctes, notamment en ce qui concerne la surface des bâtiments et les stratégies de rénovation visant à améliorer l'isolation thermique du parc immobilier. Ces différences se traduisent par des niveaux d'investissement variables.

5.1.1. Approches « zéro net » pour les bâtiments

Nous avons choisi de classer les scénarios de décarbonation des bâtiments en fonction de quatre paramètres représentatifs de la variété des approches (voir figure 7) :

- Surface au sol (m^2) : surface projetée dans les bâtiments résidentiels et non résidentiels.
- Taux d'électrification (%) : le rapport entre la demande d'électricité dans les bâtiments et la demande totale d'énergie dans les bâtiments. Cela comprend la demande d'électricité pour l'éclairage et les appareils électriques autres que le chauffage.
- Taux de rénovation (%) : le rapport entre la surface rénovée annuellement et la surface au sol totale.
- Taux de démolition (%) : le rapport entre la surface démolie et reconstruite annuellement et la surface au sol totale.



La figure 7 permet de dégager trois groupes distincts de scénarios :

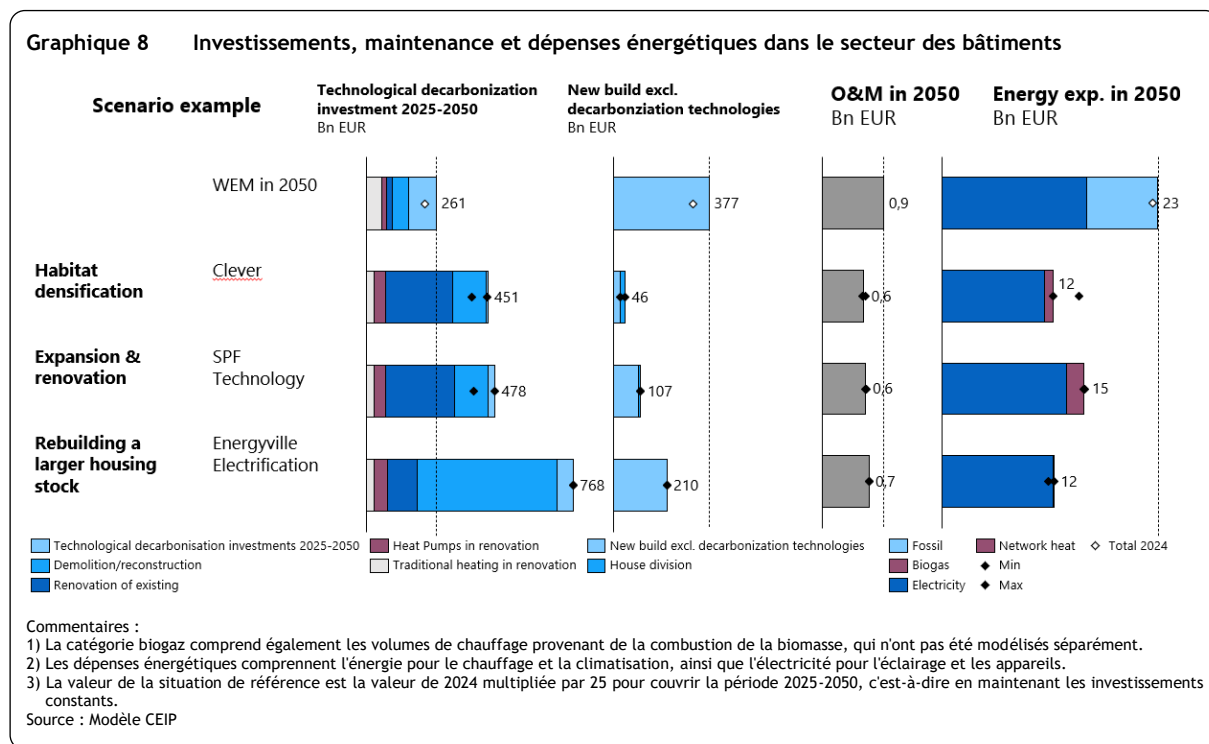
- **Densification de l'habitat** : ces scénarios prévoient une expansion limitée de la surface au sol, voire aucune expansion, malgré la croissance de la population, associée à des taux élevés de rénovation et d'électrification.
- **Expansion et rénovation** : ces scénarios appliquent moins de restrictions à l'expansion de la surface au sol et présentent des taux de rénovation et d'électrification modérés.
- **Reconstruction d'un parc de logements plus important** : ces scénarios mettent l'accent sur un taux élevé d'électrification et de démolition, avec peu d'efforts pour réduire l'expansion de la surface au sol. Il faut toutefois noter que les trois scénarios EnergyVille, datant de 2022, supposent un rythme de démolition-reconstruction de bâtiments particulièrement élevé. De nouveaux scénarios sont actuellement développés par les mêmes auteurs et réviseront cette hypothèse significativement à la baisse.

Pour chaque groupe de scénarios décrits ci-dessus, nous avons sélectionné un scénario représentatif dont les résultats seront présentés dans les sections suivantes.

5.1.2. CAPEX et OPEX de la décarbonation des bâtiments

Pour chaque approche de transition, le graphique ci-dessous sélectionne un scénario représentatif et présente ses investissements cumulés entre 2025 et 2050, ainsi que les coûts de maintenance et les dépenses énergétiques estimées en 2050. Les résultats détaillés pour tous les scénarios figurent à l'annexe 2.

On distingue les dépenses d'investissement liées exclusivement aux technologies de décarbonation (dépenses de rénovation et, pour les bâtiments neufs, surcoût des technologies de décarbonation par rapport aux alternatives carbonées) des dépenses d'investissement liées à la construction de nouveaux bâtiments en dehors de ces surcoûts²⁵ (fondations, gros oeuvre, techniques non décarbonées, finitions) et de division des maisons.



Deux observations principales peuvent être tirées du graphique 8.

Premièrement, les investissements liés aux technologies de décarbonation sont dans tous les scénarios de transition nettement supérieurs au scénario de référence WEM, allant de 190 milliards d'euros (+73%) dans le scénario Clever, à 207 milliards d'euros (+194%) dans les scénarios Energyville. Ceci est essentiellement dû à des investissements supplémentaires substantiels en rénovation et/ou démolition-reconstruction par rapport au scénario de référence.

Deuxièmement, un changement substantiel dans la nature des investissements est observé dans tous les scénarios. En particulier, on observe une transition des investissements dans les nouvelles constructions (hors technologies de décarbonation) vers des dépenses d'investissement pour les technologies de décarbonation des nouveaux bâtiments et, plus important encore, des bâtiments existants. Cette baisse des investissements dans les nouvelles constructions hors technologies de décarbonation (de -167 à -331 milliards par rapport à WEM dans les scénarios Energyville et Clever respectivement), compense partiellement ou plus que totalement les besoins d'investissement supplémentaires dans les technologies de décarbonation des bâtiments, conduisant à des besoins d'investissement supplémentaires totaux de respectivement -141 et +340 milliards dans ce secteur.

²⁵ Nous avons fait l'hypothèse que la part liées aux technologies de décarbonation dans l'investissement total de la construction des nouveaux bâtiments est de 20%, ce qui représente l'investissement additionnel pour rendre le bâtiment « passif », estimé à entre 10% et 30% dans la littérature des professionnels du secteur.

Deux facteurs expliquent la variation importante des dépenses d'investissement entre les différentes stratégies de décarbonation : l'expansion de la surface des bâtiments et l'arbitrage entre rénovation et démolition-reconstruction.

Extension de la surface du bâti. Nous notons que tous les scénarios envisagent une surface au sol totale inférieure à notre scénario WEM en 2050. Les scénarios de type « densification de l'habitat » mettent l'accent sur une forte réduction des nouvelles constructions (résidentielles et non résidentielles) grâce à des politiques strictes d'aménagement du territoire et limitent l'artificialisation des sols.²⁶ Cette approche se traduit par une surface au sol plus petite par habitant, en dépit de la croissance démographique attendue et de la diminution de la taille des ménages. Plus concrètement, cela signifie une moyenne de 115 mètres carrés par ménage²⁷ en 2050, contre 127 en 2024 et 145 dans un scénario WEM en 2050. Dans ces scénarios, le coût d'investissement lié à la « division des maisons » (coûts supplémentaires dus à des logements plus compacts dans le parc immobilier actuel) est - de loin - bien inférieur au coût d'investissement lié à la construction de nouveaux logements. À l'inverse, les scénarios sans contraintes strictes sur les nouvelles constructions (en termes de taille d'habitat pour le secteur résidentiel, cela signifie une moyenne de 131 mètres carrés par ménage, et les surfaces au sol non résidentielles demeurent constantes autour de 17,1 mètres carrés par habitant) se traduisent par des besoins d'investissement beaucoup plus importants.

Compromis entre rénovation et démolition-reconstruction. Un deuxième facteur clé réside dans le choix entre les rénovations conventionnelles et la démolition-reconstruction pour la remise à neuf des logements.²⁸ Le choix de donner la priorité à la démolition-reconstruction entraîne des besoins d'investissement plus importants, jusqu'à deux fois plus élevés que pour les approches plus économiques.

Les installations de chauffage sont également incluses dans les dépenses d'investissement, représentant environ 12% des besoins totaux en CAPEX. Au cours de la période, les systèmes de chauffage traditionnels (par exemple les chaudières à combustible) sont progressivement remplacés par des pompes à chaleur. Le coût direct de l'électrification est relativement faible par rapport à d'autres éléments des stratégies de rénovation, car la différence de prix entre les pompes à chaleur et les chaudières classiques est minime dans les bâtiments bien isolés.²⁹

Tous les scénarios de transition conduisent à des dépenses opérationnelles récurrentes inférieures à celles du scénario de référence en 2050. Et ce, malgré les coûts de maintenance plus élevés des pompes à chaleur, en raison des coûts de maintenance plus élevés dans les bâtiments mal isolés qui nécessitent des systèmes de chauffage surdimensionnés. Les scénarios de transition engendrent systématiquement

²⁶ Proche des stratégies « stop béton »

²⁷ L'hypothèse pour le nombre de ménages est de 5,16 en 2024 évoluant à 5,74 en 2050 dans tous les scénarios suite à une croissance de la population de 11,65 millions d'habitants en 2024 à 12,57 millions en 2050. La taille moyenne des ménages devrait diminuer de 2,26 à 2,19 personnes. Pour plus d'informations sur les hypothèses et les sources, voir l'annexe 5.

²⁸ Il convient de noter que les trois scénarios d'EnergyVille, qui remontent à 2022, supposent un taux particulièrement élevé de démolition-reconstruction de bâtiments. Cela contribue à l'écart important des niveaux de dépenses d'investissement entre les scénarios. Les nouveaux scénarios en cours d'élaboration par les mêmes auteurs réviseront cette hypothèse à la baisse de manière significative.

²⁹ D'autres modes de chauffage coûteux, tels que le chauffage par le sol, n'ont pas été pris en compte dans cet exercice.

une réduction de 30% des coûts de maintenance des systèmes de chauffage et une réduction de la facture énergétique de 40 à 50% par rapport au scénario de référence.³⁰

Les scénarios de transition impliquent un abandon complet des combustibles fossiles au profit de l'électricité et, dans une moindre mesure, du biogaz. Les réseaux de chaleur sont proposés par les scénarios de la catégorie « densification de l'habitat » et « extension des bâtiments et rénovation », et représentent une faible part des coûts de consommation d'énergie. Nous observons que les stratégies de transition favorisant la construction de nouveaux bâtiments ne permettent pas de réaliser des économies significatives sur la facture énergétique par rapport aux stratégies de transition favorisant la rénovation, malgré leurs importants besoins supplémentaires en CAPEX.³¹

En résumé, plusieurs scénarios permettent d'atteindre des émissions nettes nulles dans le secteur du bâtiment avec des investissements cumulés moindres au cours de la période 2025-2050 que dans le scénario WEM. Dans de tels scénarios, les investissements dans la rénovation et le chauffage sont compensés par une réduction des investissements dans les nouvelles constructions, à condition que la rénovation soit prioritaire par rapport aux stratégies de démolition-reconstruction. Cette conclusion au niveau global ne se traduit pas au niveau des ménages individuels ou des entités commerciales, en fonction de leur situation. Tous les scénarios de transition induisent des dépenses opérationnelles récurrentes inférieures.

Comparaison avec les stratégies de rénovation régionales

Aux alentours de 2020, chacun des trois gouvernements régionaux belges a publié sa propre stratégie de rénovation visant à obtenir un parc immobilier ayant une bonne efficacité énergétique³². Leurs estimations des besoins d'investissement cumulés absolus entre 2020 et 2050 en Belgique se situent entre 340 et 410 milliards d'euros. Dans ce total, des besoins d'investissement de 103 à 150 milliards d'euros sont prévus pour les bâtiments résidentiels et de 57 milliards d'euros pour les bâtiments non résidentiels en Flandre. Respectivement 117 milliards et 34-57 milliards d'euros sont estimés pour les bâtiments résidentiels et non résidentiels de Wallonie. Enfin, 29 milliards d'euros concernent les immeubles résidentiels à Bruxelles.

Ces estimations sont cohérentes avec nos estimations de dépenses pour les scénarios qui limitent la croissance de la surface au sol. Néanmoins, les méthodologies et les champs d'application des différentes analyses diffèrent entre les estimations régionales ainsi qu'avec notre étude, et les comparaisons doivent être faites avec précaution.

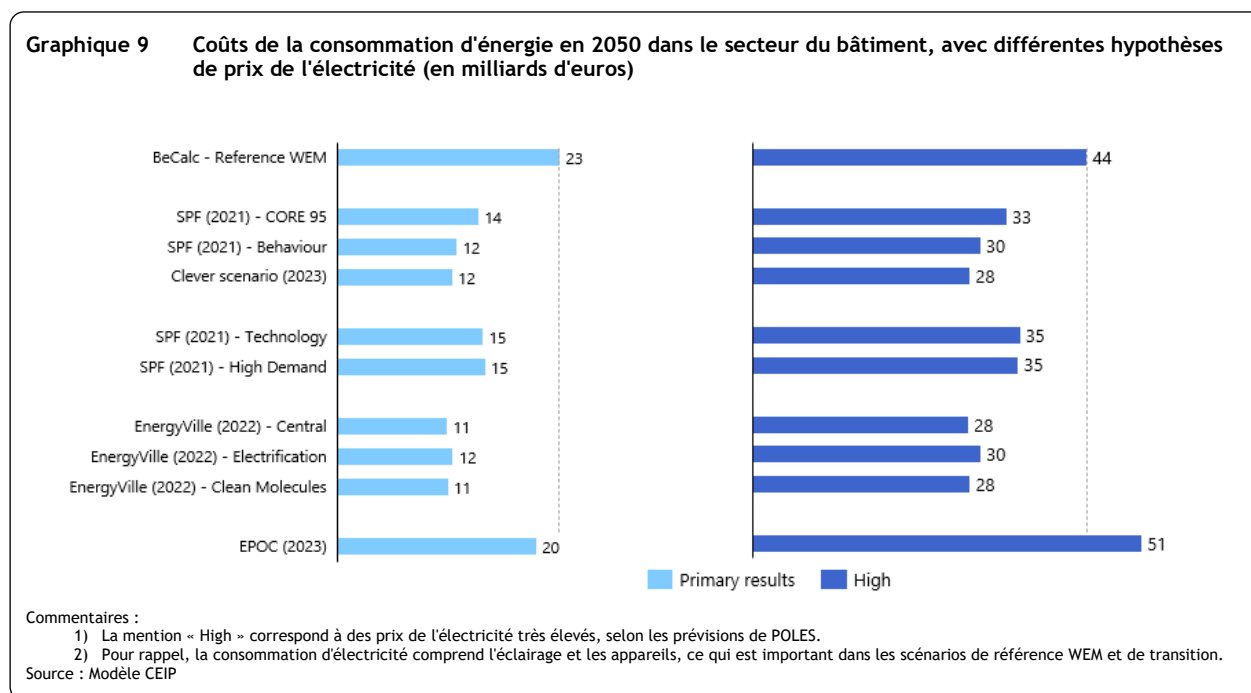
³⁰ À l'exception du scénario EPOC, qui est représenté par la valeur maximale du groupe « densification de l'habitat », où les valeurs non résidentielles sont particulièrement élevées. Elles peuvent refléter un champ d'application plus large dans les bâtiments commerciaux pris en compte (avec un chevauchement potentiel avec le secteur industriel) ou des hypothèses techniques différentes en termes de consommation d'énergie par surface.

³¹ La réduction de la facture d'électricité dans les scénarios de transition par rapport au scénario WEM en 2050 peut sembler contre-intuitive avec un système de chauffage électrifié. Nous soulignons l'étendue des dépenses énergétiques dans le modèle qui comprend toutes les dépenses énergétiques des bâtiments (ainsi que l'éclairage et d'autres appareils par exemple). Les scénarios peuvent modéliser d'autres mesures d'efficacité énergétique pour ces consommations hors chauffage qui n'ont pas été prises en compte dans le modèle, ou avoir des hypothèses techniques différentes en termes de consommation d'électricité à des fins hors chauffage.

³² La RF (2020), la RBC (2019 & 2020) et le SPW (2020), voir bibliographie

5.1.3. Coûts de la consommation d'énergie dans les bâtiments : analyse de sensibilité

L'électricité sera le principal vecteur énergétique consommé dans les bâtiments dans les scénarios de neutralité en 2050. Récemment, les prix de l'électricité ont connu d'importantes fluctuations, ce qui a entraîné des variations considérables dans les projections de prix. Pour tester la robustesse de nos conclusions, nous avons appliqué une augmentation plus importante des prix de l'électricité (+60% dans le scénario WEM de référence et +135% dans les scénarios de transition, voir l'annexe 3.2), ce qui se reflète dans les résultats « élevés » du graphique ci-dessous.



Cette analyse démontre que les dépenses énergétiques sont inférieures dans tous les scénarios de transition par rapport au scénario de référence. Même avec un prix de l'électricité plus élevé, ce message reste stable, sauf dans le cas du scénario EPOC. Il est important de souligner que cette analyse de sensibilité s'applique également à la consommation d'électricité pour l'éclairage et les appareils, qui est importante tant dans le scénario de référence WEM que dans les scénarios de transition.

5.2. Secteur des transports

L'analyse couvre les besoins d'investissement pour les véhicules (voitures, camions, camionnettes, bus³³, trains et péniches), les stations de recharge électrique et l'ensemble de l'infrastructure pour le transport intérieur belge. Les besoins d'investissement des scénarios de transition dépendent fortement de la part qu'occupera à l'avenir le transport par voiture particulière, qui devrait représenter la plus grande part des investissements dans la plupart des scénarios examinés.

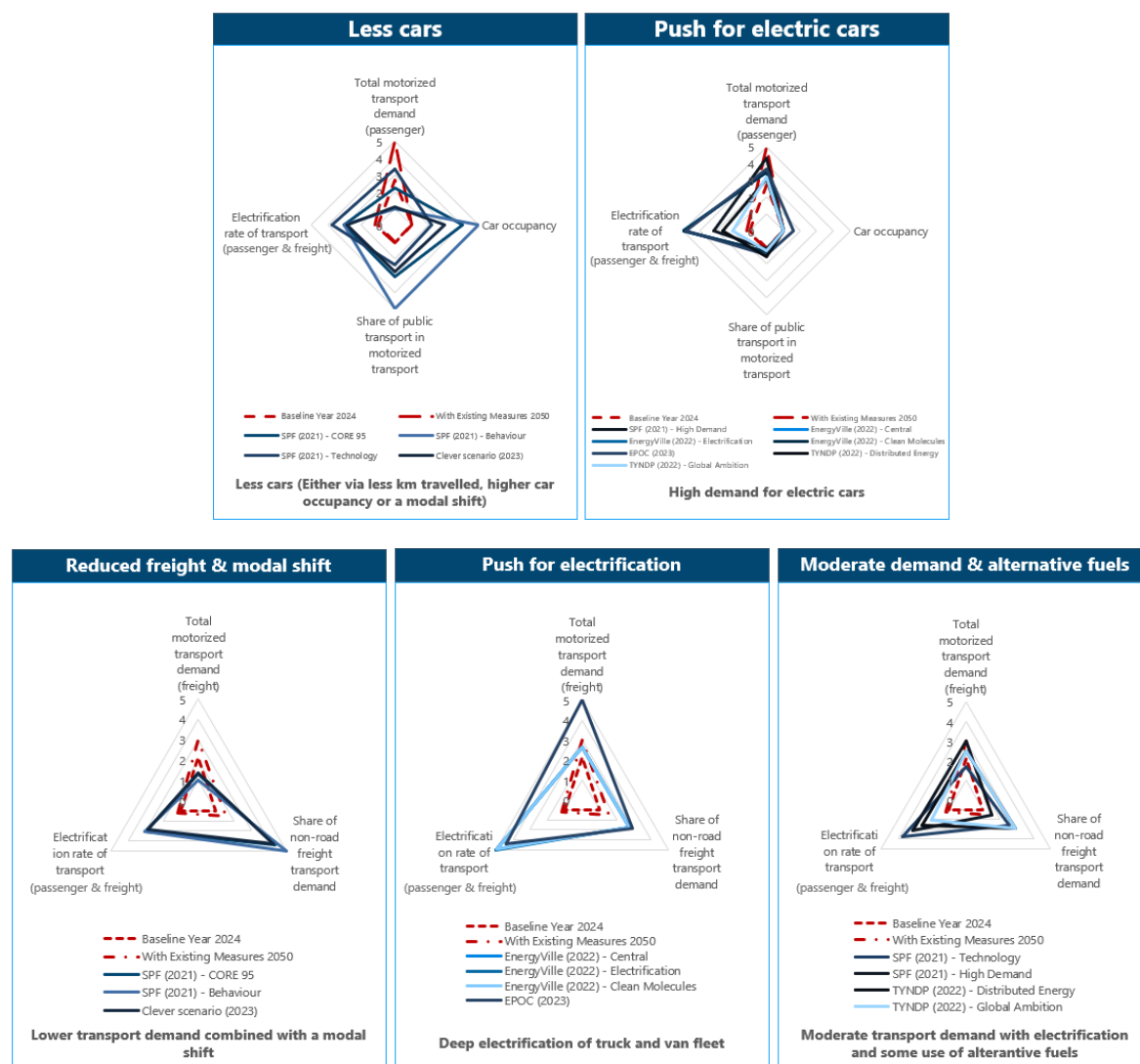
³³ Comprend à la fois les flottes d'autobus des transports publics et les autocars privés.

5.2.1. Approches « zéro net » pour les transports

Nous avons choisi de classer les scénarios de décarbonation des transports en fonction de quatre paramètres représentatifs de la variété des approches (voir figure 10) :

- Demande totale de transport motorisé : la somme de la demande de transport par voiture, autobus et train, exprimée en passagers-kilomètres pour le transport de passagers, ou la somme de la demande de transport par camion, camionnette, train et péniche, exprimée en tonnes-kilomètres pour le transport de marchandises.
- Occupation des voitures : le nombre moyen de passagers dans une voiture. Cet indicateur est spécifique au transport de passagers.
- Taux d'électrification des transports (en %) : rapport entre la demande finale d'électricité du secteur des transports et la demande finale totale d'énergie pour les véhicules de transport de passagers et de transport de marchandises.
- Part de la demande de transport public de passagers et part de la demande de transport non routier de marchandises (en %) : le rapport entre la demande de transport public et la demande totale de transport motorisé de passagers pour le transport de passagers, et le rapport entre la demande de transport de marchandises par rail et par barges intérieures et la demande totale de transport motorisé de marchandises pour le transport de marchandises. Cet indicateur mesure le transfert modal en faveur de modes de transport à faible émission de GES.

Figure 10 2 et 3 approches de « zéro net » dans les secteurs du transport de passagers et de marchandises, respectivement



Commentaires :

- 1) Les variables d'activité ont été comparées aux valeurs de 2024 et ont été normalisées afin de fournir une échelle de 1 à 5 pour chaque variable.
- 2) Les camions et les camionnettes sont pris ensemble dans la même catégorie.

Source : CEIP sur la base des scénarios des auteurs

La figure 10 nous montre que trois groupes distincts de scénarios se dégagent pour le transport de passagers et de marchandises :

- **Moins de voitures** : pour le transport de passagers, ces scénarios reposent sur une combinaison de leviers qui contribuent tous à réduire le parc automobile. Ces leviers incluent la demande de transport de passagers, le taux d'occupation des voitures et le transfert modal. Pour le transport de marchandises, ces scénarios combinent une réduction de la demande de transport de marchandises avec un transfert modal ambitieux de la route vers le rail et les voies navigables intérieures.

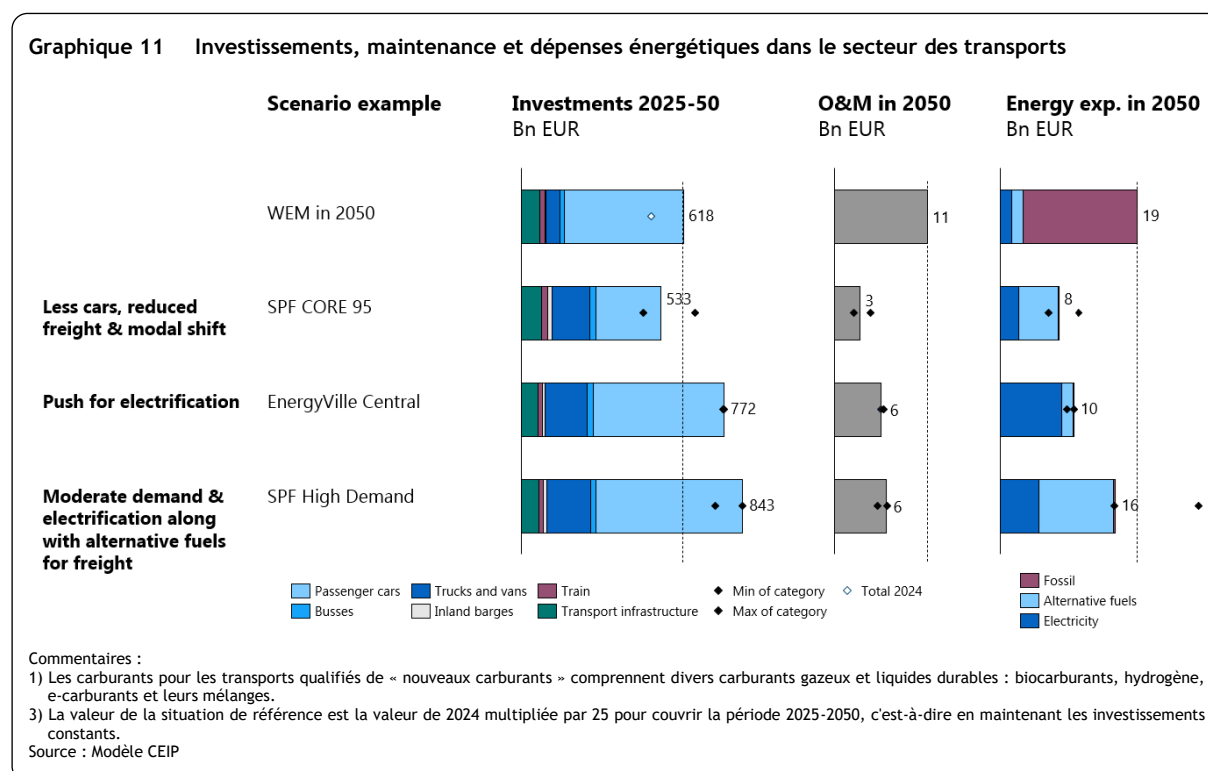
- Électrification accrue : ces scénarios s'appuient sur une demande modérée de transport de passagers et une demande élevée de transport de marchandises, avec un niveau élevé d'électrification des véhicules de transport de passagers et de marchandises.
- Demande modérée et carburants alternatifs : ce groupe s'applique uniquement au transport de marchandises. Ces scénarios s'appuient sur une demande de transport modérée avec une électrification modérée et l'utilisation de carburants alternatifs.

Nous relevons que tous les scénarios, sauf un (SPF High Demand), supposent une croissance de la demande de transport de passagers plus faible que le scénario de référence WEM.

Pour chaque groupe de scénarios décrits ci-dessus, nous avons sélectionné un scénario représentatif dont les résultats seront présentés dans les sections suivantes.

5.2.2. CAPEX et OPEX de la décarbonation des transports

Pour chaque approche de transition, le graphique ci-dessous présente des investissements cumulés entre 2025 et 2050, ainsi que les coûts de maintenance et les dépenses énergétiques prévues en 2050. Les tableaux présentant les résultats des autres scénarios se trouvent à l'annexe 2.



Le graphique 11 illustre que les investissements dans les scénarios de transition pour le secteur des transports vont d'un niveau nettement inférieur au niveau de référence dans le scénario SPF CORE 95 à un niveau nettement supérieur dans le scénario SPF High Demand.³⁴

³⁴ La désagrégation des investissements liés aux technologies de décarbonation ou non, qui a été appliquée à la section précédente pour les nouveaux bâtiments, n'a pas été appliquée aux nouveaux véhicules – l'autre catégorie majeure de dépenses

Les scénarios, tels que le scénario SPF CORE 95, qui mettent l'accent sur la réduction de la demande de transport de passagers et de marchandises mènent à des besoins d'investissement similaires, soit une réduction nette de 3,4 milliards d'euros (14%) par an en moyenne sur la période par rapport au scénario WEM, et de 1,6 milliard d'euros (8%) par an en moyenne par rapport aux niveaux de 2024. À l'inverse, des scénarios comme le SPF High Demand, qui maintiennent une forte demande de transport et donnent la priorité à l'électrification plutôt qu'au transfert modal, pour le transport de passagers et de marchandises, entraînent des besoins d'investissement accrus, avec une augmentation annuelle de 9 milliards d'euros (36%) en moyenne par rapport au WEM de référence, et de 14 milliards d'euros (71%) par rapport aux niveaux de 2024.

La majorité des scénarios de transition mènent à des dépenses opérationnelles récurrentes inférieures. Les coûts de maintenance diminuent dans tous les scénarios de transition, grâce aux coûts de maintenance plus faibles des véhicules électriques et/ou à la diminution du nombre total de véhicules. Les dépenses énergétiques affichent une tendance à la baisse dans la plupart des scénarios ³⁵ et une forte réorientation des carburants conventionnels vers l'électricité et les biocarburants, les carburants électriques, l'hydrogène et d'autres mélanges (regroupés sous l'appellation « nouveaux carburants »). Certains de ces scénarios (e.g. SPF CORE 95 et SPF High Demand) mènent à une facture énergétique importante pour ces nouveaux carburants.

En bref, les voitures, suivies par les camions, dominent les besoins d'investissement dans les scénarios de référence et de décarbonation. Plusieurs scénarios permettent d'atteindre des émissions nettes nulles dans le secteur des transports avec des investissements cumulés moindres sur la période 2025-2050 par rapport au scénario WEM. Dans ces scénarios, le coût supplémentaire des véhicules électriques est compensé par la réduction du parc automobile grâce à un transfert modal ambitieux, au covoiturage et à la réduction du volume global de transport (passagers-kilomètres et tonnes-kilomètres).

Zoom sur l'évolution du parc de véhicules routiers

Le graphique 12 se concentre sur les investissements dans les voitures, les camionnettes ³⁶ et les camions et fournit une ventilation par technologie de moteur. Ce graphique met en évidence l'ampleur du transfert des véhicules à moteur à combustion interne (MCI) aux véhicules électriques (VE) dans chaque scénario. Si les voitures représentent la majorité des investissements dans les scénarios de référence et de décarbonation, la nature de ces investissements diffère considérablement entre les deux approches. Dans le scénario de référence, les investissements dans les véhicules se font principalement dans des véhicules équipés de moteurs à combustion interne, alors que dans les scénarios de décarbonation, les investissements se font principalement - et sans surprise - dans les véhicules électriques.

Si tous les scénarios de décarbonation supposent une électrification généralisée du parc automobile, ils diffèrent considérablement quant à la taille du parc nécessaire. L'effet combiné de l'évolution des

d'investissements pour laquelle cette désagrégation serait pertinente. Une telle application nécessiterait une analyse spécifique plus détaillée, qui pourrait faire l'objet d'un travail futur, pour prendre en compte les facteurs tels que la substitution entre les investissements dans une voiture personnelle et ceux dans le transport public.

³⁵ Le TYNDP est un cas particulier en raison de son champ d'application européen, qui inclut les transports maritimes et aériens, et qui implique des émissions nettes nulles au niveau européen, mais pas nécessairement au niveau national.

³⁶ Dans cet exercice, les camionnettes sont incluses dans la catégorie des véhicules de transport de marchandises.

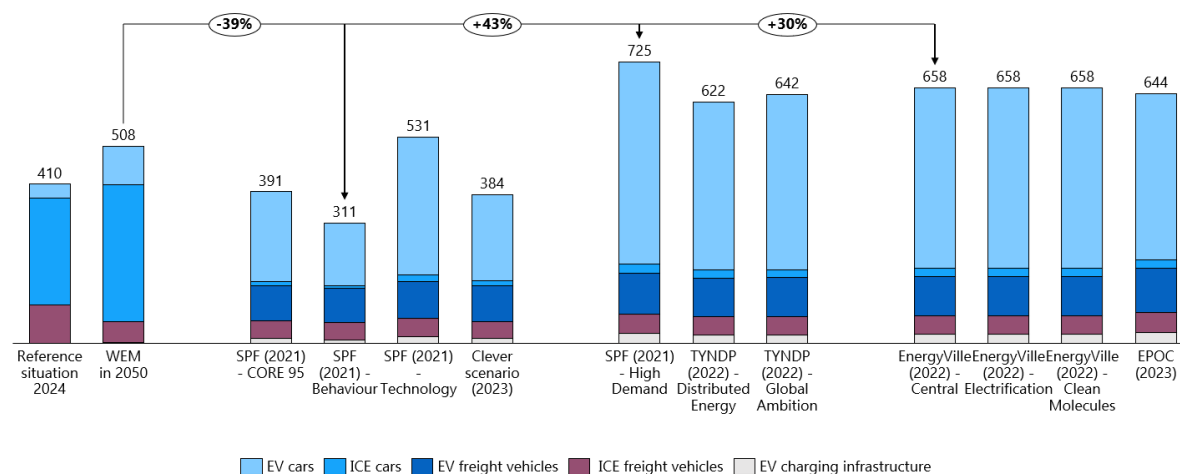
kilomètres parcourus (réduction absolue ou transfert modal) et du taux d'occupation des voitures conduit à une réduction significative du parc de véhicules nécessaires pour les scénarios SPF Behaviour, SPF CORE 95, SPF Technology et Clever. Cela se traduit par un niveau d'investissement le plus bas. Cette observation devient plus tangible avec des chiffres :

- Pour les scénarios qui optent pour une réduction du nombre de voitures, le nombre moyen de voitures particulières s'élève à une voiture pour deux ménages ³⁷en 2050, contre 1,2 voiture par ménage en 2024 et 1,4 dans le scénario WEM en 2050. Dans le scénario le plus ambitieux en termes de réduction du nombre de voitures (SPF Behaviour), le covoiturage conduit à moins d'une voiture pour trois ménages. Pour le transport de marchandises, ces scénarios ne réduisent pas de manière significative le nombre de camions (0,01 par habitant en moyenne, aligné sur la référence en 2024 et 2050). Le nombre moyen de camionnettes reste constant par rapport au nombre actuel de 0,05 par habitant.
- Pour les scénarios qui privilégient l'électrification, le nombre moyen de voitures particulières est réduit à 1,1 par ménage en 2050, contre 1,2 voiture par ménage en 2024 et 1,4 dans le scénario WEM en 2050. Pour le transport de marchandises, le nombre de camions et de camionnettes par habitant demeure constant.
- Pour les scénarios qui misent sur les carburants alternatifs, le nombre moyen de voitures particulières est réduit à environ 1 à 1,3 par ménage en 2050, contre 1,2 voiture par ménage en 2024 et 1,4 dans le scénario WEM en 2050. Pour le transport de marchandises, le nombre de camions et de camionnettes par habitant demeure constant.

Globalement, les scénarios de décarbonation qui mettent le plus l'accent sur l'électrification (EnergyVille et EPOC) mènent à des niveaux d'investissement jusqu'à 30% supérieurs à ceux du scénario WEM pour la période 2025-2050, ce qui représente jusqu'à 6 milliards d'euros supplémentaires par an en moyenne. Ces résultats sont cohérents avec l'augmentation estimée de 41% du coût des voitures électriques par rapport aux voitures à moteur à combustion interne et de 78% du coût des camions électriques par rapport aux camions à moteur à combustion interne, dans un contexte où la demande de transport est plus faible que dans le scénario de référence du WEM. Lorsqu'une réduction du nombre de passagers-kilomètres parcourus est utilisée comme levier en plus de l'électrification et de l'utilisation accrue des véhicules (taux d'occupation des voitures par exemple), les besoins d'investissement peuvent être réduits jusqu'à 39% par rapport au scénario de référence WEM.

³⁷ L'hypothèse pour le nombre de ménages est de 5,16 en 2024 évoluant à 5,74 en 2050 dans tous les scénarios suite à une croissance de la population de 11,65 millions d'habitants en 2024 à 12,57 millions en 2050. La taille moyenne des ménages devrait diminuer de 2,26 à 2,19 personnes. Pour plus d'informations sur les hypothèses et les sources, voir l'annexe 5.

Graphique 12 Ventilation des véhicules électriques et à moteur à combustion interne - CAPEX cumulés 2025-2050 (en milliards d'euros)



Commentaires : la valeur de la situation de référence est la valeur de 2024 multipliée par 25 pour couvrir la période 2025-2050, c'est-à-dire en maintenant les investissements constants.
Source : Modèle CEIP

Enfin, les infrastructures de recharge des VE ne représentent qu'une part relativement faible de l'ensemble des besoins d'investissement dans la mobilité routière électrique. Les besoins d'investissement cumulés pour l'infrastructure de recharge des VE vont de 9,7 (SPF Behaviour) à 29,2 (EPOC) milliards d'euros. Ces chiffres représentent environ 0,4 à 1,2 milliard d'euros par an.

Zoom sur les infrastructures de transport

Nos estimations d'investissements dans les infrastructures comprennent les investissements dans les infrastructures ferroviaires³⁸, routières, fluviales et cyclables.

Les besoins d'investissement dans les infrastructures routières sont légèrement inférieurs (jusqu'à 2,4%) dans les scénarios de transition par rapport au scénario WEM et sont à peu près comparables d'un scénario de transition à l'autre. Les scénarios ne prévoyant pas ou peu de réduction du transport routier (tant pour le fret que pour les passagers) nécessitent des niveaux d'investissement dans les infrastructures routières légèrement plus élevés que les autres scénarios de transition.

La moitié des scénarios (SPF Behaviour, SPF CORE 95, SPF Technology, Clever et EPOC) nécessitent des investissements supplémentaires dans l'infrastructure ferroviaire par rapport à la situation de 2024. Parmi ces scénarios, ceux qui reposent sur les changements les plus importants de la demande de transport ferroviaire et des parts modales (SPF Behaviour, SPF CORE 95) nécessitent les niveaux d'investissement dans l'infrastructure ferroviaire les plus élevés, jusqu'à 17% de plus que le scénario de référence WEM. Les investissements en infrastructures ferroviaires et en matériel roulant sont détaillés à l'annexe 1.1.

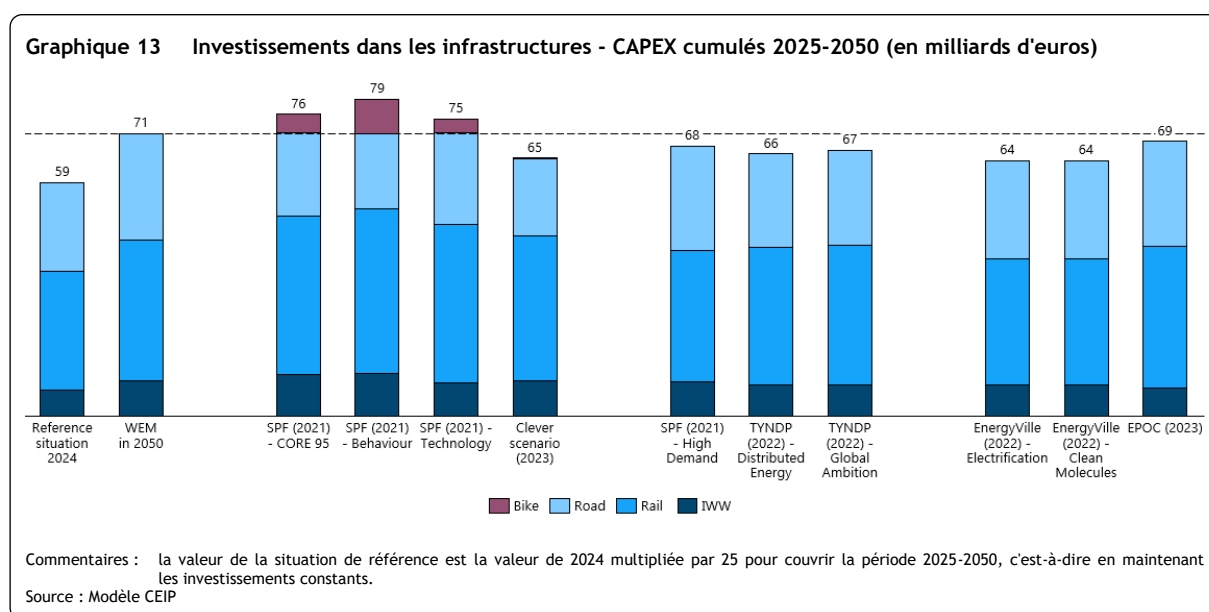
Dans l'ensemble, les scénarios dans lesquels la demande de transport de passagers satisfaite par le transport routier (voitures particulières) est plus faible et qui envisagent un transfert modal nécessitent les niveaux d'investissement les plus élevés dans le secteur ferroviaire, jusqu'à 77% au-dessus des niveaux

³⁸ Tram et métro non compris.

actuels de 2024. D'ici à 2050, les niveaux d'investissement dans le secteur ferroviaire devront être soit à peu près similaires à ceux du scénario de référence WEM (plus de 2 milliards d'euros par an en moyenne), soit jusqu'à 30% plus élevés pour les scénarios ferroviaires ambitieux (0,64 milliard d'euros supplémentaires par an, c'est-à-dire 30% de plus que le scénario de référence).

Les auteurs des scénarios de décarbonation omettent souvent de prendre en compte la demande de transport en vélo. Dans les scénarios qui prévoient une augmentation de la demande de transport en vélo, le déploiement de l'infrastructure cyclable peut représenter un besoin important d'investissements supplémentaires, jusqu'à 0,34 milliard d'euros par an en moyenne.

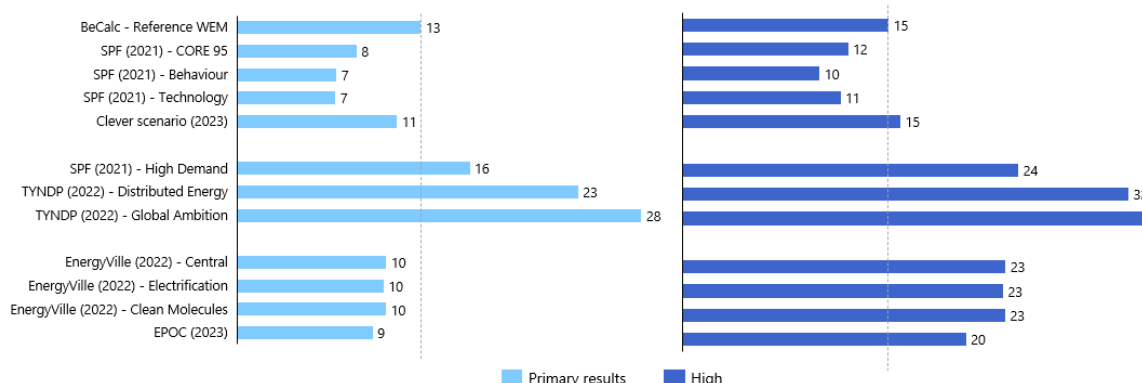
Les investissements dans les voies navigables intérieures dépassent légèrement les niveaux de référence dans les scénarios prévoyant un transfert modal du fret vers les voies navigables au détriment de la route.



5.2.3. Coûts de la consommation d'énergie dans les transports : analyse de sensibilité

Cette section examine la manière dont les coûts énergétiques sont affectés par des prix de l'électricité plus élevés (+60% dans le scénario WEM de référence, et +135% dans les scénarios de transition, voir l'annexe 3.2), comme le démontrent les résultats « élevés » dans le graphique ci-dessous. De la même manière que pour les bâtiments, les scénarios de neutralité prévoient que, d'ici 2050, l'électricité sera le principal vecteur énergétique consommé dans les transports, ce qui rend les coûts de consommation d'énergie très sensibles aux prix de l'électricité dans ce secteur. En revanche, les coûts de transport dans le scénario de référence WEM seront moins affectés par les prix de l'électricité.

Graphique 14 Coûts de la consommation d'énergie en 2050 dans le secteur des transports, avec différentes hypothèses de prix de l'électricité (en milliards d'euros)



Commentaires :

1) La mention « High » correspond à des prix de l'électricité très élevés, selon les prévisions de POLES.

2) TYNDP est un cas à part étant donné son scope européen qui comprend le transport maritime et l'aviation

Source : Modèle CEIP

Dans le secteur des transports, la principale conclusion est que les dépenses en énergie sont inférieures dans la plupart des scénarios de transition, à l'exception des scénarios TYNDP et SPF High Demand, par rapport au scénario de référence WEM. Toutefois, avec des prix de l'électricité plus élevés, les dépenses en énergie dépassent celles du scénario de référence dans la plupart des scénarios, en particulier dans les scénarios axés sur l'électrification (les seules exceptions étant les scénarios SPF Behaviour, CORE 95 et Technology).

5.3. Secteur de l'énergie

Toutes les voies de décarbonation dans les scénarios de transition affichent une électrification croissante et une élimination progressive des sources d'énergie fossiles dans tous les secteurs, ce qui a un impact sur le secteur de l'énergie. Dans notre modèle, le secteur de l'énergie couvre le système d'approvisionnement en électricité, qui est détaillé dans les sections 5.3.1. et 5.3.2. Les nouveaux réseaux d'énergie sont détaillés dans la section 5.3.3.

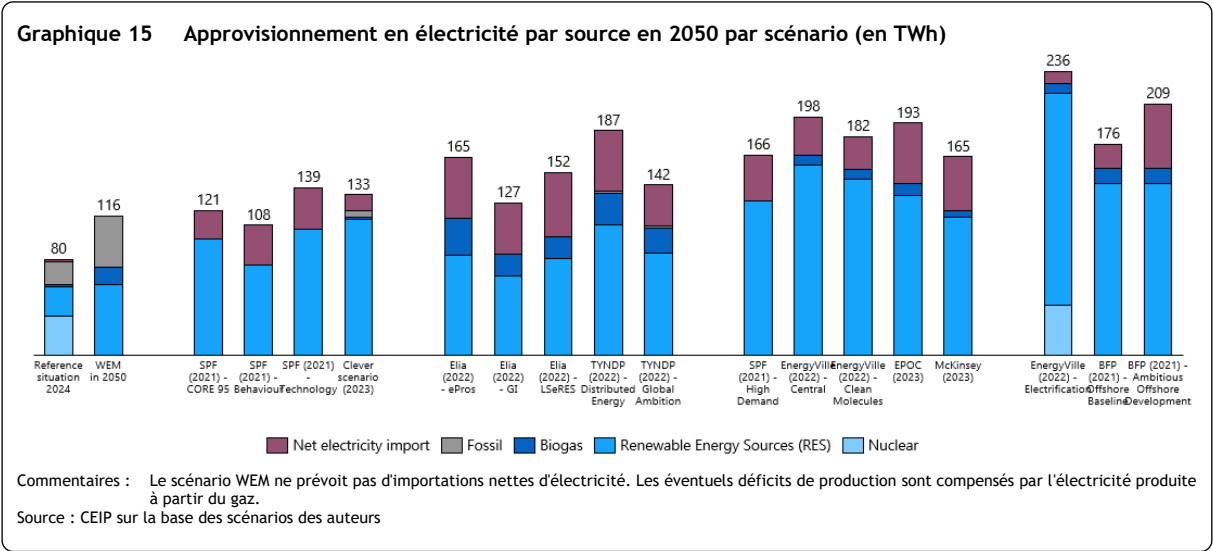
Tous les scénarios de transition prévoient l'élimination progressive des combustibles fossiles, de sorte qu'aucun investissement supplémentaire dans ce domaine n'est envisagé. Dans cet exercice, la transformation des actifs pétroliers en Belgique, tels que les raffineries, est considérée comme faisant partie du secteur industriel.

5.3.1. Approches « zéro net » pour le système d'approvisionnement en électricité

Dans notre analyse, le système d'approvisionnement en électricité comprend les actifs de production d'électricité (nouvelles capacités et renouvellement des capacités existantes), les réseaux de transport et de distribution d'électricité et les actifs de flexibilité³⁹.

³⁹ Tels que les batteries, les compteurs intelligents pour la gestion de la demande dans les bâtiments et les installations de pompage-turbinage.

Tous les scénarios reposent sur une augmentation significative de la demande annuelle d'électricité et des volumes d'approvisionnement par rapport à 2024.⁴⁰ La production d'électricité passe plus précisément de 80 TWh en 2024, à entre 108 et 236 TWh en 2050. Seul un scénario de transition, SPF Behaviour, aboutit à des volumes inférieurs à 116 TWh en 2050, le niveau projeté pour le scénario de référence WEM. Comme l'illustre le graphique 15, les scénarios de transition diffèrent par l'importance qu'ils accordent à l'utilisation de moyens de production flexibles et pilotables (principalement le biogaz) et par la mesure dans laquelle ils s'appuient sur les importations nettes en provenance des pays voisins.

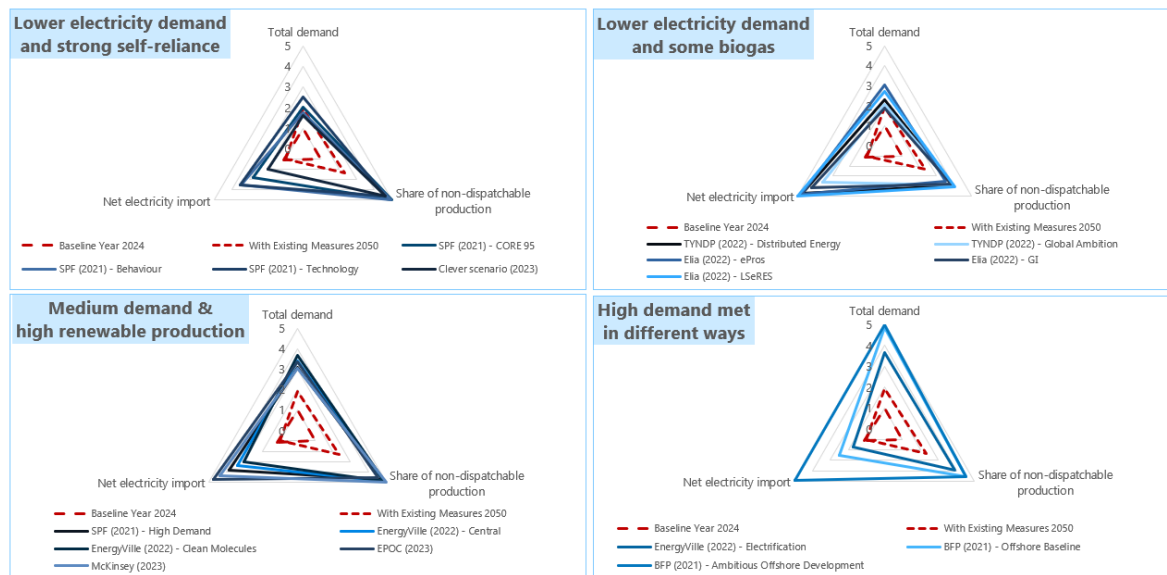


Nous avons choisi de classer les scénarios de décarbonation du système d'approvisionnement en électricité en fonction des trois paramètres abordés ci-dessus et dans la figure 15, qui sont représentatifs de la variété des approches :

- Volume de la demande totale : demande totale d'électricité exprimée en TWh.
- Dépendance à l'égard de la production flexible : rapport entre la production d'électricité à partir de sources flexibles et la production totale d'électricité, exprimé en %.
- Importations nettes : total de l'électricité importée moins total de l'électricité exportée, exprimé en TWh.

⁴⁰ La différence entre les volumes de la demande et de l'offre résulte des pertes techniques et de l'effacement de la production renouvelable (en anglais « curtailment »).

Figure 16 4 approches « zéro net » dans le secteur de l'énergie



Commentaires :

- 1) Les variables d'activité des scénarios en 2050 ont été comparées aux valeurs de 2024 et ce rapport a été normalisé pour montrer une échelle de 1 à 5 pour chaque variable.
- 2) La production offshore dans les hubs énergétiques internationaux avec des pays tiers dans les scénarios BFP est modélisée comme des volumes d'électricité importés. C'est pourquoi il apparaît dans le facteur « part d'électricité importée » plutôt que dans le facteur « part d'électricité non distribuée ». Les calculs CAPEX tiennent compte de cette capacité, tandis que les calculs OPEX considèrent les volumes comme des importations nettes.

Source : CEIP sur la base des scénarios des auteurs

La figure 16 permet de dégager quatre groupes distincts pour le système d'approvisionnement en électricité :

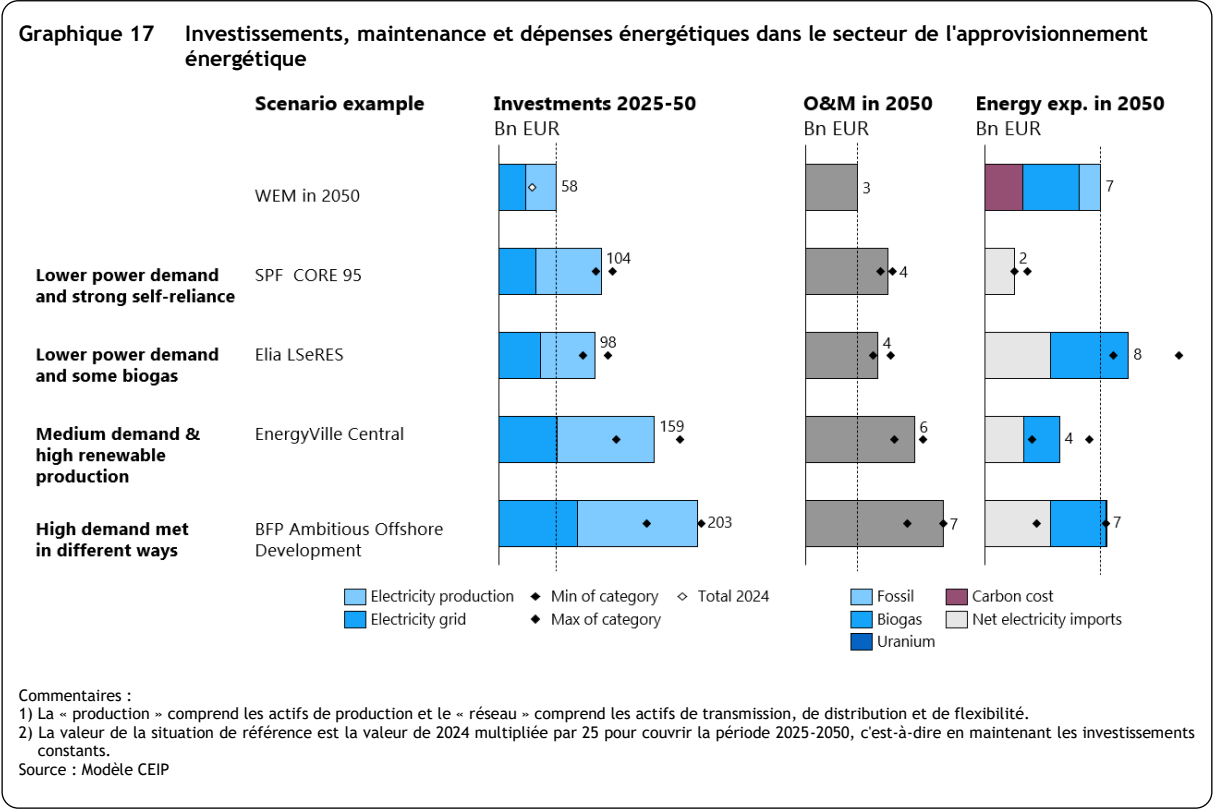
- Une demande d'électricité plus faible et une forte autosuffisance : Ces scénarios envisagent une transition avec une électrification accrue, mais avec des volumes de demande totale contenus. La production d'électricité provient presque entièrement de sources d'énergie renouvelables. La dépendance à l'égard de sources étrangères pour les vecteurs d'énergie gazeux ou les importations d'électricité reste limitée.
- Demande d'électricité plus faible et un peu de biogaz : Ces scénarios prévoient également des volumes de demande limités et dépendent plus fortement des importations. La part de la production flexible est plus importante et la production d'électricité à partir de biogaz est utilisée pour couvrir les périodes durant lesquelles la production renouvelable est insuffisante.
- Demande moyenne et production renouvelable élevée : Le troisième groupe affiche un volume annuel moyen d'approvisionnement en électricité en 2050 s'élevant à plus du double du volume de 2024. Ces scénarios s'appuient sur d'importantes capacités en matière de sources d'énergie renouvelables, sur une certaine production d'électricité à partir de biogaz et sur des importations nettes d'électricité en provenance des pays voisins.
- Une demande élevée satisfaite de différentes manières : Le dernier groupe est légèrement plus hétérogène et se caractérise principalement par des volumes d'offre et de demande d'électricité très élevés (plus de 200 TWh).

On notera que l'approche de la décarbonation du système d'approvisionnement en électricité n'est pas indépendante de la transition dans les autres secteurs. En effet, la demande et l'offre d'électricité sont étroitement liées à l'approche de la décarbonation dans les secteurs de la demande. Par conséquent, les besoins d'investissement totaux pour l'approvisionnement en électricité dépendent du degré d'électrification et des niveaux d'activité dans les secteurs des transports, des bâtiments et de l'industrie, ainsi que dans le secteur de la transformation de l'énergie (par exemple, la production de H2).

Pour chaque groupe de scénarios décrits ci-dessus, nous avons sélectionné un scénario représentatif dont les résultats seront présentés dans les sections suivantes.

5.3.2. CAPEX et OPEX de la décarbonation du système d'approvisionnement en électricité

Le graphique ci-dessous présente des investissements cumulés entre 2025 et 2050, ainsi que les coûts de maintenance et les dépenses énergétiques prévues en 2050. Les tableaux représentant les résultats des autres scénarios se trouvent à l'annexe 2.



Dans tous les scénarios, les investissements dans le secteur de l'électricité doivent augmenter massivement, en particulier pour les capacités de production, mais aussi pour l'expansion et le renforcement du réseau (voir graphique 17). En général, l'augmentation de la capacité de production est plus importante que l'augmentation des investissements dans le réseau. Pour les deux catégories, l'augmentation est largement corrélée à l'augmentation des volumes de la demande d'électricité.

Dans les scénarios de demande d'électricité plus faible, les investissements doivent doubler par rapport au scénario de référence WEM sur la période 2025-2050. Dans les scénarios de demande moyenne et élevée, la valeur est multipliée par trois à quatre. Pour l'ensemble des scénarios, les besoins en CAPEX vont de 85 à 206 milliards d'euros cumulés sur la période, soit une augmentation respective de 47% à 255% par rapport au scénario de référence WEM. Par rapport aux niveaux de 2024, cela représenterait 2,5 à 6 fois plus d'investissements en moyenne et par an pour l'ensemble du secteur de l'électricité.

Bien que le montant total des besoins d'investissement dans le secteur de la fourniture d'électricité ne soit pas la composante la plus importante du total des besoins d'investissement (voir la section suivante), leur augmentation par rapport aux niveaux actuels est très importante.

En ce qui concerne les dépenses énergétiques, trois principaux facteurs de coût entrent en jeu : le coût du carbone pour le scénario de référence WEM, les volumes d'importations nettes d'électricité et les volumes de production d'électricité à partir de biogaz dans le système totalement transitionné. Les projections pour les prix de gros de l'électricité (utilisés pour les importations nettes d'électricité) et pour les prix de gros du biogaz sont détaillées à l'annexe 3.2.

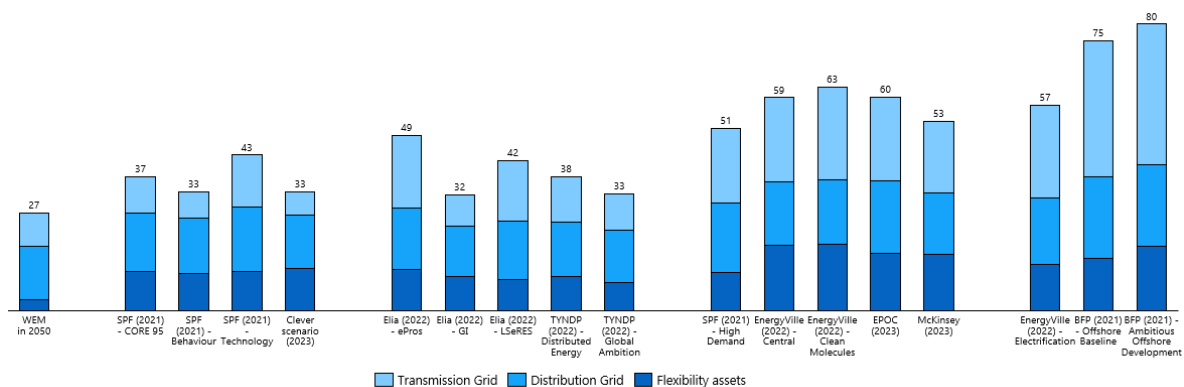
Dans le scénario de référence WEM, une partie de la production d'électricité flexible est encore d'origine fossile. Un coût du carbone couvrant soit les quotas d'émission, soit les installations de CSC est donc calculé, sur la base des projections des prix du carbone pour le système européen d'échange de quotas d'émission 1 (tous les détails figurent à l'annexe 3.2.).

Les dépenses énergétiques dans les scénarios de faible demande avec une forte autosuffisance sont inférieures à un tiers des dépenses dans le scénario de référence WEM. Dans ces scénarios, les dépenses énergétiques sont uniquement dues à l'importation d'électricité, car toute la production nationale est basée sur les énergies renouvelables. Les scénarios de demande plus faible avec le biogaz ont au contraire des dépenses énergétiques plus élevées en 2050 que le scénario de référence WEM. Cela s'explique par le fait que le prix de gros du biogaz est plus élevé dans ces scénarios de transition que les prix du gaz naturel plus les coûts du carbone dans le scénario de référence WEM. Les scénarios de demande moyenne et élevée affichent des dépenses énergétiques qui vont de la moitié de celles du scénario de référence WEM à des niveaux similaires à ceux du scénario de référence WEM.

Zoom sur les besoins d'investissement dans les actifs de réseau et de flexibilité

Dans toutes les approches de transition, des investissements supplémentaires dans le réseau électrique (réseau et flexibilité) sont fortement nécessaires (de +19% à +195%) par rapport au scénario de référence WEM. Les besoins d'investissement dans le réseau de transport et de distribution d'électricité sont largement déterminés par les volumes de production d'énergie renouvelable des scénarios.

Graphique 18 Besoins d'investissement dans le réseau et la flexibilité (moyenne annuelle de 2025 à 2050, en milliards d'euros)



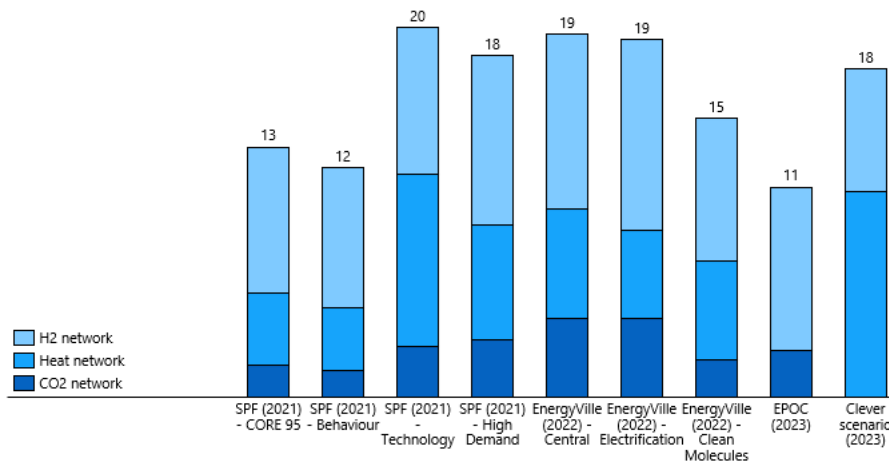
Source : Modèle CEIP

Si l'on additionne les dépenses annuelles moyennes en capital et les dépenses d'exploitation prévues en 2050 dans les différents scénarios de transition, et qu'on les rapporte à l'offre totale d'électricité, il est alors possible de se faire une idée approximative du coût global de l'électricité. Ce coût de l'électricité semble proche dans tous les scénarios et oscille autour de 0,095 euro par kWh. Pour plus de détails sur cette estimation approximative, nous vous renvoyons à l'annexe 1.2.

5.3.3. Nouveaux réseaux d'énergie

Nous avons pu modéliser, pour plusieurs scénarios, les besoins d'investissement dans les nouveaux réseaux d'énergie (CO₂, hydrogène et chaleur). Ces modélisations reposent sur les volumes attendus de production et/ou d'importation en Belgique. Lorsque les scénarios s'appuient sur ces réseaux, leurs dépenses d'investissement cumulées sur la période 2025-50 vont de 11 à 20 milliards d'euros, soit de 0,44 à 0,8 milliard par an en moyenne. Environ la moitié de ces investissements sont dus aux réseaux d'hydrogène (électrolyseurs, tuyaux - dont une partie est destinée à l'adaptation de conduites de gaz existantes - et un terminal d'importation/exportation). Viennent ensuite les réseaux de chaleur, pour lesquels les dépenses se répartissent entre les réseaux (tuyaux) et les échangeurs de chaleur dans les bâtiments. Les réseaux de chaleur industriels ne sont pas inclus ici mais sont supposés faire partie du secteur industriel. Enfin, les investissements dans les réseaux de carbone comprennent les dépenses liées aux tuyaux eux-mêmes, à la chaîne de valeur des exportations et à l'installation d'équipements de captage direct de carbone dans l'air (« Direct Air Capture assets », DACS). Les autres actifs de captage et de stockage du carbone (« Carbon Capture and Storage assets », CCS) ne sont pas inclus et font partie du secteur industriel.

Graphique 19 CAPEX dans les nouveaux réseaux d'énergie (cumulés de 2025 à 2050, en milliards d'euros)



Commentaires : aucun de ces réseaux n'est pris en compte dans un scénario WEM.
Source : Modèle CEIP

5.4. Secteur industriel

L'activité industrielle, plus particulièrement les industries manufacturières et les matériaux de construction, est une source importante d'émissions de GES en Belgique, représentant environ 35 millions de tonnes d'équivalent CO₂ en 2022⁴¹, soit 26% des émissions totales du pays.⁴² La plupart des émissions sont dues à la combustion de combustibles fossiles à des fins énergétiques ou à des processus émettant du carbone.

Les défis de compétitivité sont cruciaux dans le secteur industriel, et les acteurs industriels eux-mêmes sont confrontés à des choix difficiles lorsqu'il s'agit d'accélérer les investissements requis par la transition.

Seuls quelques scénarios de neutralité présentent une feuille de route détaillée pour la décarbonation de l'industrie belge. En effet, la modélisation des différentes options de transition et des besoins d'investissement correspondants pour le secteur de l'industrie est hasardeuse, car elle est sujette à des incertitudes élevées. Le secteur de l'industrie comprend une grande diversité d'activités. Outre les grands émetteurs (chimie, raffinerie, ciment, métallurgie, verre, calcaire, papier, alimentation), il existe des milliers de procédés industriels singuliers. Les industries disposent d'un grand nombre d'options différentes pour réduire leurs émissions de gaz à effet de serre, allant de l'électrification et du changement de combustible au développement de nouveaux processus, à la conception de produits ou de matériaux alternatifs, voire à l'arrêt de certaines activités. De plus, les données industrielles et les choix de décarbonation faits dans l'industrie sont souvent confidentiels. Les choix des entreprises industrielles sont discrétionnaires et obéissent à des dynamiques transnationales, telles que la concurrence mondiale, les réglementations internationales, la géopolitique, l'évolution des prix de l'énergie et des matériaux, etc.

⁴¹ Il s'agit des émissions provenant de l'utilisation de l'énergie dans les procédés industriels, des émissions des procédés eux-mêmes et des émissions provenant du raffinage et de la fabrication de combustibles solides.

⁴² Agence européenne pour l'environnement, 2024.

Nous nous appuyons donc sur les analyses existantes pour estimer les besoins d'investissement supplémentaires du secteur industriel. Une série d'études suivent une approche top down et fournissent un chiffre global pour le secteur :

- Dans son étude « net-zero » pour la Belgique de 2023,⁴³ McKinsey estime les besoins d'investissements supplémentaires dans l'industrie entre **25 et 40 milliards d'euros** cumulés jusqu'en 2050 ⁴⁴ pour atteindre une réduction des émissions dans l'industrie de 96%. L'étude prévoit que les principaux efforts seront réalisés dans les secteurs à fortes émissions tels que l'acier, l'éthylène et la production de ciment. Les leviers comprennent notamment le doublement des mesures d'efficacité énergétique, l'électrification à 90% de la chaleur à basse et moyenne température, l'utilisation du CCS, de l'hydrogène et des molécules vertes pour éliminer progressivement l'utilisation des combustibles fossiles.
- Une étude réalisée en 2020 par Deloitte et Climact⁴⁵ estime qu'un investissement supplémentaire de **12 à 18 milliards d'euros** est nécessaire d'ici 2050 pour réduire les émissions de GES de l'industrie en Flandre de 86% par rapport aux niveaux de 2005. Cette réduction fait appel à de nouveaux processus de production et à des produits utilisant des biocarburants, de l'hydrogène et de l'électricité au lieu de matières premières et de vecteurs énergétiques fossiles. Dans cette analyse, les investissements dans les technologies de captage du carbone représentent 2 à 8 milliards d'euros.
- En 2021, Bond Beter Leefmilieu et Climact ont publié une étude sur une réduction de 95% des émissions de GES pour l'industrie en Flandre.⁴⁶ L'étude estime les investissements nécessaires entre **12,5 et 13,7 milliards d'euros**. L'étude couvre uniquement la Flandre et se concentre principalement sur les secteurs de la chimie, de l'acier, de la céramique et du verre, du papier et de l'alimentation et des raffineries. Les principaux leviers utilisés sont une réduction des volumes produits dans la plupart des secteurs, en particulier dans le raffinage, et un passage à des technologies de production alternatives, en particulier pour les secteurs de la chimie, du papier et de l'agroalimentaire. L'étude suppose également des changements dans les vecteurs énergétiques utilisés dans certains processus (électrification et hydrogène) et l'utilisation de technologies de captage du carbone.

EnergyVille (2022) a calculé les dépenses d'investissement selon une approche bottom up pour ses scénarios de transition, respectivement Clean Molecules, Electrification et Central. Selon cette étude, les besoins cumulés d'investissements supplémentaires pour la transition de l'industrie belge se situent entre **10 et 13 milliards d'euros**.

Sur base de l'ensemble de ces estimations, nous obtenons une fourchette de **10 à 40 milliards d'euros** pour les besoins en investissements supplémentaires pour la décarbonation du secteur de l'industrie en Belgique d'ici 2050, ce qui correspond à entre 0,4 et 1,6 milliard d'euros par an.

⁴³ McKinsey & Company (2023)

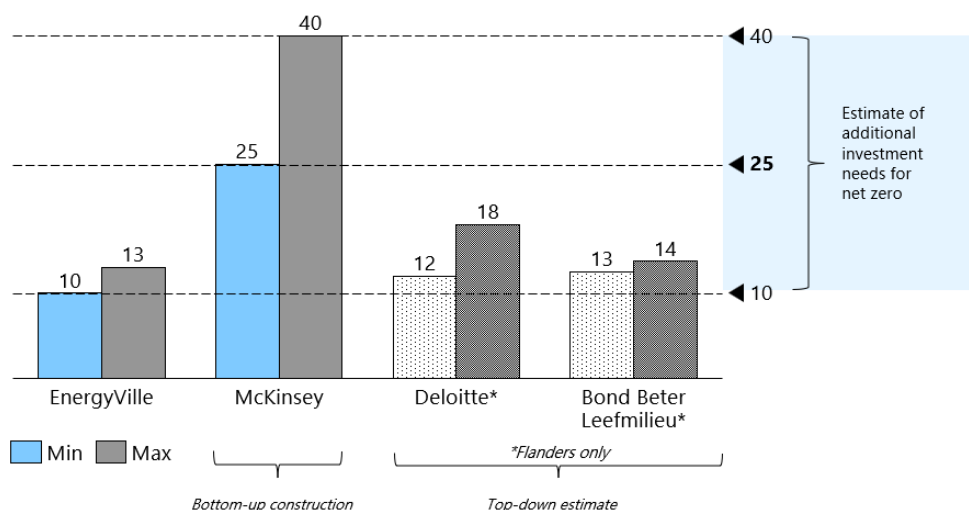
⁴⁴ L'étude mentionne un chiffre de 30 à 45 milliards d'euros, dont 5 milliards d'euros pour l'infrastructure des réseaux d'hydrogène et de carbone. Dans cette étude, ce phénomène a été modélisé dans le secteur de l'énergie. Nous excluons donc ce montant.

⁴⁵ Deloitte et Climact (2020)

⁴⁶ Bond Beter Leefmilieu et Climact (2021)

Bien que ces estimations soient faibles par rapport au besoins d'investissement totaux de tous les secteurs (voir le chapitre suivant), elles ne doivent pas être négligées. En effet, les investissements dans les bâtiments et les transports sont répartis sur l'ensemble de la population, alors que les investissements dans l'industrie reposent sur un nombre plus restreint d'entreprises (de même dans le secteur de l'énergie).

Graphique 20 Dépenses d'investissement supplémentaires cumulées pour le secteur industriel jusqu'en 2050 (en milliards d'euros)



Source : Analyse de CEIP basée sur les publications d'EnergyVille, de McKinsey & Company, de Deloitte et de Bond Beter Leefmilieu.

Toutes ces estimations reposent sur l'hypothèse de volumes de production stables dans toutes les industries (excepté pour Bond Beter Leefmilieu). Cela signifie qu'elles ne prévoient pas d'augmentation ou de diminution de la production dans les différentes industries en raison de l'évolution des modes de consommation induite par la transition (en raison de la réglementation, des subventions ou de la tarification du carbone) ou de nouvelles opportunités (par exemple, les industries biosourcées, le traitement des matières premières essentielles, l'économie circulaire ou les industries des technologies de décarbonation).

De plus, ces études ne couvrent pas les émissions de GES des services numériques. En Europe, les centres de données représentent à eux seuls quelque 3% de la consommation d'électricité et ce chiffre augmente rapidement.⁴⁷

⁴⁷ Connaissance des énergies (2024)

6. Agrégation des résultats

6.1. Introduction

Cette section aborde l'agrégation des dépenses d'investissements et des dépenses opérationnelles des scénarios développés par différents auteurs couvrant au moins les secteurs des bâtiments, du transport et de la production d'énergie.

Pour bien interpréter cette section, il faut noter les points suivants :

- Les scénarios disponibles à ce jour et utilisables (suffisamment détaillés et couvrant les secteurs principaux) sont relativement peu nombreux. **De plus, ces scénarios ont été élaborés dans leurs contextes technologiques et réglementaires, entre 2021 et 2024.** Comme ce contexte est en constante évolution, d'autres scénarios pourront et seront probablement proposés à l'avenir par différents auteurs.
- Ce rapport compare ces scénarios disponibles et exploitables **sans porter de jugement sur ceux-ci**, y compris leur pertinence. Le choix d'un scénario plutôt qu'un autre relève d'une décision sociétale/politique qui devra tenir compte de nombreux éléments non étudiés dans ce rapport.
- Les scénarios « zéro net » sont comparés tantôt à une situation de référence historique correspondant à l'année 2024, tantôt à un scénario de référence « avec mesures existantes » (WEM) visant à prendre en compte une série d'évolutions à politique inchangée jusqu'à l'horizon 2050. Il convient de garder à l'esprit que les choix qui sous-tendent l'élaboration de ce dernier influencent nécessairement toute comparaison avec les scénarios de décarbonation.
- Cette section présente **deux agrégations des dépenses d'investissement**. Une première agrégation intègre la **totalité des coûts de construction des nouveaux bâtiments passifs (ou à haute performance énergétique)**. La seconde agrégation, exploratoire à ce stade, n'intègre que leur **surcoût par rapport à un bâtiment à performance énergétique moyenne** (voir la section dédiée aux bâtiments). L'utilisation de ces deux agrégations est en ligne avec les différentes pratiques de la littérature⁴⁸ et permet une description riche et nuancée des résultats. Ainsi, la première agrégation sera plus pertinente pour apprécier les conséquences macro-économiques des différents scénarios et approche mieux le besoin en investissement pour la transition environnementale et d'autres enjeux sociétaux (tels que la sécurité énergétique, la pollution de l'air, la biodiversité, la congestion routière, etc.). La seconde est plus focalisée sur les investissements relatifs aux technologies de décarbonation. Elle n'a été appliquée qu'aux nouveaux bâtiments. Elle n'a pas été appliquée aux nouvelles voitures, l'autre grande catégorie de dépense d'investissements pour laquelle cette mesure serait également pertinente. Une telle application nécessiterait une

⁴⁸ Le rapport récent de la Banque centrale européenne, Occasional Paper Series n°367, "Investing in Europe's green future ; Green investment needs, outlook and obstacles to funding the gap" note à la page 13 que "les estimations diffèrent selon que l'on prend en compte l'intégralité des coûts d'un investissement vert ou seulement la différence par rapport à un investissement réalisé avec l'ancienne technologie. Par exemple, pour les véhicules électriques, les estimations de la Commission européenne et de l'I4CE incluent les coûts complets des véhicules électriques, tandis que l'AIE ne prend en compte que les coûts des batteries."

analyse plus détaillée, qui pourrait faire l'objet de travaux futurs, pour tenir compte notamment de la substitution entre les investissements en voitures personnelles et ceux en transports publics.

- On veillera par ailleurs à ne **pas interpréter les dépenses d'investissement et opérationnelles comme « les coûts » de la transition climatique**. En effet, les scénarios et les investissements qui les caractérisent ont toute une série de conséquences qui ne sont pas analysées ici. Il s'agit par exemple de leurs impacts macroéconomiques tels que leurs effets sur la croissance, l'emploi, l'inflation ou les finances publiques.

La section est organisée comme suit. Nous commençons par comparer les niveaux d'investissement correspondant aux différents scénarios. Nous abordons ensuite la question des dépenses opérationnelles qui découlent de ces différents investissements.

6.2. Scénarios et dépenses d'investissements : comparaison de leurs niveaux et compositions

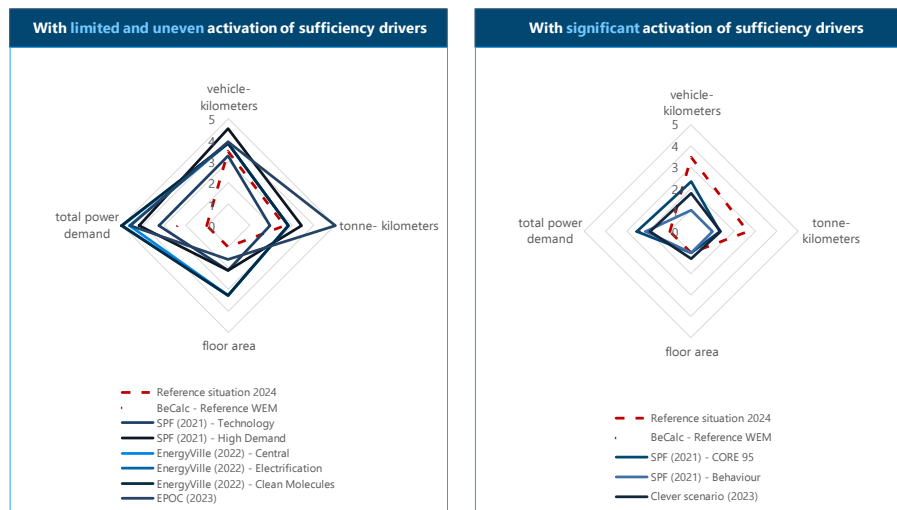
6.2.1. Approches « zéro net » à travers les secteurs

Les analyses sectorielles (voir les sections précédentes) ont regroupé les scénarios en fonction des leviers de décarbonation qui les différencient le plus pour chaque secteur. Les scénarios ont en commun, pour l'ensemble des secteurs, de recourir à de nombreux leviers d'efficacité énergétique (isolation des bâtiments et installation de pompes à chaleur) et d'utilisation d'énergie non fossile notamment par l'électrification (véhicules, pompes à chaleur, sources d'énergie renouvelables et renforcement des réseaux électriques).

Toutefois, **ces scénarios se distinguent très nettement en fonction du recours plus ou moins important à la modération de la croissance, voire la baisse de certains volumes d'activité, tels que les nouvelles constructions ou encore les kilomètres parcourus en voiture personnelle** (par exemple, l'utilisation accrue du co-voiturage ou des transports en commun), ou au transfert de certaines activités (transfert modal par exemple). La mise en œuvre de ces leviers a ensuite un impact majeur sur la capacité nécessaire du système énergétique, notamment électrique. La littérature utilise le terme de sobriété (« sufficiency » en anglais) pour ces leviers.

La figure 21 regroupe les différents scénarios étudiés en fonction de leur recours à des leviers de sobriété. D'un côté, des scénarios mettent peu en œuvre de leviers qui limitent les volumes d'activité (tels que le nombre total de kilomètres véhicules ou la surface totale des bâtiments) ou utilisent ces leviers de manière inégale. Ces scénarios supposent généralement que ces activités croissent par rapport à 2024 (ligne discontinue rouge), mais moins rapidement que le scénario à politique inchangée (WEM ; ligne pointillée rouge). De l'autre côté, des scénarios tels que « Clever » ou « SPF Behaviour » activent bien plus ces leviers, et supposent que les activités diminuent par rapport à 2024 (kilomètres véhicules ou kilomètres tonnes) ou restent pratiquement inchangées (la surface totale des bâtiments), malgré la croissance démographique.

Figure 21 Illustration de regroupements de scénarios en fonction de la prégnance de leviers de sobriété



Source : CEIP sur la base des scénarios des auteurs

Certains scénarios, en particulier ceux qui ont largement recours aux leviers de sobriété, ont été construits par leurs auteurs de manière à intégrer, à l'enjeu de la réduction des émissions de gaz à effet de serre, d'autres enjeux sociétaux distincts mais directement liés (approche systémique). Ces auteurs considèrent qu'il en va ainsi par exemple des indicateurs relatifs au nombre de voitures qui ont un effet sur la pollution de l'air, y compris lorsque les véhicules sont décarbonés, ou encore de la réduction du nombre de nouvelles constructions (baisse de l'artificialisation des sols) qui peut réduire la consommation de ressources naturelles et soutenir la préservation de la biodiversité⁴⁹.

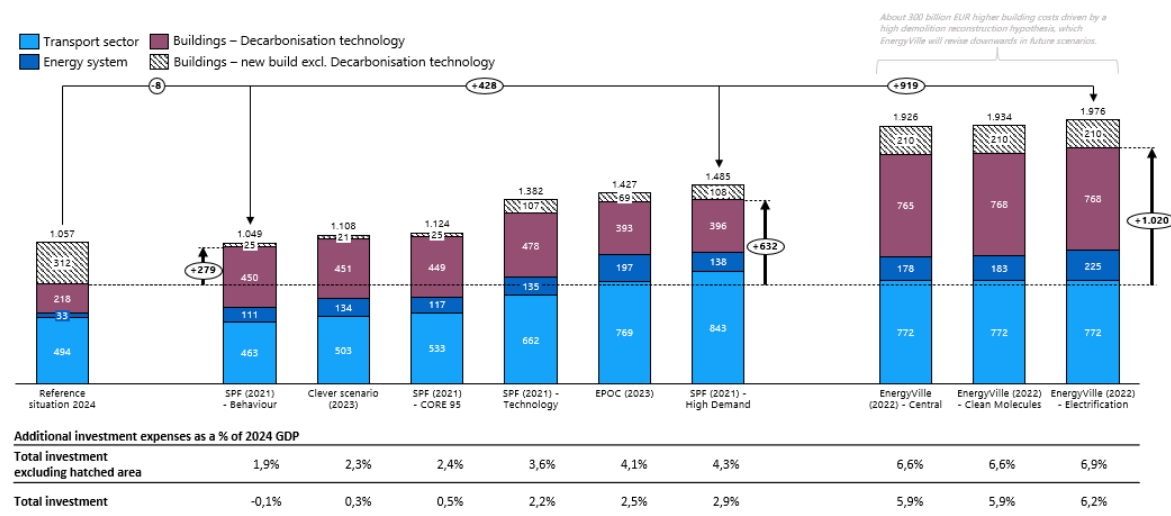
6.2.2. Dépenses d'investissement (CAPEX)

Comme indiqué dans l'introduction (ainsi que la section dédiée aux bâtiments), l'utilisation de deux mesures de dépenses d'investissement relatif aux bâtiments vise à distinguer les dépenses liées exclusivement aux technologies de décarbonation (dépenses de rénovation et, pour les nouveaux bâtiments, surcoût des technologies de décarbonation par rapport aux alternatives carbonées) des dépenses liées à la construction de nouveaux bâtiments en dehors de ces surcoûts (fondations, gros œuvre, techniques non décarbonées, finitions).

Les figures 22 et 23 regroupent l'ensemble des dépenses en investissement (CAPEX) détaillées dans les sections précédentes pour les trois secteurs étudiés sur l'ensemble de la période.

⁴⁹ Pour le scénario "Clever", voir par exemple : "Enfin, le type de changements profonds envisagés ne peut être évalué uniquement sur la base de critères relatifs à la demande et à l'offre d'énergie ainsi qu'aux émissions de gaz à effet de serre. Les transformations sont susceptibles d'avoir des implications beaucoup plus systémiques sur d'autres questions environnementales (biodiversité, utilisation des sols, épuisement des matériaux, etc.) ainsi que sur des questions sociales, économiques et sociétales. Bien que ces aspects ne soient pas directement couverts par la quantification modélisée dans le scénario CLEVER, le scénario a été construit avec une préoccupation constante pour une durabilité aussi forte." (source: CLEVER (2023) "Climate neutrality, Energy security and Sustainability: A pathway to bridge the gap through Sufficiency, Efficiency and Renewables", June 2023, p.9.); pour les différents scénarios SPF (2021) scénarios, voir par exemple pp 9-10 de SPF (2021), "Scenarios for a climate neutral Belgium by 2050", de même que la description des impacts sur les sols, la demande de matériaux, la pollution de l'air, etc. dans la même publication; voir également Climact (2021), "Etude sur les besoins d'électrification de la mobilité en Belgique et les impacts qui y sont liés", Décembre 2021 pour les enjeux liés à la décarbonation de la mobilité dans le cadre de ces mêmes scénarios.

Graphique 22 Dépenses d'investissement par scénario sur l'ensemble de la période considérée (2025-2050) par rapport à 2024, (en milliards d'euros)



Commentaires :

- 1) La valeur 2024, pour comparaison avec une situation où l'enveloppe d'investissement serait maintenue constante, est obtenue en multipliant 25 fois l'investissement 2024.
- 2) L'estimation du PIB pour 2024 est de 591 milliards d'euros, extraite du PIB 2023 de 585 milliards d'euros du SPF Économie (2024) et de la projection de croissance de 1,1% du BFP (2024).
- 3) L'estimation du PIB pour 2025-2050 est de 737 milliards d'euros, tirée du rapport sur le vieillissement du Bureau fédéral du Plan (2024).

Source : Modèle CEIP

En premier lieu, on observe que des niveaux d'investissement potentiellement très importants devront être mobilisés d'ici 2050. En effet, les scénarios de décarbonation étudiés conduisent à un niveau d'investissement (CAPEX) total moyen sur la période égal ou le plus souvent supérieur à celui observé en 2024, et ce, quelle que soit l'agrégation des investissements utilisée. Les niveaux d'investissement peuvent s'élever jusqu'à un montant de l'ordre de 40 milliards d'euros supplémentaires par an en moyenne par rapport à 2024.

En deuxième lieu, on observe une grande différence du niveau d'investissement entre les scénarios. Cette différence du niveau d'investissement entre les scénarios s'explique principalement par le degré d'utilisation des leviers de sobriété. En effet, la réduction de volume d'une série d'activités (dont la réduction du nombre de véhicules privés et la baisse du nombre de mètres carrés construits) conduit à limiter, potentiellement très sensiblement, le niveau total des investissements correspondant à ces scénarios.

Il faut noter que les trois scénarios EnergyVille, datant de 2022, supposent un taux particulièrement élevé de démolition-reconstruction des bâtiments, ce qui augmente fortement leurs niveaux de dépenses d'investissement (voir ci-dessous). Cela contribue à la grande différence constatée de niveau des dépenses d'investissement entre les scénarios. De nouveaux scénarios en développement par les mêmes auteurs réviseront cette hypothèse significativement à la baisse, de sorte que les dépenses en investissements qui y seront liées baisseront considérablement⁵⁰.

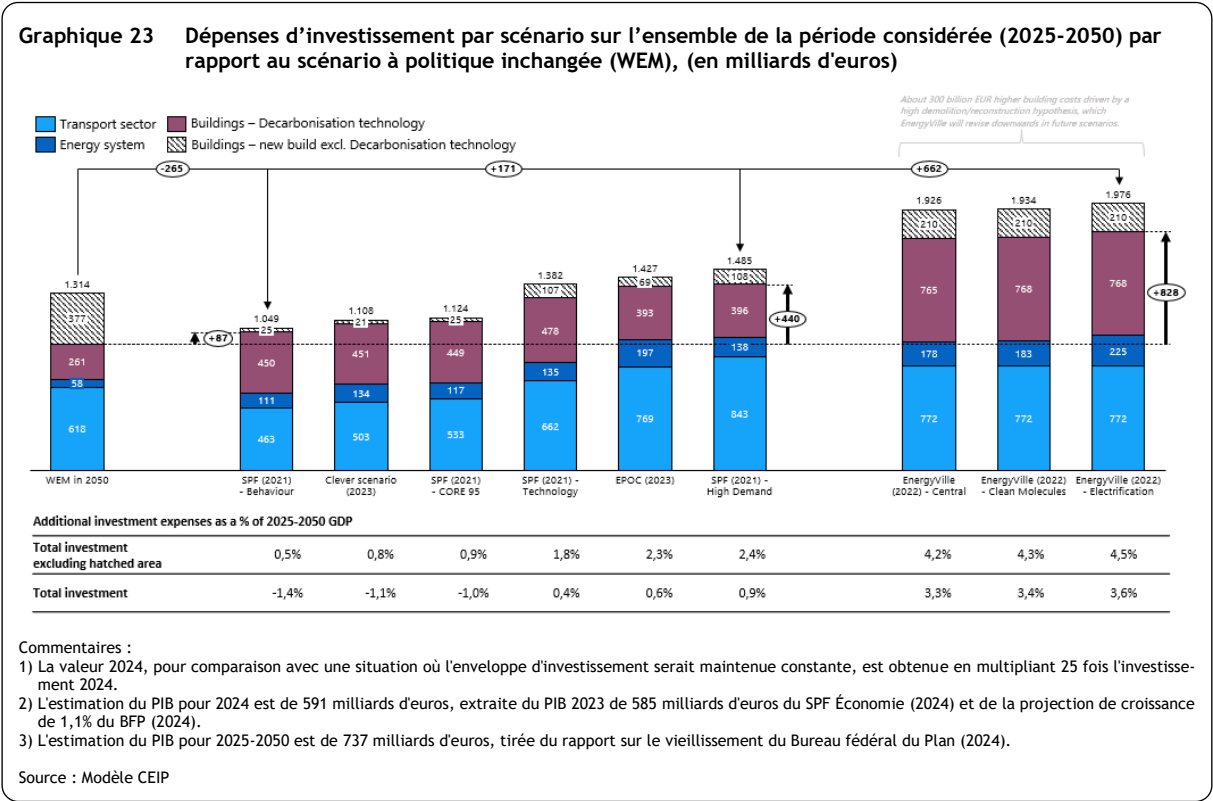
⁵⁰ Le taux de démolition-reconstruction retenu est de 1,15% par an. Ce taux devrait être révisé vers des valeurs de l'ordre de 0,2%. Ce changement modifiera significativement l'évaluation des dépenses en investissement pour les bâtiments étant donné que le coût d'une rénovation est largement inférieur à celui d'une démolition-reconstruction.

En faisant abstraction de ces trois scénarios pour la raison évoquée ci-dessus, les dépenses additionnelles en investissement par rapport à l’heure actuelle, l’année 2024, se présentent comme suit.

- Dans le haut de la fourchette, les investissements supplémentaires s’élèvent à 25 milliards d’euros (4,3% du PIB) en moyenne annuelle ; ce chiffre est ramené à 17 milliards d’euros (2,9% du PIB) en raison d’une diminution des investissements non liés aux technologies de décarbonisation dans le secteur du bâtiment (voir le scénario « SPF High Demand »).
- En bas de la fourchette, les scénarios qui utilisent le plus les leviers de suffisance montrent une augmentation de 11 milliards d’euros (1,9% du PIB) en moyenne annuelle ; ce chiffre est ramené à presque zéro en raison de la réduction des investissements non liés aux technologies de décarbonisation dans le secteur du bâtiment (voir le scénario « SPF Behaviour »).

Toutefois, le scénario à politique inchangée (WEM) suppose déjà une augmentation des dépenses d’investissement. Comparer les dépenses d’investissement par rapport à ce scénario WEM permet dès lors d’apprécier le besoin de prendre de nouvelles mesures politiques. Pour cette comparaison, les deux formes d’agrégation des dépenses d’investissement doivent être prises en compte (voir plus haut).

Si on se réfère à la deuxième approche d’agrégation des investissements (qui n’intègre, pour les bâtiments neufs, que le surcoût des technologies de décarbonation), on constate également que tous les scénarios étudiés conduisent à un niveau d’investissement (CAPEX) total moyen supérieur par rapport au WEM, sur l’ensemble de la période (ligne horizontale continue).



Si on se fonde sur la première approche d'agrégation⁵¹ des investissements, il faut également tenir compte des dépenses liées à la construction de nouveaux bâtiments en dehors de leurs surcoûts de décarbonation (partie hachurée dans les graphiques 23 et 24). Comme tous les scénarios tablent sur une moindre augmentation des nouveaux mètres carrés que le WEM, ces dépenses sont inférieures à celles du WEM pour tous les scénarios. Ainsi, les dépenses d'investissement dans les nouvelles constructions hors technologies de décarbonation s'élevaient à 12 milliards d'euros en 2024 et à 15 milliards d'euros en moyenne annuelle dans le scénario de référence. Dans les scénarios de décarbonation, ce montant est réduit vers un niveau allant de 8 milliards d'euros (Energyville) à 1 milliard d'euros (SPF Behaviour). **Pour les scénarios de sobriété qui réduisent le plus les nouveaux mètres carrés par rapport au scénario WEM, cet effet joue plus fortement, au point que leurs niveaux d'investissement total sont inférieurs à ceux du WEM.**

En troisième lieu, la composition des investissements change au niveau de chaque secteur.

- **Dans le secteur de la production d'énergie**, tous les scénarios de décarbonation étudiés envisagent une **hausse drastique des besoins en investissements**. Cette hausse est liée à l'augmentation de la demande en électricité, au changement du mix énergétique en faveur de sources décarbonées et au développement nécessaire des réseaux et de la gestion de l'intermittence. Elle constitue une augmentation comprise entre 3 et 8 milliards en moyenne annuelle par rapport à la situation de 2024 (une augmentation d'un facteur 3 à 7) et entre 2 et 7 milliards par rapport au scénario de référence (une augmentation d'un facteur 2 à 4).
- **Au niveau du secteur des transports**, plusieurs effets sont à l'œuvre. D'une part, **l'achat de véhicules décarbonés a tendance à augmenter les coûts d'investissement** liés au remplacement des véhicules. D'autre part, selon les scénarios, une partie de cette mobilité est transférée vers les moyens de transport collectifs (rail ou bus principalement). Ces derniers nécessitent des dépenses en investissements additionnels conséquents mais qui s'avèrent toutefois moindres que la baisse qu'ils engendrent en termes d'investissement dans des véhicules individuels. Enfin, dans certains scénarios, la demande de mobilité individuelle est réduite ou transférée vers des modes doux, ce qui a pour effet de réduire directement les dépenses d'investissement. Au final, **les scénarios qui ont peu ou pas recours au transfert modal et à la réduction de la mobilité conduisent à des dépenses d'investissement jusqu'à 71% supérieures au niveau de 2024 et 36% supérieure au scénario de référence. Les scénarios qui s'appuient fortement sur les leviers de transfert et de réduction de la demande de mobilité conduisent quant à eux, dans ce secteur, à une diminution de 6% par rapport à 2024 et une baisse de 25% des dépenses d'investissement par rapport au scénario de référence.**
- **Au niveau du secteur du bâtiment**, on observe un glissement, voire **un basculement, des dépenses d'investissement, des nouveaux bâtiments hors technologies de décarbonation** (cf. parties hachurées des figures 1 et 2) **vers les dépenses d'investissement de décarbonation des nouveaux bâtiments et, surtout, des bâtiments existants**, en ce y compris la démolition-

⁵¹ Pour rappel, la première approche d'agrégation porte sur les besoins totaux d'investissement dans le secteur du bâtiment. Ces estimations incluent les dépenses totales de construction de nouveaux bâtiments, y compris les technologies de décarbonation ainsi que les fondations, le gros œuvre, les finitions, etc.

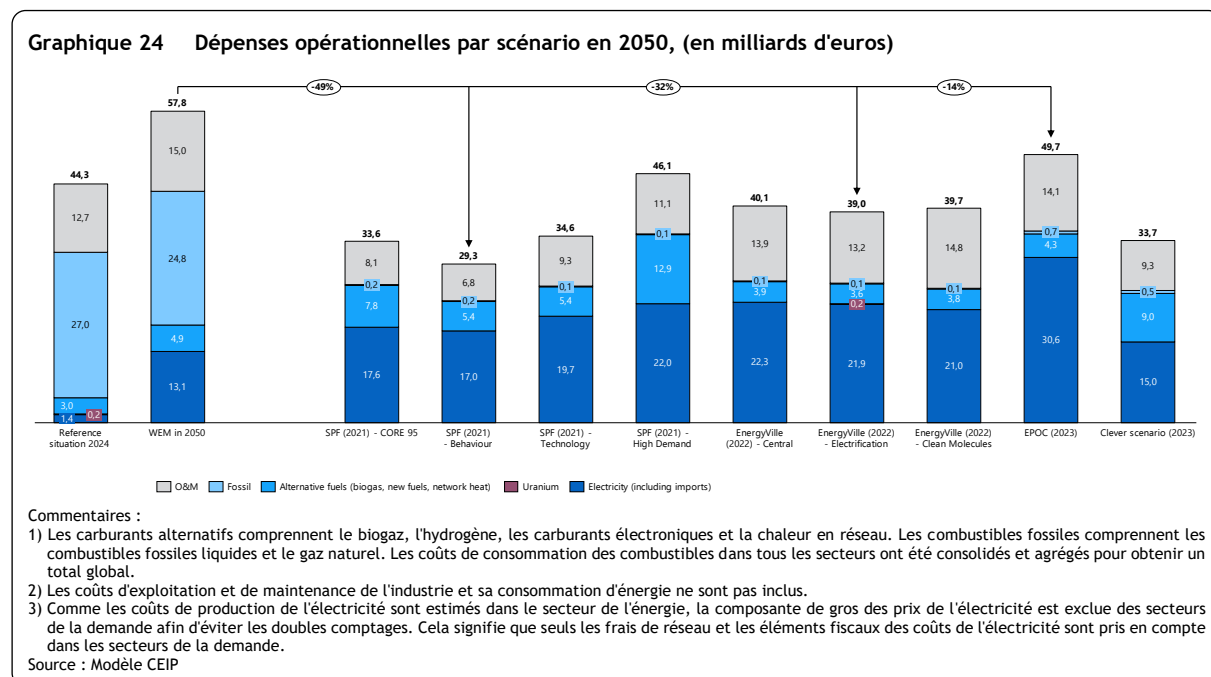
reconstruction. Ces dépenses en rénovation des bâtiments existants et de décarbonation des nouveaux bâtiments augmentent considérablement dans tous les scénarios. Elles augmentent d'un niveau compris entre 7 milliards d'euros pour le scénario « High Demand », 10 milliards d'euros pour le scénario « SPF Technology » et même jusqu'à 22 milliards d'euros pour les scénarios « Energyville », en moyenne annuelle par rapport à la situation de 2024. On rappellera toutefois que les scénarios « Energyville », qui déterminent le haut de la fourchette décrite ci-avant, sont caractérisés par des dépenses d'investissement particulièrement élevées en raison de l'hypothèse d'un niveau de démolition-reconstruction particulièrement élevé.

Pour rappel, le secteur industriel n'a pas pu être modélisé en détail, et nous renvoyons à des études spécifiques sur ce sujet (voir la section industrie), qui estiment les besoins d'investissement supplémentaires pour décarboner de l'industrie belge d'ici 2050, dans une fourchette allant de **10 à 40 milliards d'euros** (entre 0,4 et 1,6 milliard d'euros par an). Cette fourchette doit être ajoutée aux résultats présentés ci-dessus afin d'obtenir une image plus complète des investissements supplémentaires totaux.

Il est à noter que les niveaux d'investissements additionnels dégagés de ces études semblent relativement faibles par rapport aux dépenses d'investissement supplémentaires dans les autres secteurs. Toutefois, cela ne signifie pas que ces montants ne sont pas significatifs au niveau d'une branche ou d'une entreprise spécifique.

6.2.3. Les dépenses opérationnelles (OPEX)

La figure 24 reprend les coûts opérationnels, y compris de combustibles ou source d'énergie primaire, en 2050, c'est-à-dire au moment où la neutralité climatique est atteinte.



On observe que, dans tous les scénarios de décarbonation, les dépenses d'investissement augmentent mais que les coûts opérationnels diminuent, par rapport au scénario de référence WEM. Par rapport

à la situation historique, seuls deux scénarios (SPF High Demand et EPOC) contiennent plutôt que diminuent les coûts opérationnels.

Cela s'explique par la combinaison de deux facteurs.

D'abord, de **nombreux leviers de décarbonation consistent à réaliser des investissements permettant de réduire la demande d'énergie**. Il s'agit par exemple de l'isolation des bâtiments ou encore du transfert modal ou de l'efficacité énergétique permise par l'électrification de véhicules.

De plus, du côté de l'offre, l'électrification accrue s'appuie sur **un recours massif aux énergies renouvelables qui sont plus intensives en capital que leurs alternatives carbonées**. Les scénarios de décarbonation conduisent donc à une baisse drastique des coûts opérationnels (OPEX) liés à l'usage des énergies carbonées. Même si le prix de l'électricité et, en particulier, celui des carburants synthétiques pourraient s'avérer plus élevés que celui des combustibles carbonés, leur coût total est généralement moindre que celui de ces derniers en raison des volumes réduits.

7. Investissement public et politiques publiques : pistes pour des travaux futurs

Les scénarios analysés reposent chacun sur un ensemble de leviers de décarbonation. Ils ne modélisent ni ne supposent la mise en œuvre de politiques publiques spécifiques. Néanmoins, l'intervention publique est indispensable à la mobilisation des investissements analysés dans cet exercice.

Pour rappel, ce rapport constitue une première phase du travail visant à identifier les besoins en investissement. Une deuxième phase consisterait à analyser ces différents types d'intervention publique sous l'angle de l'investissement public. À ce stade, nous balayons cinq niveaux auxquels une telle intervention pourrait avoir lieu.

Premièrement, une série d'investissements de transition doivent être planifiés et financés directement par les administrations publiques. Il s'agit en particulier de secteurs pour lesquels les pouvoirs publics, qu'il s'agisse du niveau fédéral, régional, communautaire ou local, possèdent des actifs concernés. On pensera en premier lieu aux bâtiments publics, qu'il s'agisse de bureaux d'administrations, d'écoles ou encore de logements sociaux par exemple. Des investissements conséquents doivent être planifiés et leur financement public devra être assuré.

En deuxième lieu, comme le Comité d'étude l'a établi,⁵² l'intervention publique en termes d'investissements peut prendre toute une série d'autres formes, dont (i) les aides à l'investissement, (ii) les prises de participation et prêts, (iii) les partenariats public-privé et (iv) la régulation publique d'infrastructure financée par des capitaux privés. Ces quatre formes d'intervention doivent pouvoir être mobilisées dans le cadre de la transition climatique. Certaines d'entre elles recouvrent une dimension de planification stratégique, comme par exemple les infrastructures de transport collectif ou encore les réseaux énergétiques, dont les réseaux émergents tels que ceux relatifs au transport de l'hydrogène ou du carbone. D'autres investissements, plus décentralisés, doivent potentiellement être soutenus ou guidés, en particulier lorsqu'ils ne sont pas rentables sur le plan individuel (ménage ou entreprise). Le choix de la palette des instruments à retenir devra reposer sur l'arsenal de mesures déjà en place à différents niveaux ainsi que sur les enjeux distributifs et de compétitivité sous-jacents. Les implications en termes de finances publiques pourront varier très significativement selon le choix retenu.

En troisième lieu, si la mise en œuvre de leviers de sobriété est retenue, une série de politiques publiques doivent être adoptées. Dans certains cas, il s'agit d'investissements publics déjà balisés, tels que ceux relatifs au transport public visant à favoriser le transfert modal et réduire la part de la voiture dans les déplacements. Dans d'autres cas, il s'agit d'investissements ou de politiques spécifiques, par exemple en termes d'aménagement du territoire ou encore d'économie circulaire.

En quatrième lieu, quel que soit le scénario retenu, des investissements dans du capital humain doivent également être mobilisés. En effet, le glissement de toutes une série d'activités entre secteurs et surtout à l'intérieur des différents secteurs implique des réallocations en matière d'emploi et surtout de compétences. L'acquisition et la mise à niveau des compétences repose en partie sur les pouvoirs publics.

⁵² Voir CEIP (2024), Les investissements publics : définition et rôle, section 2.2, encadré 2

Enfin, même si cet aspect n'a pas pu être pris en compte dans le cadre de cet exercice, des investissements en matière d'adaptation aux changements du climat devront être consentis. Dans certains cas, il s'agit de nouveaux types d'investissements, comme par exemple dans les infrastructures de gestion de l'eau, dont la plus grande partie est collectivisée et doit donc être visée par une intervention publique. Dans d'autres cas, certains investissements d'adaptation sont liés aux investissements de transition, tels que ceux relatifs à la surchauffe des bâtiments ou aux infrastructures de transport de personnes, de marchandises ou d'énergie.

En outre, une mise à jour de cette étude pourrait utilement intégrer des scénarios supplémentaires ou des révisions des scénarios actuellement examinés, par exemple, à la lumière de l'accord du gouvernement fédéral de 2025.

Bibliographie

- Agence internationale de l'énergie. (2021). Feuille de route « Net Zero » : Une voie mondiale pour atteindre l'objectif de 1,5 °C. AIE. Extrait de <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- Agence internationale de l'énergie. (2024). Perspectives énergétiques mondiales 2024. AIE. Extrait de <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>
- Banque nationale de Belgique. (2024). Climate dashboard, printemps 2024. Extrait de <https://www.nbb.be/en/publications-and-research/economic-and-financial-publications/climate-dashboard>
- BloombergNEF. (2024). Nouvelles perspectives énergétiques 2024. BloombergNEF. Extrait de <https://about.bnef.com/new-energy-outlook>
- Bond Beter Leefmilieu et Climact. (2021). Een groene industriële revolutie: Hoe creëren we een klimaatneutrale Vlaamse industrie? (Une grande révolution industrielle : Comment créer une industrie flamande respectueuse de l'environnement ?) Extrait de <https://www.bblv.be/artikel/bbl-berekent-zo-wordt-vlaamse-industrie-sneller-klimaatneutraal>
- Bureau fédéral du Plan. (2020). Carburant pour l'avenir : plus de molécules ou électrification profonde du système énergétique belge d'ici à 2050. D. Devogelaer, document de travail 4-20. Extrait de <https://www.plan.be/fr/publications/fuel-future-more-molecules-or-deep-electrification>
- Bureau fédéral du Plan. (2021). Bon vent : mettre le cap sur un système énergétique belge neutre sur le plan climatique. D. Devogelaer et D. Gusbin, document de travail 8-21. Extrait de <https://www.plan.be/en/publications/bon-vent-setting-sail-climate-neutral-belgian>
- Bureau fédéral du Plan. (2024). Perspectives énergétiques de la Belgique: politique annoncée. Federaal Planbureau/Bureau Fédéral du Plan. Extrait de <https://www.plan.be/fr/publications/perspectives-energetiques-de-la-belgique-politique>
- CEIP. (2024). Les investissements publics : définition et rôle – Cadre de référence du Comité d'étude sur les investissements publics. Dépôt légal : D/2024/11.691/ 2.
- CEIP. (2024). État des lieux de l'investissement public en Belgique 2024. Dépôt légal : D/2024/11.691/12.
- Climate Change Committee. (2023). Investir pour un Royaume-Uni dûment adapté. CCC. Extrait de <https://www.theccc.org.uk/wp-content/uploads/2023/01/Investment-for-a-well-adapted-UK-CCC.pdf>
- Clever. (2023). Neutralité climatique, sécurité énergétique et durabilité : une voie pour combler le fossé par la suffisance, l'efficacité et les énergies renouvelables. Clever. Extrait de <https://clever-energy-scenario.eu/#:~:text=The%20CLEVER%20scenario&text=CLEVER%20evaluates%20the%20potential%20of,with%20a%20100%25%20renewable%20mix>

- CNC-NKC. (2023). Projections 2050. Commission Nationale Climat/Nationale Klimaatcommissie. Extrait de www.cnc-nkc.be/fr/projections-2050-novembre-2023
- Commission européenne. (2019). Vue d'ensemble des dépenses et des coûts des infrastructures de transport. A. Schroten, et al. Office des publications de l'Union européenne, Luxembourg, 870. Extrait de <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/7ab899d1-a45e-11e9-9d01-01aa75ed71a1>
- Commission européenne. (2024). Rapport d'analyse d'impact : Objectif climatique de l'Europe pour 2040 et voie vers la neutralité climatique d'ici 2050 - Construire une société durable, juste et prospère. Document de travail des services de la Commission, février. Commission européenne. Extrait de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2024%3A63%3AFIN>
- Commission européenne. (2024). L'avenir de la compétitivité européenne : Analyse approfondie et recommandations (rapport Draghi). Extrait de https://commission.europa.eu/document/download/97e481fd-2dc3-412d-be4c-f152a8232961_en
- Commission nationale sur le climat. (2023). Plan national belge pour l'énergie et le climat. CNC. Extrait de <https://www.nationalenergyclimateplan.be/ec-courtesy-translation-be-necp-draft-update.pdf>
- Connaissance des énergies. (2024). Qui dit numérique, dit zéro énergie ? Connaissances des énergies. Extrait de <https://www.connaissancedesenergies.org/idees-recues-energies/qui-dit-numerique-dit-zero-energie>
- Deloitte, VUB et Climact. (2020). Transitiepotentieel van de Vlaamse industrie, Roadmapstudie en Ontwerp van transitiekader (Potentiel de transition de l'industrie flamande, Étude de la feuille de route et projet de cadre de transition). Deloitte, VUB et Climact. Extrait de <https://www.moonshotflanders.be/sites/moonshot/files/docs/Transitiepotentieel-van-de-Vlaamse-industrie-Roadmapstudie-en-Ontwerp-van-transitiekader.pdf>
- Données Mondiales. (n.d.). Trafic en Belgique. Données Mondiales. Tiré de <https://www.donneesmondiales.com/europe/belgique/trafic.php>, supposé constant dans tous les scénarios.
- Elia. (2021). Feuille de route vers le zéro net : La vision du groupe Elia sur la construction d'un système énergétique européen climatiquement neutre d'ici 2050. Elia. Extrait de https://www.elia.be/-/media/project/elia/shared/documents/elia-group/publications/studies-and-reports/20211203_roadmap-to-net-zero_en.pdf
- Elia. (2023). Étude d'adéquation et de flexibilité pour la Belgique 2024-2034. Elia. Extrait de <https://www.elia.be/en/electricity-market-and-system/adequacy/adequacy-studies>
- Elia. (2024). Ébauche du système électrique belge pour 2035-2050. Elia. Extrait de https://www.elia.be/en/press/2024/09/20240924_elia-publishes-blueprint-for-the-belgian-electricity-system-2035-2050

- EnergyVille. (2023). Scénarios pour une Belgique neutre en carbone d'ici 2050. PATHS2050. Extrait de https://perspective2050.energyville.be/sites/energyoutlook/files/inline-files/Full-Fledged%20Report_1.pdf
- EnergyVille. (2024). Scénarios pour une Belgique climatiquement neutre d'ici 2050. PATHS2050. Extrait de <https://energyville.be/en/blogs/a-paths2050-shift-scenario-towards-a-climate-neutral-2050-for-belgium-what-role-can-low-energy-demand-play/>
- EPOC. (2023). Scénarios à faible teneur en carbone pour la Belgique : aperçu d'un modèle de système énergétique tri-régional. A. Moglianesi, et al., Extrait de <https://orbi.umons.ac.be/bitstream/20.500.12907/47359/1/2.2.1%20Moglianesi%20A.%20Das%20P.%20Coppens%20L.%20et%20al%20TIMES%20final%20report.pdf>
- France Stratégie. (2023). Incidences économiques de la transition climatique en France. France Stratégie. Extrait de <https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/2023-incidences-economiques-rapport-pisani-5juin.pdf>
- Gouvernements fédéral et régionaux belges. (2023). Projet de mise à jour du Plan National Énergie et Climat belge 2021-2030 (PNEC 2023). SPF Santé et les gouvernements régionaux. Extrait de <https://climat.be/doc/pnec-2023-projet-actualisation.pdf>
- Gouvernement fédéral. (2024). Vision Rail 2040. Ministère de la mobilité. Extrait de <https://gilkinet.belgium.be/sites/default/files/articles/Vision%20Rail%202040.pdf>
- Institut Rousseau. (2024). En route vers le zéro net : Comblent le fossé de l'investissement vert. Institut Rousseau. Extrait de <https://institut-rousseau.fr/road-2-net-zero/>
- Institute for Climate Economics. (2024). Rapport sur le déficit d'investissement dans le domaine du climat en Europe : Une voie d'investissement pour l'avenir de l'Europe. I4CE. Extrait de <https://www.i4ce.org/en/publication/european-climate-investment-deficit-report-investment-pathway-europe-future/>
- International Renewable Energy Agency. (2023). Perspectives sur les transitions énergétiques dans le monde en 2023 : voie 1,5°C. IRENA. Extrait de <https://www.irena.org/Publications/2023/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook-2023>
- JRC. (2023). Biocarburants avancés dans l'Union européenne : Rapport de situation sur le développement technologique, les tendances, les chaînes de valeur et les marchés. Centre commun de recherche. Extrait de https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC135082/JRC135082_01.pdf
- McKinsey & Company. (2023). Zéro net ou croissance ? Comment la Belgique peut avoir les deux. McKinsey. Extrait de <https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/net-zero-or-growth-how-belgium-can-have-both>

- Nerlich, Carolin and Köhler Ulbrich, Petra and Andersson, Malin and Pasqua, Carlo and Abraham, Laurent and Bańkowski, Krzysztof and Emambakhsh, Tina and Ferrando, Annalisa and Grynberg, Charlotte and Groß, Johannes and Hoendervangers, Lucia and Kostakis, Vasileios and Momferatou, Daphne and Rau-Göhring, Matthias and Rariga, Judit and Rusinova, Desislava and Setzer, Ralph and Spaggiari, Martina and Tamburrini, Fabio and Vendrell, Josep Maria and Vinci, Francesca. (2025). Investing in Europe's Green Future: Green Investment Needs, Outlook and Obstacles to Funding the Gap. ECB Occasional Paper No. 2025/367. Disponible via SSRN: <https://ssrn.com/abstract=5088767> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5088767>
- RBC. (2020). Stratégie de réduction de l'impact environnemental du bâti existant en Région de Bruxelles-Capitale aux horizons 2030-2050. Région de Bruxelles-Capitale. Extrait de https://environnement.brussels/sites/default/files/user_files/strategie_reno_fr.pdf
- RBC. (2022). Plan de déploiement des bornes de chargement en Région de Bruxelles-Capitale. Région Bruxelles-Capitale. Extrait de https://electrify.brussels/sites/default/files/2022-12/electrify_plan_de_deploiement_des%20bornes.pdf
- Service Public de Wallonie. (2020). Stratégie wallonne de rénovation énergétique à long terme du bâtiment. Service Public de Wallonie, Territoire, Logement, Patrimoine, Energie. Extrait de <https://developpementdurable.wallonie.be/sites/default/files/resources/strategie-wallonne-a-long-terme-pour-la-renovation-energetique-des-batiment.pdf>
- Service Public de Wallonie. (2022). Plan de déploiement des bornes de chargement en Wallonie. Service Public de Wallonie. Extrait de <https://energie.wallonie.be/fr/24-11-2022-plan-de-deploiement-des-bornes-de-chargeement-en-wallonie.html?IDC=8187&IDD=167737>
- Service Public Fédéral Mobilité et Transports. (2022). Le réseau belge des voies maritimes en mer du Nord. Service Public Fédéral Mobilité et Transports. Extrait de <https://mobilit.belgium.be/fr/navigation/navigation-mer-du-nord-belge/routes-maritimes-mer-du-nord/le-reseau-belge-des-voies>
- SPF Santé. (2019). Plan énergie climat 2030. Service Public Fédéral Santé Publique/Federale Overheidsdienst Volksgezondheid. Extrait de https://document.environnement.brussels/opac_css/electrify/plan_energie_climat_klimaatplan_2030_fr
- SPF Santé. (2021). Scénarios pour une Belgique climatiquement neutre d'ici 2050. Service Public Fédéral Santé Publique/Federale Overheidsdienst Volksgezondheid. Extrait de <https://climat.be/doc/climate-neutral-belgium-by-2050-report.pdf>
- SPF Santé. (2024). Le paysage de la tarification et de la taxation du carbone et de l'énergie en Belgique. Service Public Fédéral Santé Publique/Federale Overheidsdienst Volksgezondheid. Extrait de <https://klimaat.be/doc/the-landscape-of-carbon-and-energy-pricing-and-taxation-in-belgium-2024.pdf>
- TYNDP. (2022). Rapport sur les scénarios, plan décennal de développement du réseau. ENTSOG et ENTSO-E. Extrait de <https://2022.entsos-tyndp-scenarios.eu/>

Vlaamse regering (Gouvernement flamand). (2021). Arrêté du gouvernement flamand sur l'infrastructure de recharge des véhicules électriques. Vlaamse regering (Gouvernement flamand). Extrait de https://assets.vlaanderen.be/image/upload/v1653993308/CPT_2021_1217_VR_DOC_15712_BVR_drz3yz_fmh8ve.pdf

Vlaamse regering (Gouvernement flamand). (2020). Langetermijnstrategie voor de renovatie van Vlaamse gebouwen 2050 (Stratégie à long terme pour la rénovation des bâtiments flamands d'ici 2050). Vlaamse regering (Gouvernement flamand). Extrait de <https://www.vlaanderen.be/veka/energie-en-klimaatbeleid/vlaamse-langetermijnrenovatiestrategie-voor-gebouwen-2050>