

HEC Montréal

Effets des infrastructures sur la soutenabilité budgétaire

par

Quentin Winstel

Pierre-Carl Michaud

Directeur de Mémoire

**Sciences de la gestion
(Spécialisation Économie Appliquée)**

*Mémoire présenté en vue de l'obtention
du grade de maîtrise ès sciences en gestion*

(M.Sc.)

Juillet 2025

© Quentin Winstel, 2025

Remerciements

Il me tient à cœur de remercier les nombreuses personnes qui m'ont épaulé pendant toute la durée de ce projet de mémoire.

J'aimerais d'abord remercier mon directeur de mémoire, Pierre-Carl Michaud pour ses enseignements en programmation, ses conseils lors de la rédaction du mémoire, mais aussi pour l'ensemble des opportunités de recherche offertes durant ma maîtrise. Son accompagnement a joué un rôle déterminant dans la poursuite de mon parcours en économie publique et en économie urbaine.

Un grand merci également aux membres de la Chaire de recherche Jacques-Parizeau François Laliberté-Auger, Yann Décarie, Nicholas-James Clavet, Xavier Dufour-Simard, David Boisclair et Lee Boyle pour leur accompagnement et leurs conseils durant la réalisation de ce mémoire.

Merci aux doctorants Antoine Audet-Fortin et Nicolas Pinsonneault pour leur aide précieuse sur des sujets divers.

Un remerciement également à l'ensemble des chercheurs et économistes du Ministère des Finances du Québec et de Statistique Canada pour avoir répondu à mes nombreuses demandes de précision.

Je termine en exprimant ma gratitude envers mes amis et ma famille, dont le soutien constant a joué un rôle crucial dans mon parcours et a largement contribué à mon développement.

Résumé

Le cadre budgétaire du Québec n'intègre pas explicitement la dynamique des infrastructures, qu'il s'agisse de leur volume, de leur état ou de la nature des investissements. Cette omission complique l'évaluation de l'état des finances publiques et la prise de décisions optimales en matière d'investissements dans les infrastructures. Or, la dégradation des immobilisations publiques s'apparente à une dette qui sera supportée par les générations futures. Par conséquent, ce mémoire vise à construire un modèle qui tient compte de deux effets des infrastructures sur la soutenabilité budgétaire : (1) l'effet de la distinction entre le maintien et la bonification sur la valeur des infrastructures et (2) l'effet de la valeur des infrastructures sur la croissance économique.

Les résultats suggèrent que les effets sont faibles, principalement en raison des faibles répercussions économiques associées aux infrastructures. Si la stratégie actuelle du Gouvernement du Québec paraît structurellement intenable en raison de la dégradation de l'état des infrastructures, elle peut être budgétairement soutenable à condition de conserver un solde primaire positif et substantiel durant les prochaines années. Néanmoins, seule une refonte en profondeur des investissements en matière de volume, de distribution selon leur nature et de répartition selon les classes d'infrastructures permettrait de répondre simultanément aux enjeux de soutenabilité budgétaire et de tenabilité structurelle.

Mots clés : Infrastructure, soutenabilité budgétaire, tenabilité structurelle, maintien, bonification, élasticité du PIB à la valeur des infrastructures, dépréciation.

Méthode de recherche : Modèle de projection déterministe d'endettement avec générations d'actifs.

Abstract

Quebec's budgetary framework does not explicitly account for the dynamics of public infrastructure, whether in terms of volume, condition, or the nature of investments. This omission makes it more difficult to assess the state of public finances and to make optimal decisions regarding infrastructure investments. However, the deterioration of public capital resembles a form of debt that will be borne by future generations. Therefore, this thesis sets out to develop a model that better captures two key effects of infrastructure that influences fiscal sustainability: (1) the effect of the distinction between maintenance and enhancement on infrastructure value, and (2) the effect of infrastructure value on economic growth.

The results suggest that the gap between the scenarios with and without infrastructure effects is negligible, mainly due to the limited economic impact of infrastructure. While the current fiscal strategy of the Québec Government appears structurally unsustainable given the ongoing deterioration of public infrastructure, it could remain fiscally sustainable if a positive and substantial primary balance is maintained in future years. However, only a fundamental rethinking of investments in terms of volume, distribution by nature, and allocation across infrastructure classes would simultaneously address the challenges of budgetary sustainability and structural viability.

Keywords: Public infrastructure, fiscal sustainability, structural viability, maintenance, enhancement, GDP elasticity to infrastructure value, depreciation.

Research method: Deterministic debt projection model with asset generation dynamics.

Tables des matières

Remerciements	i
Résumé	ii
Abstract	iii
Tables des matières.....	iv
Liste des tableaux	vi
Liste des figures	vii
Liste des abréviations	ix
1. Introduction	1
2. Revue de littérature	9
2.1 Modèles de soutenabilité budgétaire	9
2.2 Liens entre la valeur des infrastructures et la croissance économique.....	10
2.3 Liens entre la nature des investissements et la valeur des infrastructures	14
2.4 Études relatives à la conjonction des effets.....	16
3. Contexte	18
3.1 Cadre légal des finances publiques et des infrastructures	18
3.2 État des finances publiques et des infrastructures	19
4. Exposition du modèle.....	22
4.1 Présentation de la structure du modèle.....	22
4.2 Calibration du modèle	30
5. Résultats	39
5.1 Effet de la valeur des infrastructures sur la croissance économique	39

5.2	Effet de la distinction entre le maintien et la bonification sur la valeur des infrastructures.....	42
5.3	Effets conjoints.....	46
6.	Limites et opportunités.....	58
7.	Conclusion.....	62
A.	Bibliographie.....	64
B.	Annexes.....	xii
B.1.	Sources de données pour le modèle	xiii
B.2.	Choix de l'Indice des prix de la construction de bâtiments institutionnels.....	xiv
B.3.	Choix de la croissance réelle de long terme du PIB potentiel.....	xv
B.4.	Choix du facteur de transition	xvi
B.5.	Transformation et utilisation des équations de l'âge.....	xvii
B.6.	Correspondance des fonctions de dépréciation	xix
B.7.	Code pour le modèle déterministe.....	xx

Liste des tableaux

Tableau 1 : Évolution de la dette ayant servi à financer les immobilisations au Canada.....	4
Tableau 2 : Évolution de la part des infrastructures en bon ou très bon état au Québec	6
Tableau 3 : Évolution du DMA au Québec (en pourcentage du PIB nominal)	6
Tableau 4 : Élasticité du PIB à la valeur des infrastructures pour des zones développées	11
Tableau 5 : Modification de la classification des infrastructures	32
Tableau 6 : Ratios de maintien et de bonification selon le PIB nominal pour l'année 2023	34
Tableau 7 : Estimation du capital des nouvelles classes d'infrastructures en 2024 (en millions de dollars nominaux).....	35
Tableau 8 : Estimation de la bonification cumulé historiquement par classe jusqu'en 2020 (en millions de dollars nominaux).....	36
Tableau 9 : Choix du niveau de dépréciation géométrique	37
Tableau 10 : Estimation des facteurs de l'âge pour la dépréciation tenant compte du maintien....	37
Tableau 11 : Évolution de la dette nette pour différents soldes primaires selon différentes implémentations des effets (en pourcentage du PIB nominal).....	53
Tableau 12 : Évolution de l'état des infrastructures par classe	56
Tableau 13 : Part de la croissance des infrastructures attribuable à chaque classe	57
Tableau 14 : Sources de données.....	xiii
Tableau 15 : Évolution de l'inflation provenant de l'Indice des prix à la consommation et de l'Indice des prix de la construction de bâtiments institutionnels	xiv
Tableau 16 : Évolution de la croissance réelle, du facteur de croissance réelle des infrastructures sur la croissance du PIB et de la croissance réelle de long terme du PIB potentiel	xv
Tableau 17 : Évolution du facteur de transition	xvi

Liste des figures

Figure 1 : Évolution de la dette brute de pays développés (en pourcentage du PIB nominal)	2
Figure 2 : Évolution de la dette brute et du solde primaire au Québec (en pourcentage du PIB nominal).....	3
Figure 3 : Évolution des investissements prévus des PQI (en millions de dollars nominaux)	5
Figure 4 : Évolution de la cote de crédit du Québec	20
Figure 5 : Évolution des dépenses de programmes (en pourcentage du PIB nominal).....	20
Figure 6 : Évolution du service de la dette du Québec (en pourcentage du revenu consolidé)	21
Figure 7 : Évolution de la valeur nominale des infrastructures avec croissance réelle des infrastructures négative pour différentes élasticités du PIB à la valeur des infrastructures en l'absence des facteurs de productivité du maintien en réduction de l'âge réel (en pourcentage du PIB nominal).....	40
Figure 8 : Évolution de la valeur nominale des infrastructures avec croissance réelle des infrastructures positive pour différentes élasticités du PIB à la valeur des infrastructures en l'absence des facteurs de productivité du maintien en réduction de l'âge réel (en pourcentage du PIB nominal).....	41
Figure 9 : Évolution de la valeur nominale des infrastructures pour différents facteurs de d'efficacité du maintien à ralentir l'âge réel en l'absence de l'élasticité du PIB à la valeur des infrastructures (en pourcentage du PIB nominal)	43
Figure 10 : Évolution de la valeur nominale des infrastructures pour différentes distributions des investissements selon leur nature en l'absence de l'élasticité du PIB à la valeur des infrastructures (en pourcentage du PIB nominal).....	46
Figure 11 : Évolution de la dette nette pour différentes élasticités du PIB à la valeur des infrastructures en présence des facteurs de productivité du maintien en réduction de l'âge réel (en pourcentage du PIB nominal).....	49

Figure 12 : Évolution de la dette nette pour différents facteurs de productivité du maintien en réduction de l'âge réel en présence de l'élasticité du PIB à la valeur des infrastructures (en pourcentage du PIB nominal).....	51
Figure 13 : Évolution de la dette nette pour différents soldes primaires selon différentes implémentations des effets (en pourcentage du PIB nominal).....	53
Figure 14 : Évolution de l'âge moyen et de l'âge moyen réel des classes d'infrastructures	55
Figure 15 : Correspondance de la dépréciation tenant compte du maintien avec la dépréciation géométrique pour les nouvelles classes d'infrastructures (en niveau de dépréciation).....	xix

Liste des abréviations

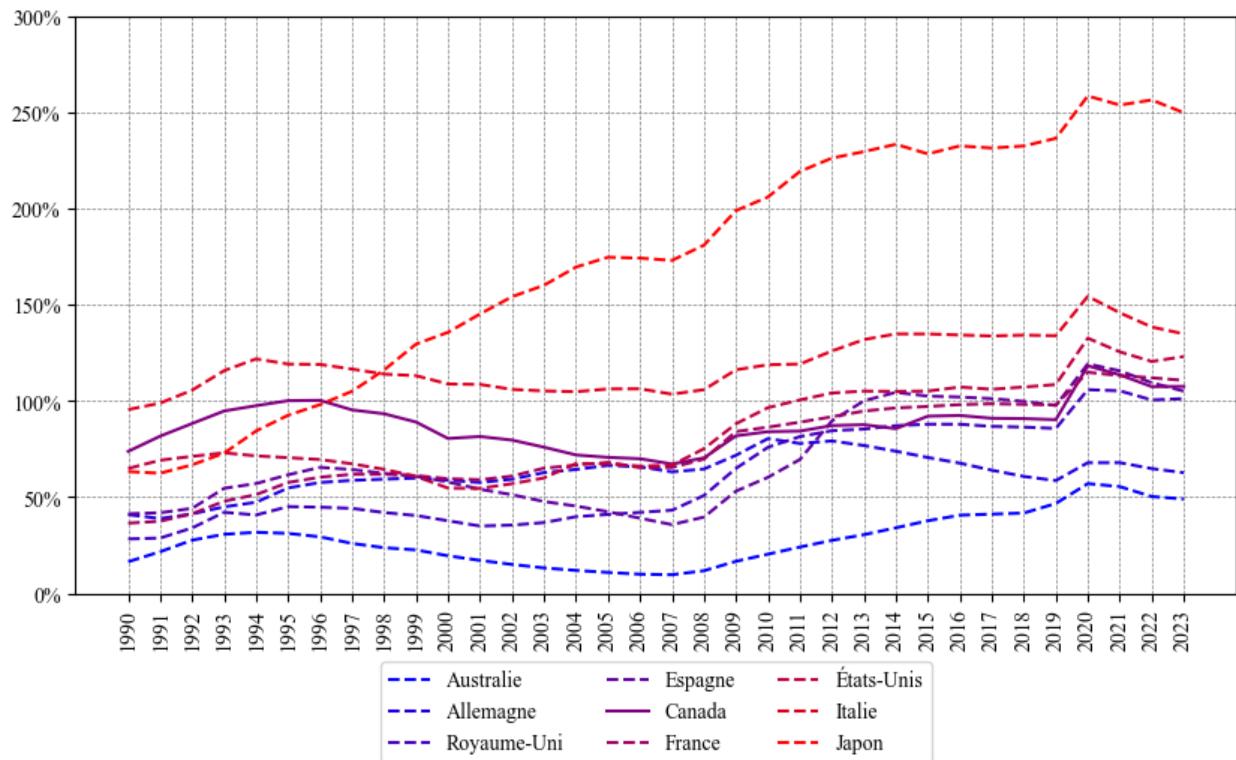
DMA	Déficit de Maintien d'Actifs
PIB	Produit Intérieur Brut
PQI	Plan Québécois des Infrastructures

1. Introduction

Le bon état des finances publiques favorise la continuité des missions et des engagements d'un gouvernement. L'état des finances publiques est évalué par de nombreux indicateurs relatifs aux investissements, à la crédibilité, à la stabilité, à la responsabilité fiscale et à la marge de manœuvre budgétaire des gouvernements. Parmi ces indicateurs, la soutenabilité budgétaire se concentre sur l'évolution de l'endettement en poursuivant l'atteinte d'un niveau de dette en proportion du Produit Intérieur Brut (PIB) qui se stabilise au fil du temps (Blanchard *et al.*, 1990). La soutenabilité budgétaire exige donc une cohérence dans la gestion des flux financiers et une capacité d'adaptation aux chocs économiques pour réduire le risque d'une crise de la dette. Malgré l'attention portée par de nombreux pays développés à cet objectif, les niveaux de dette brute en proportion du PIB nominal demeurent, dans plusieurs cas, historiquement élevés.¹ Le Japon se distingue notamment par une augmentation continue de son ratio, atteignant près de 250 % en 2023. De manière moins marquée, la France et l'Italie présentent également une trajectoire haussière quasi ininterrompue depuis les années 1990, avec une accélération notable à partir de la crise financière mondiale de 2008. Aux États-Unis, l'augmentation de la dette publique s'effectue par paliers successifs, traduisant un recours récurrent à la relance budgétaire comme instrument de stabilisation conjoncturelle face aux chocs économiques majeurs. À l'inverse, certains pays affichent une capacité à contenir, voire à réduire, leur endettement public. L'Allemagne illustre cette dynamique en parvenant à ramener son ratio sous la barre des 70 % du PIB nominal avant la pandémie de COVID-19. L'Australie se distingue également par une trajectoire particulièrement prudente, ayant maintenu un niveau d'endettement systématiquement inférieur à 60 % jusqu'en 2019. Le Canada, quant à lui, a amorcé un redressement notable à partir du milieu des années 1990, réduisant son ratio d'environ 100 % à un niveau stabilisé autour de 80 % dans les années 2010, avant une remontée modérée observée après 2020 (voir Figure 1).

¹ La dette brute correspond à la somme des dettes, des passifs liés aux instruments financiers dérivés et du passif net des régimes de retraite et des autres avantages sociaux futurs (Gouvernement du Québec, 2007b).

Figure 1 : Évolution de la dette brute de pays développés (en pourcentage du PIB nominal)

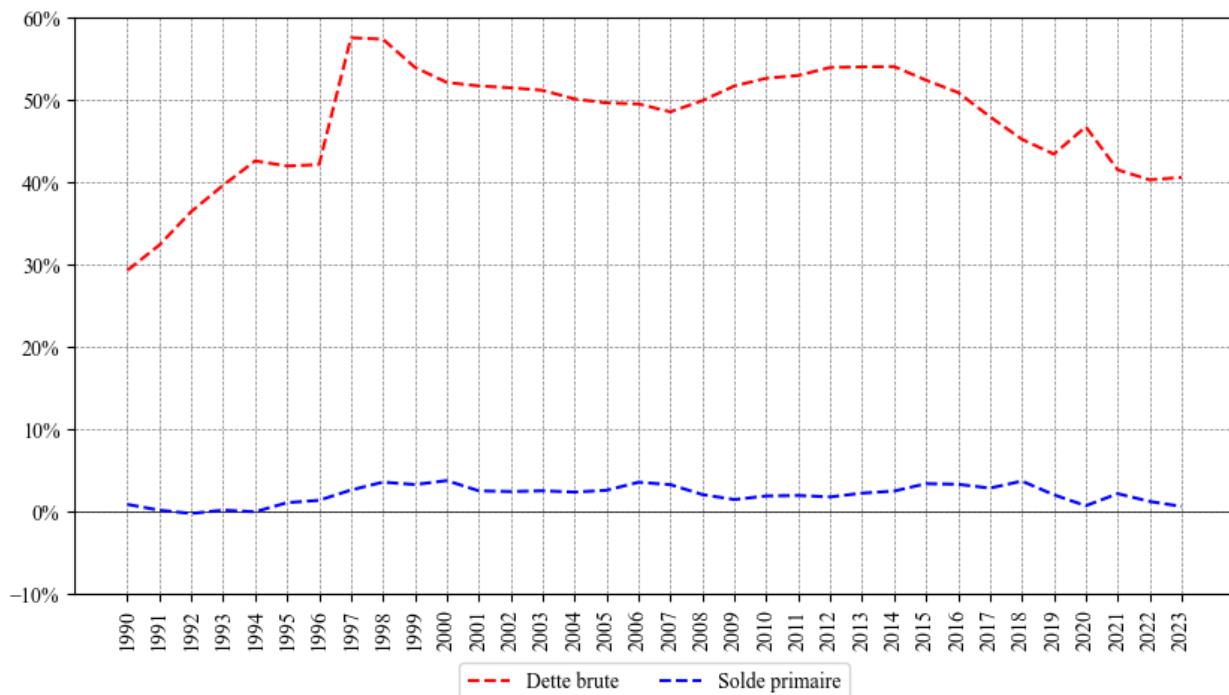


Source : Fonds Monétaire International (2025).

Le Québec s'illustre aussi dans sa maîtrise du niveau d'endettement public au cours des dernières décennies. Après avoir connu un pic à la fin des années 1990, le ratio de dette brute en proportion du PIB nominal a amorcé une baisse significative jusqu'en 2008, portée par une croissance économique soutenue et des efforts de rigueur budgétaire. Cette trajectoire favorable a toutefois été interrompue par la crise financière mondiale qui a entraîné une remontée du ratio entre 2008 et 2014. Une nouvelle phase de consolidation s'est ensuite engagée à partir de 2014, se traduisant par une diminution progressive de l'endettement jusqu'en 2022, à l'exception de l'année 2020 durant laquelle le ratio a temporairement augmenté en raison des mesures exceptionnelles mises en place pour faire face à la pandémie mondiale. Toutefois, cette dynamique de réduction semble marquer un essoufflement. Une reprise à la hausse du ratio est observée en 2023, et les projections budgétaires indiquent une poursuite de cette tendance en 2024 et 2025 sous l'effet de déficits anticipés élevés (Gouvernement du Québec, 2025a). Parallèlement, les soldes primaires

positifs des dernières années demeurent insuffisamment élevés pour permettre une inversion de la trajectoire ascendante de la dette provinciale (voir Figure 2).²

**Figure 2 : Évolution de la dette brute et du solde primaire au Québec
(en pourcentage du PIB nominal)**



Sources : Gouvernement du Canada (2024), Ministère des Finances du Québec (2024b) et Statistique Canada (2024c).

Or, l'accroissement de l'endettement peut susciter des inquiétudes légitimes dans la mesure où il favorise l'émergence d'un cercle vicieux. En effet, l'insoutenabilité budgétaire entraîne non seulement une augmentation des coûts d'emprunts qui pèse davantage sur les dépenses gouvernementales, mais aussi une augmentation de l'incertitude des agents économiques qui résulte dans un ralentissement économique par la baisse des investissements et de la consommation. Le niveau de dette en proportion du PIB est donc susceptible d'augmenter mécaniquement.

Si la dynamique de l'endettement dépend en grande partie des soldes primaires successifs, il est toutefois à noter que le financement des immobilisations occupe une place croissante dans le processus. Par définition, les investissements en infrastructures visent l'augmentation de la valeur des infrastructures. À cette fin, la nature des investissements gouvernementaux dans le capital public se décline en deux volets complémentaires. D'une part, le maintien vise à augmenter la

² Le solde primaire correspond à la différence entre les revenus et les dépenses budgétaires d'un gouvernement excluant le paiement des intérêts de la dette (Fonds Monétaire International, 2024).

qualité des infrastructures en tenant compte de leur état. D'autre part, la bonification cherche à accroître la quantité des infrastructures en se souciant de leur volume.

Toutefois, la logique et la dynamique propres à la nature des investissements en infrastructures ne s'alignent pas nécessairement avec les contraintes de la comptabilité publique. Étant donné que l'amortissement comptable répartit les dépenses de programme sur une longue période, la comptabilité d'exercice n'incorpore que partiellement les investissements d'une infrastructure au moment de sa mise en service.³ En d'autres termes, les ajustements budgétaires liés aux infrastructures ont un effet différé sur les indicateurs budgétaires, masquant ainsi la réalité économique des décisions immédiates d'investissement.

En l'absence d'un mécanisme de financement des immobilisations et d'un cadre comptable qui représente fidèlement la dynamique du capital public, les dépenses en infrastructures nécessitent généralement de nouveaux emprunts, sans même considérer les possibles dépassements de budget (Michaud *et al.*, 2023). Même dans les pays développés où le solde primaire est positif ou proche de zéro, la part de la dette ayant servi à financer les immobilisations peut alors continuer d'augmenter.⁴ Au Canada, le gouvernement fédéral finance peu les infrastructures, laissant cette charge aux provinces. Dans cette perspective, la dette ayant servi à financer les immobilisations en proportion du PIB nominal ou de la dette nette est beaucoup plus importante à l'échelle provinciale que fédérale.⁵ En parallèle, l'évolution récente met en lumière un contraste marqué entre les deux niveaux de gouvernement entre 2014 et 2023 : alors que les ratios stagnent ou diminuent au fédéral, ils demeurent stables ou augmentent au Québec (voir Tableau 1).

Tableau 1 : Évolution de la dette ayant servi à financer les immobilisations au Canada

Année	Gouvernement fédéral		Gouvernement du Québec	
	% de PIB nominal	% de dette nette	% de PIB nominal	% de dette nette
2014	3,51%	10,29%	17,41%	33,07%
2015	3,66%	10,91%	17,60%	34,46%
2016	3,78%	11,10%	17,53%	35,87%

³ Les dépenses de programme correspondent aux crédits alloués aux ministères et organismes pour la mise en œuvre de leurs missions et services, excluant les dépenses dans le service de la dette (Gouvernement du Québec, 2025a).

⁴ La dette ayant servi à financer les immobilisations correspond à la dette brute diminuée des actifs financiers et des déficits cumulés (Gouvernement du Québec, 2007b).

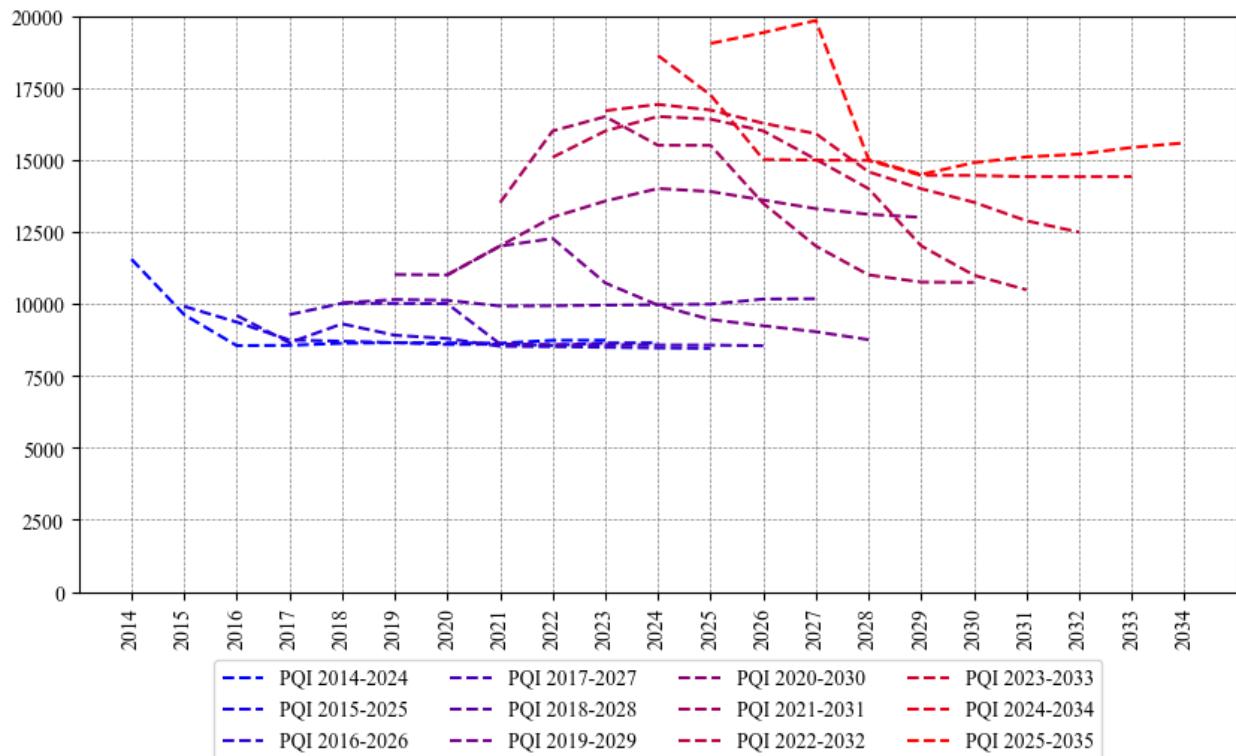
⁵ La dette nette correspond à la dette ayant servi à financer les immobilisations et les déficits cumulés. Elle est obtenue en soustrayant les actifs financiers du gouvernement de l'ensemble de ses passifs (Gouvernement du Québec, 2007b).

Année	Gouvernement fédéral		Gouvernement du Québec	
	% de PIB nominal	% de dette nette	% de PIB nominal	% de dette nette
2017	3,61%	10,61%	16,75%	36,52%
2018	3,69%	11,05%	16,63%	38,77%
2019	3,79%	11,29%	16,76%	40,98%
2020	4,20%	8,80%	18,26%	42,36%
2021	4,07%	8,84%	17,32%	44,66%
2022	3,88%	8,57%	17,01%	44,96%
2023	3,91%	8,63%	17,55%	46,23%

Sources : Gouvernement du Québec (2024a) et Statistique Canada (2024c et 2025c)

Une partie de l'endettement provient donc de la dynamique des investissements en infrastructures. Au Québec, le volume de ces investissements, inscrit dans le Plan Québécois des Infrastructures (PQI), a fortement augmenté au cours de la dernière décennie (voir Figure 3).⁶

Figure 3 : Évolution des investissements prévus des PQI (en millions de dollars nominaux)



Sources : Gouvernement du Québec (2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021b, 2022b, 2023a, 2024c, 2025b).

Si l'évolution des investissements en infrastructures s'accompagne de la problématique de l'endettement, un enjeu additionnel concerne l'état des infrastructures. Dans la comptabilité

⁶ Le PQI recense les investissements en infrastructures dans le périmètre comptable du Gouvernement du Québec ainsi que les investissements réalisés par des municipalités, des organismes publics ou des organismes subventionnés.

d'exercice, l'amélioration de la valeur des infrastructures induite par le maintien n'est pas reconnue par l'amortissement comptable. Pourtant, en l'absence d'une planification rigoureuse et d'une stratégie approfondie, les investissements en infrastructures peuvent s'avérer sous-optimaux du fait d'une gestion des infrastructures sous-optimale. En effet, des investissements faibles peuvent entraîner une dégradation de l'état des infrastructures qui nécessitera à l'avenir des investissements plus élevés pour rehausser leur état, alors que des investissements élevés peuvent entraîner une augmentation du volume d'infrastructures qui nécessitera à l'avenir des investissements plus élevés pour empêcher leur détérioration. Il est donc essentiel de prendre en compte que les infrastructures, susceptibles d'être regroupées en classes en fonction de leur nature et de leur trajectoire de dépréciation, présentent des besoins d'investissement distincts en maintien et en bonification. En définitive, pour viser une utilisation optimale des ressources, une stratégie d'investissement en infrastructures doit déterminer un volume d'investissements, une distribution des investissements selon leur nature et une répartition des investissements selon les classes d'infrastructures. Au Québec, bien que les dépenses soient suffisamment élevées pour entraîner une augmentation de la dette issue des immobilisations, l'état des infrastructures de plusieurs classes continue de se dégrader (voir Tableau 2).

Tableau 2 : Évolution de la part des infrastructures en bon ou très bon état au Québec

Année	Actifs routiers	Actifs relatifs à l'eau potable	Installations culturelles, sportives et de loisirs
2020	48,58%	63,31%	59,56%
2022	47,45%	58,47%	48,90%

Source : Statistique Canada (2025d)

Conscient du sujet de la qualité de ses immobilisations, le gouvernement provincial évalue annuellement l'état de ses infrastructures sur une échelle de A à E pour anticiper les investissements en maintien et inclut les immobilisations notées D ou E dans le déficit de maintien d'actifs (DMA), une mesure estimant les coûts nécessaires pour ramener l'ensemble des infrastructures dans les niveaux A, B ou C. De ce fait, entre 2017 et 2023, le maintien des infrastructures ne semble pas avoir non plus permis de contenir le DMA (voir Tableau 3).

Tableau 3 : Évolution du DMA au Québec (en pourcentage du PIB nominal)

Année	Gouvernement du Québec
2017	4,20%
2018	4,74%
2019	5,36%

2020	6,26%
2021	5,45%
2022	5,54%
2023	6,02%

Sources : Gouvernement du Québec (2018, 2019, 2020, 2021b, 2022b, 2023a et 2024c) et Statistique Canada (2024c).

Cette évolution pose la question de la portée du cadre budgétaire dans la considération des impacts financiers à long terme des politiques publiques. Pour analyser la dynamique comptable des choix d’investissements en infrastructures au regard de la soutenabilité budgétaire, les modèles de projection couramment utilisés reposent sur l’hypothèse qu’une réduction de l’investissement entraîne mécaniquement une baisse de l’endettement et une amélioration de la situation budgétaire. Une étude récente s’inscrit d’ailleurs dans cette logique, en proposant un modèle déterministe pour évaluer la soutenabilité budgétaire du Québec en fonction des investissements en infrastructures. Il y est montré que la stratégie actuelle du gouvernement provincial en matière d’infrastructures n’est pas soutenable et ne permet pas de résorber le DMA (Michaud *et al.*, 2023). Or, au-delà des seules considérations comptables, cette étude néglige les effets sur la soutenabilité budgétaire des infrastructures et des investissements qui les accompagnent, effets qu’il serait pourtant pertinent de prendre en compte.

Premièrement, les investissements en infrastructures ont un effet sur la croissance économique. À ce propos, les infrastructures répondent à des fonctions dans les domaines du transport, de la santé, de la communication, de l’eau, de l’assainissement, de la sécurité, de la justice, de l’éducation, de la culture, de la solidarité sociale, de l’énergie, ou de l’environnement qui stimulent l’économie. Il existe donc une incitation à adapter le rythme de croissance des infrastructures en fonction de l’effet de leur présence sur la croissance économique : une croissance soutenue des investissements est privilégiée lorsque l’effet est élevé, alors qu’un effet plus modeste appelle à un développement des infrastructures plus mesuré.

Deuxièmement, le maintien a un effet sur le niveau de dépréciation. Les infrastructures, en étant sujettes à des risques d’usure qui peuvent les rendre inopérantes, ne suivent pas la règle de la dépréciation constante qui caractérise l’amortissement comptable. En fait, la dépréciation s’accélère plutôt avec les années d’utilisation de l’infrastructure à mesure que le risque de fermeture augmente, suggérant ainsi un taux de dépréciation non linéaire. Face à cette dynamique, le maintien a pour objectif d’augmenter la durée d’utilisation d’une infrastructure. Toutefois, les coûts de maintien, en augmentant avec le mauvais état des immobilisations, peuvent dépasser les coûts de

bonification d'une infrastructure neuve susceptible de remplacer l'infrastructure existante. Il existe donc une incitation à adapter la distribution des investissements selon leur nature en fonction de l'état des infrastructures : une dépréciation intermédiaire appelle à renforcer les efforts de maintien, tandis qu'une dépréciation faible ou élevée encourage davantage la bonification.

Les gouvernements devraient prendre des décisions en s'appuyant sur les modèles qui représentent le plus fidèlement l'évolution des infrastructures. Il importe donc de soutenir l'implémentation d'effets permettant d'améliorer les choix politiques et l'état des finances publiques qui en résulte. Dans ce mémoire, un modèle de projection déterministe d'endettement avec générations d'actifs est proposé pour rendre compte des effets de la stratégie de gestion des infrastructures sur la soutenabilité budgétaire. La principale contribution concerne l'implémentation (1) de l'effet de la distinction entre le maintien et la bonification sur la valeur des infrastructures et (2) de l'effet de la valeur des infrastructures sur la croissance économique. Le modèle est construit à l'aide des données du Québec et du Canada pour une mise à l'échelle de la province. Les données économiques sont utilisées conjointement aux données comptables pour obtenir la meilleure retranscription possible de la réalité de la situation.

Le mémoire est structuré de la façon suivante. Le chapitre deux s'intéresse à la littérature économique sur l'effet de la distinction entre le maintien et la bonification sur la valeur des infrastructures, l'effet de la valeur des infrastructures sur la croissance économique et la concordance des deux effets en vue d'une représentation dans les équations du modèle. Une présentation des modèles de soutenabilité budgétaire ainsi que des choix de représentation possibles y est également effectuée. Par la suite, les spécificités principales de l'environnement comptable, économique et législatif du Québec sont présentées dans le chapitre trois. Le chapitre quatre se concentre quant à lui à présenter les équations, la structure et la calibration du modèle. Dans le chapitre cinq, des tests de sensibilité sont présentés, menés d'abord en présence d'un seul effet à la fois, puis en présence des deux effets. Une série de scénarios est ensuite analysée en matière de soutenabilité budgétaire selon les effets considérés, avant une évaluation différenciée de la qualité et de la contribution à la croissance des infrastructures selon leur classe respective. Finalement, les limites et les opportunités sont présentées dans le chapitre six, avant de conclure dans le dernier chapitre.

2. Revue de littérature

Dans ce chapitre, les variantes possibles pour la modélisation de la soutenabilité budgétaire, communément utilisées dans la littérature, sont d'abord abordées. Ensuite, les travaux portant sur l'effet de la valeur des infrastructures sur la croissance économique, l'effet de la distinction entre le maintien et la bonification sur la valeur des infrastructures et la conjonction des deux effets sont présentés. Finalement, des propositions de formalisation de ces effets dans les équations économiques sont formulées.

2.1 Modèles de soutenabilité budgétaire

L'analyse de la soutenabilité budgétaire repose sur la modélisation. Les différents modèles se distinguent par la diversité des spécifications issues des hypothèses retenues relatives aux dynamiques économiques et budgétaires. D'abord, il est essentiel de définir un horizon temporel pertinent pour évaluer l'évolution de la dette, habituellement nette ou brute, en proportion du PIB (Timbeau *et al.*, 2023). Il importe aussi de faire le choix de modèles déterministes, qui supposent une évolution certaine des variables économiques et résultent en un seul scénario, ou de modèles stochastiques, qui supposent une évolution incertaine des variables économiques et résulte dans un éventail de scénarios possibles. Pour tester la robustesse des trajectoires simulées, il est donc possible d'introduire des chocs exogènes affectant la balance primaire, la croissance économique, les taux d'intérêt ou encore les taux de change (Acosta Ormaechea *et al.*, 2021). Les modèles s'ajustent habituellement aux règles comptables propres à l'environnement étudié (Michaud *et al.*, 2023), tout en intégrant les dynamiques démographiques à l'aide de tranches d'âge (St-Maurice *et al.*, 2023) ou en prenant en compte les caractéristiques des entreprises en fonction des niveaux de rémunération et des paiements d'intérêts (Bureau du Budget du Congrès, 2018). La productivité, quant à elle, peut être appréhendée à travers le taux de chômage ou le nombre moyen d'heures travaillées par individu (Gouvernement de Nouvelle-Zélande, 2021). Le coût de l'endettement peut aussi être traité de manière endogène, que ce soit via une règle de type Taylor (Lehmus Markku, 2009) ou à travers une modélisation plus fine de la structure de maturité de la dette et des besoins de financement projetés (Commission Européenne, 2023). Enfin, certains dispositifs incorporent

le comportement intertemporel des ménages en s'appuyant sur des fonctions d'utilité dynamiques (Université de Pennsylvanie, 2019).

2.2 Liens entre la valeur des infrastructures et la croissance économique

La présence des infrastructures provoque une multitude d'externalités économiques, sociales et environnementales. Autant concentrées que dispersées, les externalités des infrastructures légitiment l'intervention d'acteurs publics relevant de différents niveaux de gouvernance (Kalyvitis *et al.*, 2015). À cet égard, les infrastructures ont un impact positif sur la productivité du secteur privé (Bajo-Rubio *et al.*, 1993), entraînant une spécialisation des secteurs de production (Blankespoor *et al.*, 2021) et une augmentation de l'investissement public et privé (Kemmerling *et al.*, 2002). Par conséquent, la croissance des infrastructures peut stimuler les exportations par la réduction du prix des biens et services produits (Donaldson, 2018), la création d'emplois directs par la réduction du prix du capital privé (Boscá *et al.*, 2002) et la création d'emplois indirects ou induits par effet multiplicateur (Eilrich *et al.*, 2015). Le bien-être de la population peut ainsi être amélioré avec les infrastructures (Gollin *et al.*, 2014). Toutefois, des disparités spatiales et temporelles peuvent en contrepartie se produire. Les zones géographiques proches des infrastructures peuvent subir des hausses du taux de mortalité lié à la pollution (Jarvis *et al.*, 2019) ou bénéficier du versement de subventions additionnelles (Breidenbach, 2019), alors que les zones géographiques éloignées sont susceptibles d'observer une hausse du prix des biens et services (Negash Kahsay *et al.*, 2019) ainsi qu'une réduction de la production (De Borger *et al.*, 2019). Quoi qu'il en soit, les externalités des infrastructures ne sont pas permanentes, puisqu'une fermeture peut entraîner une hausse du taux de chômage (Eilrich *et al.*, 2017), s'accompagnant parfois d'une perte du revenu d'impôts (Fuentes-Saguar *et al.*, 2017).

Les externalités des infrastructures et leurs interactions avec le PIB peuvent être quantifiées de manière agrégée avec des mesures de l'élasticité du PIB à la valeur des infrastructures, définie comme la variation en pourcentage du PIB issue d'une variation en pourcentage de la valeur réelle des infrastructures. En effet, il est difficile d'isoler l'effet économique d'une infrastructure prise individuellement bien que le rôle individuel de chacune d'entre elles puisse différer en fonction du

contexte d'implantation. Cette élasticité peut toutefois faire l'objet d'études, avec ou sans considération des fonctions (Aschauer, 1989) ou des types d'infrastructures (Finn, 1993) d'une même zone géographique. Aussi, bien que son signe ne soit que très rarement remis en question, les estimations varient grandement entre les zones géographiques. Dans ce sens, elle est en moyenne plus élevée dans les pays émergents que dans les pays développés en raison d'un volume d'immobilisations plus restreint et d'un niveau de qualité plutôt inférieur (Bougeas *et al.*, 2003). Néanmoins, même avec une restriction de la comparaison aux pays développés, les estimations pour l'élasticité du PIB à la valeur des infrastructures demeurent hétérogènes et ne parviennent pas à établir une valeur unique au niveau agrégé ni des valeurs consensuelles lors d'une désagrégation par classe d'infrastructures (voir Tableau 4). En fait, il faut noter que l'accumulation d'infrastructures, en favorisant la baisse de l'élasticité du PIB à la valeur des infrastructures, contribue à expliquer non seulement les écarts entre pays à un instant donné, mais aussi les écarts pour un même pays entre deux instants donnés. L'établissement de valeurs consensuelles suppose donc une densification des travaux empiriques menés sur des fenêtres temporelles identiques. À défaut de disposer de ces conditions idéales, il serait raisonnable d'accepter une estimation de 0,1 au Canada (Macdonald, 2008). En d'autres termes, pour une augmentation de 10% de la valeur des infrastructures, une augmentation du PIB de 1% est attendue.

Tableau 4 : Élasticité du PIB à la valeur des infrastructures pour des zones développées

Étude	Lieu (période)	Niveau d'agrégation	Estimation
Aschauer (1989)	États-Unis (1945-1985)	Ensemble	[0,39; 0,56]
		Transport	0,24
		Bureaux et sécurité	0,04
		Hôpitaux	0,06
		Développement	0,02
		Éducation	-0,01
Munnell (1990)	États-Unis (1970-1988)	Ensemble	0,15
		Autoroutes	0,06
		Canalisation	0,12
Garcia-Mila <i>et al.</i> (1992)	États-Unis (1969-1983)	Autoroutes	0,045
		Éducation	[0,072; 0,165]
Papageorgiou (2003)	27 pays développés (1960–1980)	Écoles primaires	[-0,25; -0,41]
Datta <i>et al.</i> (2004)	22 pays développés (1980-1992)	Communication	0,003
Berechman (2006)	États-Unis (1990-2000)	Autoroutes	0,37
Ozbay <i>et al.</i> (2007)	États-Unis (1990-2000)	Autoroutes	[0,135; 0,206]

Étude	Lieu (période)	Niveau d'agrégation	Estimation
Macdonald (2008)	Canada (1981-2005)	Ensemble	0,1
Marrocu <i>et al.</i> (2010)	Italie (1996-2003)	Ensemble	0,12
Crescenzi <i>et al.</i> (2012)	Union Européenne (1990-2004)	Autoroutes	[0; 0,03]
Melo <i>et al.</i> (2013)	États-Unis et Europe (1853-2004)	Transports	0,03
Toader <i>et al.</i> (2018)	Union Européenne (2000-2017)	Communication	[0,08; 0,4]
Afonso <i>et al.</i> (2019)	17 pays développés (1960-2014)	Ensemble	[-0,31; 0,30]
Valero <i>et al.</i> (2019)	4 pays développés (1950-2010)	Universités	0,014
Maciulyte-Sniukiene <i>et al.</i> (2022)	Union Européenne (2000-2019)	Communication	[0; 0,02]
		Canalisations	[0,03; 0,07]
		Transport	[0; 0,04]
		Énergie	0,03

Dans un modèle qui utilise comme indicateur de soutenabilité budgétaire le niveau de dette nette en proportion du PIB nominal, les infrastructures font donc varier la dette nette par des emprunts et le PIB nominal par les externalités. Pour mieux comprendre cette dynamique, une décomposition des variables s'impose. Pour toute période t , la dette nette DN_{t+1} dépend d'elle-même à la période précédente, augmente avec les investissements en infrastructures I_t et le service de la dette SD_t , mais peut aussi diminuer avec le solde primaire S_t . En parallèle, les investissements en infrastructures I_t correspondent à la somme des investissements en maintien M_t et en bonification B_t .

$$DN_{t+1} = DN_t + SD_t + I_t - S_t$$

$$I_t = M_t + B_t$$

De son côté, le PIB nominal Y_{t+1} dépend de lui-même à la période précédente, tout en augmentant avec la croissance réelle g_t du PIB et l'inflation provenant de l'Indice des prix à la consommation π . g_t correspond à son tour à la somme du facteur ω_t de croissance réelle des infrastructures sur la croissance du PIB et de la croissance réelle de long terme du PIB potentiel ϕ . ω_t correspond de son côté au produit de la croissance réelle des infrastructures o_t et de l'élasticité ε du PIB à la valeur des infrastructures.

$$Y_{t+1} = Y_t(1 + g_t + \pi)$$

$$g_t = \phi + \omega_t$$

$$\omega_t = o_t \varepsilon$$

o_t provient de la différence entre la croissance nominale des infrastructures O_t et l'inflation provenant de l'Indice des prix à la construction de bâtiments institutionnels ψ . Finalement, O_t s'obtient avec la valeur nominale des infrastructures K_t des périodes présente et passée.

$$o_t = O_t - \psi$$

$$O_t = \left(\frac{K_t}{K_{t-1}} - 1 \right)$$

Par conséquent, il faut que les investissements en infrastructures I_t , qui déterminent l'évolution de K_t , soient suffisamment élevés pour que la croissance nominale des infrastructures O_t et la croissance réelle des infrastructures o_t soient toutes deux positives, de sorte permettre une augmentation du PIB nominal Y_{t+1} .

Avec ces équations, les investissements en infrastructures I_t font nécessairement augmenter la dette nette DN_{t+1} pour un solde primaire nul mais peuvent également diminuer ou augmenter la croissance réelle g_t du PIB selon que I_t soit, respectivement, suffisamment faible ou suffisamment élevé. Par conséquent, si I_t entraîne une diminution de la croissance réelle g_t du PIB, la dette nette en proportion du PIB nominal augmente nécessairement. En revanche, si I_t entraîne une augmentation de la croissance réelle g_t du PIB, la situation devient indéterminée : si Y_{t+1} croît plus rapidement que DN_{t+1} , la dette nette en proportion du PIB nominal diminue, tandis qu'une progression plus rapide de DN_{t+1} que de Y_{t+1} tend à augmenter la dette nette en proportion du PIB nominal.

De tels résultats doivent donc remettre en question l'utilisation des modèles de projection déterministes habituels qui ne prennent pas en considération le facteur ω_t de croissance réelle des infrastructures sur la croissance du PIB, établissant alors systématiquement que la présence des investissements en infrastructures I_t entraîne une augmentation de la dette nette DN_{t+1} sans aucune variation du PIB nominal Y_{t+1} . Investir provoquerait alors inéluctablement une augmentation de la dette nette en proportion du PIB nominal, alors que ce n'est pas nécessairement le cas.

2.3 Liens entre la nature des investissements et la valeur des infrastructures

Si la présence des infrastructures est originellement permise par la bonification, leur fermeture provient de la dépréciation. La bonification permet donc d'augmenter le volume des infrastructures, alors que le maintien sert à ralentir leur dépréciation. Par conséquent, si la bonification permet l'existence des externalités, le maintien doit permettre de ralentir la dégradation des externalités. Dans ce sens, le maintien des infrastructures peut permettre un regain de productivité (Kalyvitis *et al.*, 2011), une réduction de l'insécurité, des coûts d'usage, du temps d'usage (Bock *et al.*, 2021) et un meilleur accès aux services publics (Lokshin *et al.*, 2005). L'utilité (Hegazy *et al.*, 2014) et le bien-être (Balaras, 2001) des utilisateurs peuvent ainsi être améliorés. Le maintien peut aussi stimuler l'emploi direct, indirect et induit (Mikulić, 2016). Avec la réutilisation d'une grande (Galvão *et al.*, 2016) ou d'une petite partie (Qvist *et al.*, 2020) du capital existant, le maintien favorise la réduction des coûts (Macek *et al.*, 2014) et de la pollution émise (Lowe, 2007) face à la démolition et à la reconstruction (Dong *et al.*, 2005), voire à la construction (Munarim *et al.*, 2016). Même si le maintien n'entraîne pas nécessairement d'effets indésirables (Norman, 2014), les délais d'évaluation et d'intervention doivent être pris en compte (Orcesi *et al.*, 2011) car la suspension temporaire d'un actif peut entraîner un transfert des besoins vers les infrastructures fonctionnelles restantes, lesquelles, en étant sollicitées pour pallier la demande, subissent une dégradation accrue (Hartman, 2004). Ainsi, le maintien peut jouer le rôle de substitut à la bonification au sein des investissements en infrastructures (McGrattan *et al.*, 1999).

Habituellement, le maintien et la bonification sont agrégés, car ils sont considérés comme ayant un impact identique sur le volume de capital, tandis que le niveau de la dépréciation géométrique est déterminé de manière exogène aux investissements présents futurs. Or, cette conceptualisation peut s'avérer simpliste. En réalité, les infrastructures vieillissantes tendent à se détériorer plus rapidement, générant des coûts croissants. Distinguer le maintien des infrastructures en fonction de leur ancienneté s'avère donc indispensable. Il faut dire que le rôle du maintien dans le processus de dépréciation (Jackson, 1911) et dans l'atteinte de l'obsolescence (Hicks, 1942) est étudié depuis longtemps. L'intégration progressive de la dépréciation non linéaire du capital dans des travaux remonte quant à elles à la fin du XXe siècle (Hulten *et al.*, 1980). Elle est depuis intégrée dans certains modèles, les recherches s'appliquant à modéliser une évolution de l'état du

capital comparable pour inclure de nouvelles variables. Dans ce sens, la fonction dépréciation a eu l'occasion d'être modifiée pour dépendre du maintien (Margolis, 1981), mais aussi d'améliorations technologiques (Greenwood *et al.*, 1988) ou du niveau d'utilisation (Burnside *et al.*, 1996). Puisque la distinction entre l'âge et l'usage est importante dans la dépréciation (Perry *et al.*, 1990), l'intégration des deux variables dans la fonction de dépréciation a aussi été étudiée (Kim *et al.*, 1987). Parallèlement, les cycles économiques, en influençant les revenus gouvernementaux et donc les investissements en maintien, peuvent être corrélés au taux de dépréciation du capital (Albonico *et al.*, 2014). Plus récemment, l'accès à des données détaillées permet une distinction entre les formes d'investissements propres à chaque classe d'infrastructures (Bennett *et al.*, 2020) pour questionner le taux de dépréciation géométrique (Kornfeld *et al.*, 2022).

Il importe donc de distinguer le maintien de la bonification pour permettre au premier de jouer un rôle sur la dépréciation. De cette façon, il est possible d'écrire que la valeur nominale des infrastructures K_{t+1} dépend d'elle-même à la période précédente, diminue avec la dépréciation δ_t tenant compte du maintien et augmente avec la bonification B_t . δ_t diminue selon une dépréciation de base θ , mais dépend aussi de l'âge réel de l'infrastructure ar_t et de son facteur de sensibilité de la dépréciation à l'âge réel ζ . En effet, δ_t augmente ou diminue lorsque l'âge réel de l'infrastructure ar_t diminue ou augmente, respectivement. Par ailleurs, l'âge réel de l'infrastructure ar_{t+1} dépend de lui-même à la période précédente, diminue avec les investissements en maintien M_t et avec le facteur d'efficacité du maintien à ralentir l'âge réel γ , en proportion du facteur de sensibilité de la dépréciation à l'âge réel ζ . ar_{t+1} peut ainsi augmenter par rapport à la période précédente si $\frac{\gamma}{\zeta} M_t$ est respectivement inférieur à un, ou diminuer s'il est supérieur à un. Quoi qu'il en soit, les investissements en maintien M_t réduisent δ_t en les rajeunissant les infrastructures en terme effectif, jouant ainsi un rôle distinct des investissements en bonification B_t .

$$K_{t+1} = \delta_t K_t + B_t$$

$$\delta_t = e^{-\zeta ar_t - \theta}$$

$$ar_{t+1} = ar_t + 1 - \frac{\gamma}{\zeta} M_t$$

En règle générale, la représentation de la dépréciation des infrastructures est l'affaire d'un choix entre l'amortissement comptable $\check{\delta}_t$ et la dépréciation géométrique $\hat{\delta}_t$. D'une part,

l'amortissement comptable $\check{\delta}_t$ augmente avec l'âge en terme chronologique a_t en proportion de la durée de vie totale VT . D'autre part, $\hat{\delta}_t$ diminue selon l'âge en terme chronologique a_t avec un taux de dépréciation géométrique ξ . En parallèle, a_t correspond à la différence entre l'année t et l'année de construction n .

$$\check{\delta}_t = \frac{a_t}{VT} \quad \hat{\delta}_t = (1 - \xi)^{a_t}$$

$$a_t = t - n$$

Ces deux approches traduisent des logiques différentes de mesure de la perte de valeur des infrastructures. D'un côté, l'amortissement comptable $\check{\delta}_t$ répartit le coût d'une infrastructure sur une durée pré-déterminée. À l'issue de cette période, sa valeur comptable est entièrement amortie, bien que son utilisation effective puisse se poursuivre au-delà. De l'autre côté, la dépréciation géométrique $\hat{\delta}_t$ accorde une valeur économique à une infrastructure tant que celle-ci est utilisée. Par conséquent, $\hat{\delta}_t$ offre une représentation plus fidèle de l'évolution réelle des infrastructures que ne le permet $\check{\delta}_t$. Seulement, ni l'amortissement comptable $\check{\delta}_t$, ni la dépréciation géométrique $\hat{\delta}_t$ ne varient en fonction du maintien. En conséquence, si de telles fonctions de dépréciation sont intégrées à une équation de la valeur nominale des infrastructures qui ne différencie pas le maintien M_t de la bonification B_t en les regroupant simplement dans la somme des investissements en infrastructures I_t , aucun mécanisme n'encourage alors l'utilisation du maintien, alors même que ce dernier permet de réduire la dépréciation des immobilisations publiques existantes.

$$\check{K}_{t+1} = \check{\delta}_t K_t + I_t \quad \hat{K}_{t+1} = \hat{\delta}_t K_t + I_t$$

2.4 Études relatives à la conjonction des effets

Étant donné que la distinction entre le maintien et la bonification a un effet sur la valeur des infrastructures et que la valeur des infrastructures a un effet sur la croissance économique, alors la combinaison des deux effets suppose que la distinction entre le maintien et la bonification a un effet sur la croissance économique. La bonification, en étant seule à permettre une croissance des infrastructures, a nécessairement un effet sur la croissance économique. Par conséquent, le maintien, en pouvant au mieux éviter la décroissance des infrastructures, est plutôt susceptible de soutenir la croissance économique en réduisant la dégradation des externalités issues de la présence

des infrastructures. Dans ce sens, le choix d'un investissement en maintien optimal peut permettre de maximiser le niveau d'utilisation des ressources publiques et la croissance du PIB (Kalaitzidakis et al., 2004). Seulement, toute bonification dans le présent suppose d'augmenter tout maintien dans le futur pour limiter la dépréciation, le niveau optimal de maintien étant dépendant de la bonification du passé. Par conséquent, des choix sous-optimaux dans la distribution des investissements selon leur nature peuvent entraîner de la saturation dans les infrastructures, au détriment de la production (Dioikitopoulos *et al.*, 2008). Une redistribution des fonds alloués à la bonification vers le maintien peut alors permettre d'améliorer le PIB (Rioja, 2003), le maintien pouvant être relié à un facteur d'efficacité du capital dans la fonction de production (Agénor, 2009). Ainsi, la modélisation simultanée de l'effet de la distinction entre le maintien et la bonification sur la valeur des infrastructures et de l'effet de la valeur des infrastructures sur la croissance économique reste cohérente.

3. Contexte

Dans ce chapitre, l'environnement légal, comptable et économique du Québec en matière de politique budgétaire et d'infrastructures est présenté du fait de ses nombreuses spécificités susceptibles de limiter toute tentative de comparaison avec d'autres zones géographiques. L'évolution de l'état des finances publiques est ensuite analysée.

3.1 Cadre légal des finances publiques et des infrastructures

Au Québec, le Secrétariat du Conseil du trésor prépare annuellement un Budget de dépenses qui détermine les fonds dont disposent les ministères et des organismes d'utilité publique. Le Budget de dépenses y est encadré par deux lois provinciales majeures et complémentaires.

Dans un premier temps, la Loi sur l'équilibre budgétaire doit permettre de ne pas augmenter la dette publique pour protéger la capacité d'action de l'État. Adoptée en 1996, cette loi interdit aux gouvernements les déficits budgétaires, sauf circonstances particulières qui l'engagent dans l'atteinte d'un excédent pour les années suivantes. Toutefois, les modifications apportées à la loi au fil des ans n'empêchent pas sa suspension temporaire durant les crises économiques de 2008 (Assemblée nationale du Québec, 2009) et de 2020 (Assemblée nationale du Québec, 2022) du fait d'une certaine rigidité considérée par les gouvernements successifs de la province (Gouvernement du Québec, 2023b). À la suite de consultations (Collectif, 2021), la Loi sur l'équilibre budgétaire est rendue plus flexible en 2023 par le report du respect d'un plan de retour à l'équilibre si une reprise économique moins forte que prévu est observée au sortir d'un ralentissement économique (Godbout, 2023).

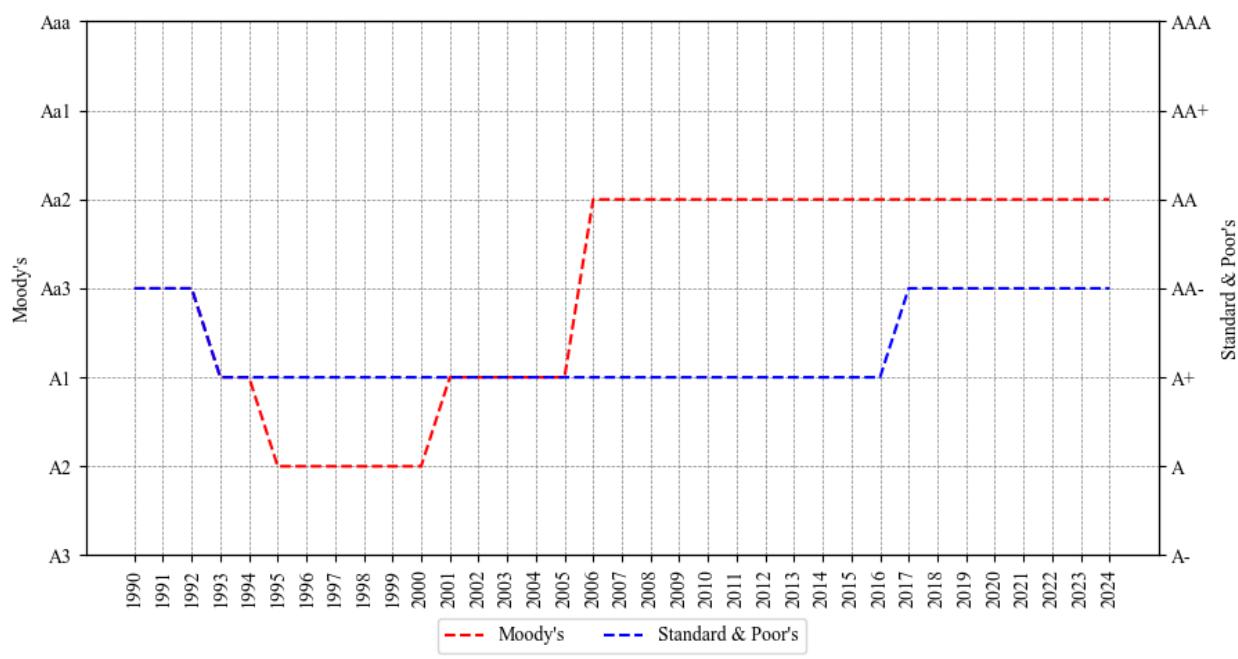
Dans un second temps, la Loi sur la réduction de la dette et instituant le Fonds des générations doit permettre de réduire la dette publique pour améliorer la capacité d'agir de l'État. Adoptée en 2006, cette loi vise à mettre en place un mécanisme automatique de remboursement de la dette en vue de réduire le niveau d'endettement et le service de la dette (Assemblée Nationale du Québec, 2006). En outre, le Fonds des générations reçoit automatiquement des revenus gouvernementaux, mais peut aussi se voir aussi transférer des sommes additionnelles qui seront retirées plus tard pour rembourser la dette (LégisQuébec, 2023).

Conçu en parallèle du Budget de dépenses, le PQI est un document prospectif qui dresse un plan des investissements en capital public prévus par le Gouvernement du Québec sur un horizon de dix ans pour les organismes publics ou subventionnés (Gouvernement du Québec, 2024c). Si le PQI constitue l'outil central de planification des investissements en infrastructures de la province, le plan fédéral *Investir dans le Canada* adopte de son côté un rôle secondaire d'orientation et de soutien, sans s'ingérer dans la définition des priorités (Infrastructure Canada, 2023). Cette centralité du PQI est par ailleurs renforcée par son encadrement légal spécifique à l'échelle provinciale : d'abord encadrés par la Loi favorisant le maintien et le renouvellement des infrastructures publiques entre 2007 et 2013 (LégisQuébec, 2013), les investissements en infrastructures sont désormais régis par la Loi sur les infrastructures publiques (LégisQuébec, 2024), mise en place à la suite des recommandations (Vérificateur général du Québec, 2012). Conformément à la nouvelle législation, les organismes bénéficiant d'un financement du gouvernement provincial sont tenus de soumettre un Plan annuel de gestion des investissements publics, lequel doit inclure la classification de l'état des infrastructures ainsi que l'estimation du DMA (Sous-secrétariat aux infrastructures publiques, 2022).

3.2 État des finances publiques et des infrastructures

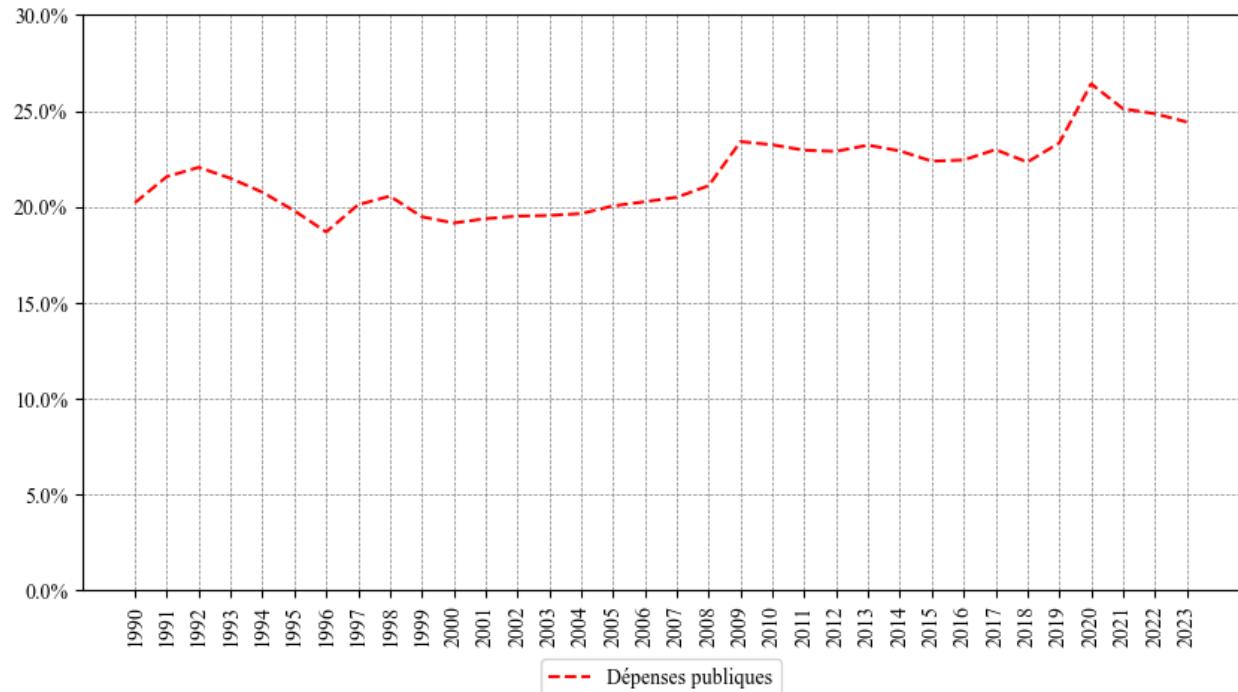
Bien que d'importantes modifications des règles comptables gouvernementales (Gouvernement du Québec, 1998a, 1998b, 2007a, 2010 et 2021a) compliquent la comparaison des données d'une année à l'autre, les principales trajectoires des finances publiques québécoises montrent une amélioration générale entre 1990 et 2010 (Godbout *et al.*, 2008 et 2014). Cette tendance se reflète dans une gestion budgétaire plus rigoureuse (voir Figure 2), une capacité de financement accrue selon les agences de notation (voir Figure 4), une offre de services publics soutenue (voir Figure 5) et un allègement progressif du poids du service de la dette (voir Figure 6). Néanmoins, l'état des infrastructures s'est, de son côté, plutôt dégradé (voir Tableau 3).

Figure 4 : Évolution de la cote de crédit du Québec



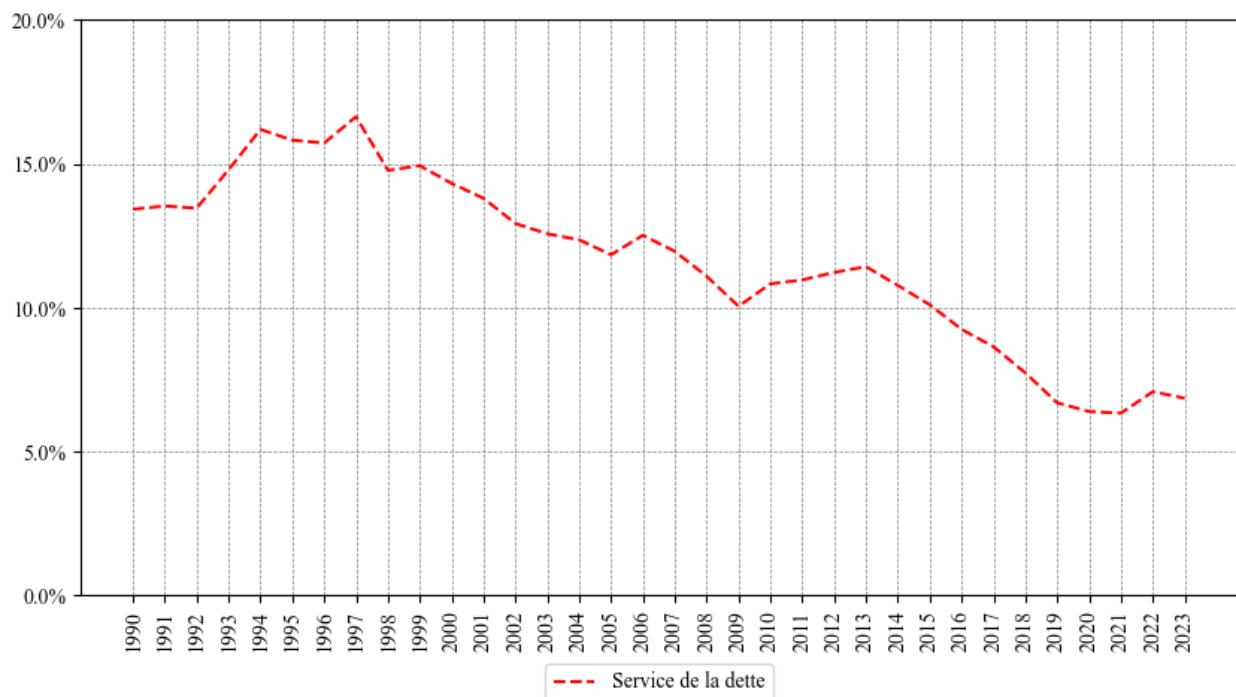
Sources : Ministère des Finances du Québec (2024a et 2024c).

Figure 5 : Évolution des dépenses de programmes (en pourcentage du PIB nominal)



Sources : Gouvernement du Canada (2024) et Statistique Canada (2024c)

Figure 6 : Évolution du service de la dette du Québec (en pourcentage du revenu consolidé)⁷



Source : Gouvernement du Canada (2024).

Cette évolution s'explique avant tout par le contexte économique et les orientations politiques, étant donné que la législation en vigueur n'encadre pas les stratégies d'investissements des gouvernements provinciaux successifs qui peuvent être budgétairement insoutenables du fait d'une augmentation de l'endettement public et structurellement intenables du fait d'une dégradation de l'état des infrastructures.⁸ Récemment, une étude a également souligné l'évolution inquiétante de la dynamique des infrastructures en la comparant à d'autres provinces canadiennes (Michaud *et al.*, 2023).

⁷ Le revenu consolidé correspond à l'ensemble des revenus perçus (Gouvernement du Québec, 2025a).

⁸ Le concept de tenabilité structurelle n'a pas de précédent. Il vise à exprimer l'atteinte d'un niveau de qualité des infrastructures qui se stabilise au fil du temps.

4. Exposition du modèle

Dans ce chapitre, un modèle de projection déterministe d'endettement avec génération d'actifs est proposé pour évaluer l'effet de l'élasticité du PIB à la valeur des infrastructures et du maintien sur l'évolution de la proportion de dette nette relative au PIB nominal. Dans l'optique de se concentrer sur les effets des infrastructures, l'approche stochastique n'est pas retenue. Aucun choc dans l'économie ne sera donc étudié. L'absence de données sur le niveau d'utilisation des infrastructures nous constraint à négliger ce facteur dans le modèle, bien qu'il puisse exercer une influence significative sur l'évolution de l'âge réel et, par conséquent, sur le niveau de dépréciation.

4.1 Présentation de la structure du modèle

La conception d'un modèle de soutenabilité budgétaire nécessite d'abord de décomposer les variables clés, soit la dette nette et le PIB nominal du Québec. Aussi, pour toute période t , la dette nette DN_{t+1} dépend d'elle-même à la période précédente, diminue avec le solde primaire S_t , mais peut aussi augmenter avec le service de la dette SD_t et les investissements en infrastructures financés par le Gouvernement du Québec $I_{t,Q}$, à ne pas confondre avec les investissements cofinancés par le Gouvernement du Québec et le Gouvernement fédéral $I_{t,C}$. En effet, cette distinction résulte du fait que les investissements en infrastructures financés par le Gouvernement du Québec $I_{t,Q}$ affectent la dette nette de la province, tandis que les investissements cofinancés par le Gouvernement du Québec et le Gouvernement fédéral $I_{t,C}$ sont mobilisés pour mesurer l'évolution des infrastructures de la province.

$$DN_{t+1} = DN_t - S_t + SD_t + I_{t,Q} \quad (1)$$

De son côté, le PIB nominal Y_{t+1} dépend de lui-même à la période précédente et augmente selon un niveau de croissance réelle g_t et une inflation provenant de l'Indice des prix à la consommation π . Aucune différenciation n'est ainsi opérée entre les inflations provenant de l'Indice des prix à la consommation du Québec et du Canada.

$$Y_{t+1} = Y_t(1 + g_t + \pi) \quad (2)$$

Les composantes de DN_{t+1} et de Y_{t+1} doivent aussi être décomposées pour préciser leur dynamique. Pour commencer avec les variables de la dette nette, le solde primaire S_t repose sur le produit d'un ratio fixe s du solde primaire au PIB nominal Y_{t+1} auquel il est multiplié par la suite.

$$S_t = Y_t s \quad (3)$$

Le service de la dette SD_t s'obtient pour sa part en appliquant un taux d'emprunt fixe r à la dette nette DN_t . Bien qu'il soit possible de faire dépendre le taux d'emprunt de l'évolution des finances publiques et de l'activité économique, l'hypothèse d'un taux constant indépendant de ces variables reste cohérente avec l'objectif d'une stagnation de la dette nette en proportion du PIB.

$$SD_{t+1} = DN_t r \quad (4)$$

Les investissements en infrastructures financés par le Gouvernement du Québec $I_{t,Q}$ correspondent quant à eux à la somme des investissements en bonification $B_{i,t,Q}$ et en maintien $M_{i,t,Q}$ financés par le Gouvernement du Québec pour l'ensemble des classes d'infrastructure i (Gouvernement du Québec, 2024c). De la même manière, les investissements cofinancés par le Gouvernement du Québec et le Gouvernement fédéral $I_{t,C}$ correspondent à la somme des investissements en bonification $B_{i,t,C}$ et en maintien $M_{i,t,C}$ cofinancés par le Gouvernement du Québec et le Gouvernement fédéral pour l'ensemble des classes d'infrastructure i (Statistique Canada, 2025b). Le choix de la séparation des infrastructures en classes s'explique par des vitesses de dépréciation différentes entre classes d'infrastructures, mais aussi par des stratégies gouvernementales d'investissements aux échelles provinciale ou fédérale privilégiant certaines immobilisations publiques plutôt que d'autres selon le contexte politique, économique, social et environnemental.

$$I_{t,Q} = \sum_i B_{i,t,Q} + \sum_i M_{i,t,Q} \quad (5)$$

$$I_{t,C} = \sum_i B_{i,t,C} + \sum_i M_{i,t,C} \quad (6)$$

La bonification $B_{i,t,C}$ et le maintien $M_{i,t,C}$ issus du cofinancement entre le Gouvernement du Québec et le Gouvernement fédéral correspondent respectivement à la multiplication du PIB nominal Y_t avec un ratio fixe de la bonification b_i relatif au PIB nominal ou du maintien m_i relatif

au PIB nominal. Ici, le choix de ratio fixe s'inscrit dans une volonté d'évaluer la soutenabilité budgétaire de la stratégie actuelle d'investissement en infrastructures appliquée sur le long terme.

$$B_{i,t,C} = b_i Y_t \quad (7)$$

$$M_{i,t,C} = m_i Y_t \quad (8)$$

Pour passer de la bonification $B_{t,Q}$ ou du maintien $M_{t,Q}$ financés par le Gouvernement du Québec à la bonification $B_{t,C}$ ou au maintien $M_{t,C}$ cofinancés par le Gouvernement du Québec et le Gouvernement fédéral, un facteur de transition fixe τ est employé. Le choix d'un facteur de transition indépendant de la nature de l'investissement découle de l'agrégation de la bonification et du maintien cofinancés par le Gouvernement du Québec et le Gouvernement fédéral, ce qui oblige à l'estimation d'un facteur unique pour les investissements. Par ailleurs, le choix d'un facteur commun à toutes les classes d'infrastructures se justifie par la forte volatilité, d'une année à l'autre, de tels facteurs propres à chaque classe, ce qui justifie l'agrégation pour obtenir une valeur stable et représentative de la situation à long terme.

$$B_{i,t,Q} = B_{i,t,C} \tau \quad (9)$$

$$M_{i,t,Q} = M_{i,t,C} \tau \quad (10)$$

Pour continuer avec les variables du PIB nominal Y_{t+1} , la croissance réelle g_t se compose du facteur ω_t de croissance réelle des infrastructures sur la croissance du PIB et d'une croissance réelle de long terme du PIB potentiel ϕ .

$$g_t = \phi + \omega_t \quad (11)$$

Le facteur ω_t de croissance réelle des infrastructures sur la croissance du PIB correspond au produit de la croissance réelle des infrastructures o_t et de l'élasticité ε du PIB à la valeur des infrastructures. Le choix de calculer ω_t avec une croissance réelle des infrastructures qui agrège les classes et une élasticité du PIB à la valeur des infrastructures générale, plutôt que d'appliquer à la croissance des infrastructures de chaque classe une élasticité du PIB à la valeur des infrastructures spécifique avant de les additionner avec une pondération par la part de la valeur nominale des infrastructures, découle de l'absence d'un consensus dans la littérature concernant l'estimation des élasticités du PIB à la valeur des infrastructures propres à chaque classe.

$$\omega_t = o_t \varepsilon \quad (12)$$

La croissance réelle des infrastructures o_t provient de la différence entre la croissance nominale des infrastructures O_t et l'inflation provenant de l'Indice des prix à la construction de bâtiments institutionnels ψ . Aucune différenciation n'est donc opérée entre les inflations provenant de l'Indice des prix à la construction de bâtiments institutionnels du Québec et du Canada.

$$o_t = O_t - \psi \quad (13)$$

La croissance nominale des infrastructures O_t s'obtient en toute logique avec la valeur nominale des infrastructures K_t des périodes présente et passée.

$$O_t = \left(\frac{K_t}{K_{t-1}} - 1 \right) \quad (14)$$

La valeur nominale des infrastructures K_t est le résultat de la somme des valeurs nominales des infrastructures par classe i , $K_{i,t}$.

$$K_t = \sum_i K_{i,t} \quad (15)$$

La valeur nominale des infrastructures par classe $K_{i,t}$ correspond à la somme des valeurs nominales des infrastructures par classe i par générations n , $K_{i,n,t}$ ($n \leq t$). Le choix de la distinction des générations s'explique par des vitesses de dépréciation différentes entre générations d'une même classe d'infrastructures. Il est à noter que les générations d'actifs existantes sont déjà construites au début de la simulation, tandis que les nouvelles générations d'actifs sont construites durant la simulation. Aussi, les générations existantes au début de la simulation, en ne pouvant être désagrégées, sont considérées comme une seule et même génération agrégée associée à un seul niveau de dépréciation au début de la simulation tenant compte du maintien pour chaque classe

$$K_{i,t} = \sum_n K_{i,n,t} \quad (16)$$

La valeur nominale des infrastructures par classe par générations évolue selon des conditions de mise à jour distinctes. À cet égard, les générations existantes, ayant par conséquent un âge au début de la simulation $a_{i,n,n}$ différent de zéro, peuvent disposer d'un niveau de dépréciation au début de la simulation tenant compte du maintien $\delta_{i,n,n}$ ($0 < \delta_{i,n,n} < 1$) non négligeable qu'il importe de tout autant prendre en compte que le niveau de dépréciation de la

période en cours tenant compte du maintien $\delta_{i,n,t}$ ($0 < \delta_{i,n,t} < 1$). Par conséquent, la différence entre $\delta_{i,n,n}$ et $\delta_{i,n,t}$ est appliquée à la valeur nominale des infrastructures par classe par génération du début de la simulation $K_{i,n,n}$ sur l'ensemble des périodes pour obtenir la valeur nominale des infrastructures par classe par générations de la période en cours $K_{i,n,t}$.

$$K_{i,n,t} = [1 - (\delta_{i,n,n} - \delta_{i,n,t})]K_{i,n,n} \quad \forall a_{i,n,n} \neq 0 \quad (17)$$

À l'opposé, lors de la période de construction, les nouvelles générations, ayant donc un âge lors de la période de construction $a_{i,n,n}$ égal à zéro, voient leur valeur nominale des infrastructures par classe par générations de la période de construction $K_{i,n,n}$ calculée en multipliant la bonification cofinancée par le Gouvernement du Québec et le Gouvernement fédéral par classe $B_{i,n,C}$ avec le niveau de dépréciation de la période de construction tenant compte du maintien $\delta_{i,n,n}$. La période de construction passée, ce qui suppose que n est différent de t , les nouvelles générations voient la valeur nominale de leurs infrastructures par classe par génération de la période en cours $K_{i,n,t}$ calculée en multipliant la valeur nominale des infrastructures par classe par génération de la période de construction $K_{i,n,n}$ avec le niveau de dépréciation de la période en cours tenant compte du maintien $\delta_{i,n,t}$.

$$K_{i,n,n} = \delta_{i,n,n}B_{i,n,C} \quad \forall a_{i,n,n} = 0 \quad (18)$$

$$K_{i,n,t} = \delta_{i,n,t}K_{i,n,n} \quad \forall a_{i,n,n} = 0 \quad \forall n \neq t \quad (19)$$

Quel que soit la période, que la génération soit existante ou nouvelle, $\delta_{i,n,t}$ diminue ou augmente avec, respectivement, l'augmentation ou la diminution de l'âge réel de l'infrastructure $ar_{i,n,t}$ ($ar_{i,n,t} > 0$) selon un facteur de sensibilité de la dépréciation à l'âge réel ζ_i et une dépréciation de base θ_i .

$$\delta_{i,n,t} = e^{-\zeta_i ar_{i,n,t} - \theta_i} \quad (20)$$

Le calcul de l'âge réel, évoluant en terme effectif, dépend aussi de conditions. En effet, pour la période suivant le début de la simulation, les générations existantes, ayant donc un âge au début de la simulation $a_{i,n,n}$ différent de zéro, voient leur âge réel à la période suivant le début de la simulation $ar_{i,n,n+1}$ augmenter avec $a_{i,n,n}$ et diminuer avec le maintien du début de la simulation $M_{i,n,n,C}$ cofinancé par le Gouvernement du Québec et le Gouvernement fédéral par classe, selon le facteur d'efficacité du maintien à ralentir l'âge réel γ_i ($\gamma_i \geq 0$) et le facteur de sensibilité de la

dépréciation à l'âge réel ζ_i . Pour la période suivant la construction, les nouvelles générations, ayant donc un âge lors de la période de construction $a_{i,n,n}$ égal à zéro, voient leur âge réel à la période suivant la construction $ar_{i,n,n+1}$ ne dépendre ni de $a_{i,n,n}$, ni du maintien, ce dernier n'étant attribué qu'après la période de construction d'un actif.

$$ar_{i,n,n+1} = a_{i,n,n} + 1 - \frac{\gamma_i}{\zeta_i} M_{i,n,n,C} \quad \forall a_{i,n,n} \neq 0 \quad (21)$$

$$ar_{i,n,n+1} = 1 \quad \forall a_{i,n,n} = 0 \quad (22)$$

Passé la période suivant le début de la simulation pour les générations existantes ou la période suivant la construction pour les nouvelles générations, c'est-à-dire lorsque n est différent de t , l'âge réel $ar_{i,n,t+1}$ est déterminé de façon identique pour les générations existantes et nouvelles, dépendant de lui-même à la période précédente et diminuant avec le maintien $M_{i,n,t,C}$ cofinancé par le Gouvernement du Québec et le Gouvernement fédéral selon le facteur d'efficacité du maintien à ralentir l'âge réel γ_i et le facteur de sensibilité de la dépréciation à l'âge réel ζ_i .

$$ar_{i,n,t+1} = ar_{i,n,t} + 1 - \frac{\gamma_i}{\zeta_i} M_{i,n,t,C} \quad \forall n \neq t \quad (23)$$

Le maintien dépend aussi de conditions. En effet, au début de la simulation, les générations existantes, ayant donc un âge au début de la simulation $a_{i,n,n}$ différent de zéro, voient le maintien au début de la simulation $M_{i,n,n,C}$ cofinancé par le Gouvernement du Québec et le Gouvernement fédéral leur être entièrement alloués. Après le début de la simulation, c'est-à-dire lorsque n est différent de t , les générations existantes se voient alloués le maintien de la période en cours $M_{i,n,t,C}$ cofinancé par le Gouvernement du Québec et le Gouvernement fédéral selon une pondération relative à la bonification $B_{i,n,C}$ cofinancée par le Gouvernement du Québec et le Gouvernement fédéral. Les générations existantes, en étant agrégées au début de la simulation, se voient donc attribuer pour leur pondération la bonification cumulée historiquement jusqu'à la période en cours réduite des bonifications associées à une nouvelle génération, pour laquelle l'âge au début de la simulation $a_{i,n,n}$ est donc de zéro, $\sum_{n=-\infty}^{t-1} B_{i,n,C} - (B_{i,n,C}|a_{i,n,n} = 0)$, dans le cadre des investissements cofinancés par le Gouvernement du Québec et le Gouvernement fédéral.

$$M_{i,n,n,C} = M_{i,n,C} \quad \forall a_{i,n,n} \neq 0 \quad (24)$$

$$M_{i,n,t,C} = M_{i,t,C} \frac{\sum_{n=-\infty}^{t-1} B_{i,n,C} - (B_{i,n,C} | a_{i,n,n} = 0)}{\sum_{n=-\infty}^{t-1} B_{i,n,C}} \quad \forall a_{i,n,n} \neq 0 \quad \forall n \neq t \quad (25)$$

Pour la période de construction, les nouvelles générations, ayant donc un âge à la période de construction $a_{i,n,n}$ égal à zéro, ne se voient alloués aucun investissement en maintien $M_{i,n,n,C}$ cofinancés par le Gouvernement du Québec et le Gouvernement fédéral. La période de construction passée, c'est-à-dire lorsque n est différent de t , les nouvelles générations se voient également allouer le maintien de la période en cours $M_{i,n,t,C}$ cofinancé par le Gouvernement du Québec et le Gouvernement fédéral selon une pondération par la bonification $B_{i,n,C}$ cofinancée par le Gouvernement du Québec et le Gouvernement fédéral. Les nouvelles générations, en étant désagrégées, se voient attribuer pour leur pondération la bonification $B_{i,n,C}$ cofinancé par le Gouvernement du Québec et le Gouvernement fédéral de la nouvelle génération.

$$M_{i,n,n,C} = 0 \quad \forall a_{i,n,n} = 0 \quad (26)$$

$$M_{i,n,t,C} = M_{i,t,C} \frac{B_{i,n,C}}{\sum_{n=-\infty}^{t-1} B_{i,n,C}} \quad \forall a_{i,n,n} = 0 \quad \forall n \neq t \quad (27)$$

En parallèle, la bonification cumulée historiquement cofinancée par le Gouvernement du Québec et le Gouvernement fédéral $\sum_{n=-\infty}^t B_{i,n,C}$ est calculée à partir d'elle-même à la période précédente $\sum_{n=-\infty}^{t-1} B_{i,n,C}$ et de la bonification cofinancée par le Gouvernement du Québec et le Gouvernement fédéral $B_{i,t,C}$ de la période en cours.

$$\sum_{n=-\infty}^t B_{i,n,C} = \sum_{n=-\infty}^{t-1} B_{i,n,C} + B_{i,t,C} \quad (28)$$

L'âge, évoluant en terme chronologique, est aussi soumis à des conditions de générations spécifiques. Pour la période suivant le début de la simulation, les générations existantes, ayant donc un âge au début de la simulation $a_{i,n,n}$ différent de zéro, voient leur âge suivant le début de la simulation $a_{i,n,n+1}$ dépendre de lui-même à la période précédente vieilli d'une période. Pour la période suivant la construction, les nouvelles générations, ayant donc un âge à la période de construction $a_{i,n,n}$ égal à zéro voient leur âge à la période suivant la construction $a_{i,n,n+1}$ être simplement égal à un.

$$a_{i,n,n+1} = a_{i,n,n} + 1 \quad \forall a_{i,n,n} \neq 0 \quad (29)$$

$$a_{i,n,n+1} = 1 \quad \forall a_{i,n,n} = 0 \quad (30)$$

Passé la période suivant le début de la simulation pour les générations existantes ou la période suivant la construction pour les nouvelles générations, c'est-à-dire lorsque n est différent de t , l'âge $a_{i,n,t+1}$ est déterminé de façon identique pour les générations existantes et nouvelles, dépendant de lui-même la période passée vieilli d'une période.

$$a_{i,n,t+1} = a_{i,n,t} + 1 \quad \forall n \neq t \quad (31)$$

Toutes les conditions des générations étant fixées, il est possible de passer à l'âge moyen $A_{i,t}$ et à l'âge moyen réel $AR_{i,t}$ de la période en cours qui sont calculés comme des moyennes pondérées où les poids correspondent à la bonifications $B_{i,n,C}$ cofinancée par le Gouvernement du Québec et le Gouvernement fédéral associées à chaque génération n . Plus précisément, l'âge moyen $A_{i,t}$ et l'âge moyen réel $AR_{i,t}$ sont obtenus à partir de la somme des produits entre la bonification $B_{i,n,C}$ cofinancée par le Gouvernement du Québec et le Gouvernement fédéral et, respectivement, l'âge $a_{i,n,t}$ ou l'âge réel $ar_{i,n,t}$, cette somme étant ensuite normalisée par investissements cumulés en bonification cofinancés par le Gouvernement du Québec et le Gouvernement fédéral $\sum_{n=-\infty}^t B_{i,n,C}$ (Statistique Canada, 2019).

$$A_{i,t} = \sum_{n=-\infty}^t \frac{B_{i,n,C} a_{i,n,t}}{\sum_{n=-\infty}^t B_{i,n,C}} \quad (32)$$

$$AR_{i,t} = \sum_{n=-\infty}^t \frac{B_{i,n,C} ar_{i,n,t}}{\sum_{n=-\infty}^t B_{i,n,C}} \quad (33)$$

Le modèle complété, quatre indicateurs sont proposés pour évaluer l'évolution des variables d'intérêts et permettre d'ajuster les politiques d'investissement public en fonction des caractéristiques spécifiques à chaque secteur d'infrastructure. Premièrement, le ratio k_t de la valeur nominale des infrastructures relative au PIB nominal doit permettre de suivre la dynamique de la valeur nominale des infrastructures afin de comprendre l'évolution de son influence dans les changements de l'activité économique globale.

$$k_t = \frac{K_t}{Y_t} \quad (34)$$

Deuxièmement, le ratio dn_t de dette nette relative au PIB nominal vise à mesurer la pression exercée par la dette sur l'économie et à évaluer les risques pour la soutenabilité budgétaire à long terme.

$$dn_t = \frac{DN_t}{Y_t} \quad (35)$$

Troisièmement, un ratio $\rho_{i,t}$ de qualité se basant sur le quotient entre l'âge réel moyen $AR_{i,t}$ et l'âge moyen $A_{i,t}$ est proposé pour estimer l'état de chaque classe infrastructures en identifiant les trajectoires de détérioration, de préservation ou d'amélioration.

$$\rho_{i,t} = 1 - \frac{AR_{i,t}}{A_{i,t}} \quad (36)$$

Finalement, la part $C_{i,n,t}$ de croissance des infrastructures attribuable à chaque classe i entre une année n et une année t est évaluée pour identifier les secteurs priorisés pour soutenir la croissance et évaluer l'efficacité des investissements en fonction des résultats obtenus.

$$C_{i,n,t} = \frac{\frac{K_{i,n}}{K_n} \left(\frac{K_{i,t}}{K_{i,n}} - 1 \right)}{\frac{K_t}{K_n} - 1} \quad (37)$$

4.2 Calibration du modèle

Le modèle déterministe de soutenabilité budgétaire nécessite un cadre dans lequel une calibration est réalisé. À cet égard, le modèle commence en 2020 et termine en 2050, la distinction de la dépréciation de chaque infrastructure de chaque année de chaque classe débute quant à elle en 2024. Par conséquent, les infrastructures existantes avant 2024, sont considérées comme une seule et même génération pour chaque classe. Le cadre posé, la calibration de nombreuses valeurs, selon la disponibilité des données et leur niveau d'agrégation, est nécessaire (voir Annexe B.1). Les données comptables proviennent de l'échelle provinciale et traitent des financements par le Gouvernement du Québec, tandis que les données économiques proviennent de l'échelle fédérale et traitent des cofinancements par le Gouvernement du Québec et le Gouvernement fédéral.

De cette base, les objectifs de la politique monétaire du pays (Banque du Canada, 2021) et les valeurs historiques (voir Annexe B.2) permettent de faire le choix d'une inflation provenant de l'Indice des prix à la consommation π fixée à 2% pour les années futures.

$$\pi = 0,02 \quad (a)$$

En parallèle, l'historique de l'inflation provenant de l'Indice des prix de la construction de bâtiments institutionnels ψ ne permet pas de proposer la même hypothèse que l'inflation provenant de l'Indice des prix à la consommation π . En effet, il est observé que pour 10 des 15 années entre 2009 et 2023, ψ est supérieur à π . De plus, la valeur absolue de la différence moyenne ψ et π est plus élevée lorsque ψ est supérieur à π que lorsque ψ est inférieur à π , suggérant une asymétrie dans l'intensité des écarts entre les deux variables. Par conséquent, il est raisonnable de fixer ψ à un niveau supérieur à π dans le modèle. Puisqu'il est observé une différence moyenne entre π et ψ de 1,17% entre 2009 et 2023, ψ est donc fixé à 3,17% (voir Annexe B.2).

$$\psi = 0,02 + 0,0117 = 0,0317 \quad (b)$$

Le taux d'emprunt de la dette r est fixé à 3,2%, un résultat obtenu en s'appuyant sur la moyenne des valeurs annuelles de 2007 à 2024 (Gouvernement du Québec, 2025a).

$$r = 0,032 \quad (c)$$

L'élasticité ε du PIB à la valeur des infrastructures est fixée à 0,1 pour l'ensemble des infrastructures (Macdonald, 2008), considérant l'absence de consensus pour les infrastructures et les classes d'infrastructures.

$$\varepsilon = 0,1 \quad (d)$$

L'obtention de la croissance réelle de long terme du PIB potentiel ϕ nécessite de réarranger les équations (11) et (13), mais aussi de calculer le facteur ω_t de croissance réelle des infrastructures sur la croissance du PIB depuis l'équation (12). En effet, il s'agit de trouver la croissance nominale du PIB G_t pour lui soustraire l'inflation provenant de l'Indice des prix à la consommation π . Il en résulte une croissance réelle du PIB g_t auquel il faut encore déduire le facteur ω_t de croissance réelle des infrastructures sur la croissance du PIB pour obtenir ϕ . Ainsi, la moyenne des données annuelles entre 2009 et 2023 ont permis de fixer la croissance réelle de long terme du PIB potentiel ϕ à 1,84% (voir Annexe B.3).

$$G_t = \frac{Y_t}{Y_{t-1}} - 1 \quad (e)$$

$$g_t = G_t - \pi \quad (f)$$

$$\phi = E[g_t - \omega_t] = 0,0184 \quad (g)$$

Enfin, le ratio fixe s du solde primaire au PIB nominal s est fixé à 0% en supposant un équilibre entre les revenus et les dépenses de programmes du Gouvernement du Québec. Il importe de rappeler que le paiement des intérêts de la dette n'est pas inclus dans les dépenses de programmes.

$$s = 0 \quad (h)$$

Certaines variables nécessitent des ajustements dans la forme avant de pouvoir permettre des ajustement dans les valeurs. En effet, la mise en correspondance des données comptables et économiques est limitée par une classification différentes des infrastructures. Une nouvelle classification commune est donc proposée pour homogénéiser les variables par l'agrégation des anciennes classes comptables et économiques t en de nouvelles classes i (voir Tableau 5).

Tableau 5 : Modification de la classification des infrastructures

<i>t</i> des données comptables	<i>t</i> des données économiques	<i>i</i>
Administration gouvernementale	Ordre et sécurité publics	Administration et sécurité
Logements sociaux et communautaires	Logement et équipements collectifs	Logement et équipements collectifs
Municipalités		
Culture		
Développement du sport	Loisirs, culture et religion	Loisirs, culture et religion
Tourisme et activités récréatives		
Agriculture, forêts et faune	Protection de l'environnement	
Environnement		Développement économique et environnement
Développement du territoire nordique et des communautés autochtones	Combustibles et énergie	
Développement économique		
Éducation		
Enseignement supérieur		Enseignement
Recherche		
Services de garde éducatifs à l'enfance		
Ressources informationnelles	Communications	Communications
Santé et services sociaux	Santé	Santé
Réseau routier	Transports	Transports

<i>i</i> des données comptables	<i>i</i> des données économiques	<i>i</i>
Transport collectif	Équipement de transport en commun	Transport en commun
Transports maritime, aérien ferroviaire et autres		

Sources : Gouvernement du Québec (2025b) ; Statistique Canada (2025b).

Avec la nouvelle classification, le facteur de transition fixe τ peut être trouvé. Du fait d'un niveau d'agrégation différent, les investissements issus des données comptables, à savoir les investissements financés par le Gouvernement du Québec $I_{t,Q}$, se voient additionner la bonification et le maintien de toutes les anciennes classes. En parallèle, les investissements issus des données économiques, à savoir les investissements cofinancés par le Gouvernement du Québec et le Gouvernement fédéral $I_{t,C}$, se voient additionner les investissements de toutes les anciennes classes.

$$I_{t,Q} = \sum_{\iota} M_{\iota,t,Q} + \sum_{\iota} B_{\iota,t,Q} \quad (i)$$

$$I_{t,C} = \sum_{\iota} I_{\iota,t,C} \quad (j)$$

Le facteur de transition fixe τ est ensuite calculé en faisant le ratio des investissements financés par le Gouvernement du Québec $I_{t,Q}$ par les investissements cofinancés par le Gouvernement du Québec et le Gouvernement fédéral $I_{t,C}$. Bien qu'une légère augmentation du ratio soit constatée entre 2015 et 2024, ce qui peut d'ailleurs illustrer les différentes dynamiques d'investissements en infrastructures des échelles provinciale et fédérale, τ est fixé selon la valeur de la dernière année d'observation à 0,9051 (voir Annexe B.4).

$$\tau = \frac{I_{t,Q}}{I_{t,C}} = 0,9051 \quad (k)$$

Pour obtenir la bonification $B_{i,t,C}$ et le maintien $M_{i,t,C}$ cofinancés par le Gouvernement du Québec et le Gouvernement fédéral pour chaque nouvelle classe, l'utilisation de τ est nécessaire mais pas suffisante. En effet, la bonification $B_{i,t,Q}$ et le maintien $M_{i,t,Q}$ financés par le Gouvernement du Québec par nouvelle classe i doivent d'abord être calculés par l'agrégation conditionnelle de la bonification $B_{\iota,t,Q}$ et du maintien $M_{\iota,t,Q}$ financés par le Gouvernement du Québec par ancienne classe ι pour correspondre à la nouvelle classification.

$$B_{i,t,Q} = \sum_{\iota \in i} B_{\iota,t,Q} \quad (l)$$

$$M_{i,t,Q} = \sum_{\iota \in i} M_{\iota,t,Q} \quad (m)$$

La bonification $B_{i,t,C}$ et le maintien $M_{i,t,C}$ cofinancés par le Gouvernement du Québec et le Gouvernement fédéral par nouvelle classe peuvent dès lors être calculés en réarrangeant les équations (9) et (10).

$$B_{i,t,C} = \frac{B_{i,t,Q}}{\tau} \quad (n)$$

$$M_{i,t,C} = \frac{M_{i,t,Q}}{\tau} \quad (o)$$

La bonification $B_{i,t,C}$ et le maintien $M_{i,t,C}$ cofinancés par le Gouvernement du Québec et le Gouvernement fédéral par nouvelle classe permettent finalement de trouver les ratios fixes du maintien m_i et de la bonification b_i relatifs au PIB nominal en réarrangeant les équations (7) et (8) et en utilisant les valeurs de 2023 (voir Tableau 6).

$$b_i = \frac{B_{i,t,C}}{Y_t} \quad (p)$$

$$m_i = \frac{M_{i,t,C}}{Y_t} \quad (q)$$

Tableau 6 : Ratios de maintien et de bonification selon le PIB nominal pour l'année 2023

<i>i</i>	<i>m_i</i>	<i>b_i</i>
Administration et sécurité	0,0632%	0,0426%
Logement et équipements collectifs	0,1900%	0,0538%
Loisirs, culture et religion	0,0651%	0,0368%
Développement économique et environnement	0,0183%	0,0498%
Enseignement	0,4955%	0,4588%
Communications	0,1383%	0,0710%
Santé	0,2875%	0,4680%
Transports	0,5365%	0,1408%
Transport en commun	0,1449%	0,1257%

Toujours dans la modification de la forme des variables, la valeur nominale des infrastructures $K_{i,t}$ de chaque nouvelle classe est calculée par l'agrégation conditionnelle de la valeur nominale des infrastructures $K_{\iota,t}$ par ancienne classe ι pour correspondre à la nouvelle classification. Il est à noter que de grandes classes émergent de cette agrégation, notamment, l'*Enseignement*, la *Santé*, les *Transports* et le *Développement économique et environnement* (voir Tableau 7).

$$K_{i,t} = \sum_{\iota \in i} K_{\iota,t} \quad (r)$$

Tableau 7 : Estimation du capital des nouvelles classes d'infrastructures en 2024 (en millions de dollars nominaux)

<i>i</i>	$K_{i,2024}$
Administration et sécurité	3 482
Logement et équipements collectifs	11 223
Loisirs, culture et religion	10 352
Développement économique et environnement	71 221
Enseignement	37 935
Communications	473
Santé	23 011
Transports	55 150
Transport en commun	2 380

Une agrégation conditionnelle est ensuite réalisée, en pondérant les âges moyens des anciennes classes $A_{\iota,t}$ par la valeur nominale des infrastructures des anciennes et des nouvelles classes, afin d'estimer l'âge moyen des nouvelles classes $A_{i,t}$.

$$A_{i,t} = \frac{\sum_{\iota \in i} K_{\iota,t} A_{\iota,t}}{K_{i,t}} \quad (s)$$

L'âge moyen $A_{i,t}$ des nouvelles classes connu, l'équation (29) peut être manipulée afin de passer d'une définition cumulative pondérée à une forme récursive. Une réorganisation de la nouvelle équation (voir Annexe B.5) permet alors d'isoler la bonification cumulée historiquement $\sum_{n=-\infty}^{t-1} B_{i,n,C}$ cofinancée par le Gouvernement du Québec et du Gouvernement fédéral par classe jusqu'à la période à laquelle débute le modèle, soit en 2020 (voir Tableau 8).

$$\begin{aligned}
A_{i,t} &= \frac{\sum_{n=-\infty}^t B_{i,n,C} a_{i,n,t}}{\sum_{n=-\infty}^t B_{i,n,C}} = (A_{i,t-1} + 1) \left(1 - \frac{B_{i,t,C}}{\sum_{n=-\infty}^t B_{i,n,C}} \right) \\
\Leftrightarrow \frac{B_{i,t,C}}{1 - \frac{A_{i,t}}{(A_{i,t-1} + 1)}} - B_{i,t,C} &= \sum_{n=-\infty}^{t-1} B_{i,n,C}
\end{aligned} \tag{t}$$

Tableau 8 : Estimation de la bonification cumulé historiquement par classe jusqu'en 2020 (en millions de dollars nominaux)

<i>i</i>	$\sum_{n=-\infty}^{2020} B_{i,n,C}$
Administration et sécurité	4969,3292
Logement et équipements collectifs	5768,5994
Loisirs, culture et religion	3260,3426
Développement économique et environnement	3125,4889
Enseignement	23266,2372
Communications	4183,8981
Santé	19411,8962
Transports	8271,9775
Transport en commun	10741,6815

Finalement, le facteur de sensibilité de la dépréciation à l'âge réel ζ_i de chaque nouvelle classe d'infrastructures doit être attribué. Pour y parvenir, il est décidé de faire correspondre la dépréciation tenant compte du maintien $\delta_{i,t}$ avec la dépréciation géométrique $\hat{\delta}_{i,t}$. Le choix a donc été fait d'écartier une correspondance avec l'amortissement comptable $\check{\delta}_{i,t}$ du fait de la non-linéarité de la dépréciation. De plus, l'utilisation de générations n'est pas nécessaire dans cet exercice, d'où la disparition d'un indice. Concernant $\hat{\delta}_{i,t}$, le taux de dépréciation géométrique ξ_i doit être attribué à chaque nouvelle classe (voir Tableau 9). Concernant $\delta_{i,t}$, les dépréciations de base θ_i sont fixées à zéro pour que les deux fonctions de dépréciation puissent être égales à un à la période de construction ($t = 0$), tandis que le maintien $M_{i,t}$ de chaque classe est fixé à zéro pour que les deux fonctions de dépréciation puissent évoluer sans maintien étant donné le rôle inexistant des investissements dans la dépréciation géométrique $\hat{\delta}_{i,t}$. L'hypothèse selon laquelle les taux de dépréciation géométrique ξ_i ont été estimés en l'absence d'investissements en maintien est donc posée. Dans de telles conditions, l'âge réel $ar_{i,n,t}$ est sensiblement identique à l'âge, lesquels sont égaux à t du fait de la non-considération des générations.

$$\delta_{i,t} = e^{-\zeta_i t} = \hat{\delta}_{i,t} = (1 - \xi_i)^t \quad (u)$$

Tableau 9 : Choix du niveau de dépréciation géométrique

<i>i</i>	Description de l'actif (code)	ξ_i
Administration et sécurité	Bâtiments de bureaux (1013)	0,067
Logement et équipements collectifs	Construction technique des eaux usées (5004)	0,074
Loisirs, culture et religion	Bâtiments récréatifs intérieurs (1019)	0,074
Développement économique et environnement	Centrales électriques (5005)	0,075
Enseignement	Écoles, collèges, universités et autres bâtiments éducatifs (1201)	0,055
Communications	Construction d'ingénierie des communications (5006)	0,128
Santé	Hôpitaux, centres de santé, cliniques et autres centres de soins de santé (1204)	0,061
Transports	Autoroutes, routes, rues (2202)	0,106
Transport en commun	Équipements de transports (7001)	0,185

Source : Baldwin *et al.* (2015).

La correspondance des courbes entre $\delta_{i,t}$ et $\hat{\delta}_{i,t}$ permettent ainsi d'obtenir ζ_i pour chaque nouvelle classe *i* (voir Tableau 10 et Annexe B.6).

Tableau 10 : Estimation des facteurs de l'âge pour la dépréciation tenant compte du maintien

<i>i</i>	ζ_i
Administration et sécurité	0,0694
Logement et équipements collectifs	0,0769
Loisirs, culture et religion	0,0769
Développement économique et environnement	0,0780
Enseignement	0,0566
Communications	0,1370
Santé	0,0629
Transports	0,1120
Transport en commun	0,2046

Les valeurs du facteur de sensibilité de la dépréciation à l'âge réel ζ_i de chaque nouvelle classe d'infrastructures étant estimées, la dépréciation tenant compte du maintien $\delta_{i,t}$ doit pouvoir réintégrer les éléments négligés lors de sa mise en correspondance avec la dépréciation géométrique $\hat{\delta}_{i,t}$. Dans ce sens, il est considéré que toute nouvelle infrastructure subit une légère

dépréciation de base θ_i à la fin de la période de construction, contrairement à $\hat{\delta}_{i,t}$. θ_i est alors fixé à 0,01 pour obtenir une dépréciation de base de 0,99.

$$\theta_i = 0,01 \quad (v)$$

$$\Leftrightarrow e^{-0,01} \approx 0,99$$

Il importe finalement de s'interroger sur le choix arbitraire du facteur d'efficacité du maintien à ralentir l'âge réel γ_i . En effet, des valeurs trop élevées sont susceptibles d'empêcher toute dépréciation tenant compte du maintien, tandis que des valeurs trop faibles sont susceptibles de faire disparaître toute incitation à effectuer du maintien. En faisant abstraction de l'effet de la valeur des infrastructures sur la croissance économique, le choix est fait d'un γ_i associé à un choc plutôt élevé sur le ratio de la valeur nominale des infrastructures au PIB nominal au début de la simulation. Ce choix repose d'une part sur la tendance haussière des investissements en infrastructures planifiés par le Gouvernement du Québec qui devrait entraîner une augmentation de la valeur nominale des infrastructures, et d'autre part sur l'effet positif de la valeur des infrastructures sur la croissance économique attendu avec la tendance haussière des investissements en infrastructures qui devrait atténuer le choc du ratio de la valeur nominale des infrastructures au PIB nominal par la hausse de son dénominateur (voir Figure 9). Ainsi, en l'absence d'études empiriques disponibles et dans un souci de simplification des études de sensibilité, une valeur commune de 0,0002 est attribuée à l'ensemble des facteurs d'efficacité du maintien à ralentir l'âge réel γ_i .

$$\gamma_i = 0,0002 \quad (w)$$

Les équations étant formalisées et les données ajustées en vue de leur utilisation, le modèle déterministe est construit pour en tirer des résultats. Le langage de programmation utilisé est Python (voir Annexe B.7).

5. Résultats

Dans ce chapitre, une analyse de sensibilité commence par évaluer individuellement l'effet de la distinction entre le maintien et la bonification sur la valeur des infrastructures et l'effet de la valeur des infrastructures sur la croissance économique. La valeur nominale des infrastructures relative au PIB nominal est alors utilisée comme indicateur pour étudier la cohérence dans la dynamique des variables. L'analyse de sensibilité se poursuit avec l'évaluation conjointe des effets. La dette nette relative au PIB nominal est alors utilisée comme indicateur pour étudier la dynamique de la soutenabilité budgétaire. Les résultats sont finalement présentés.

5.1 Effet de la valeur des infrastructures sur la croissance économique

La sensibilité des effets présentés dans le modèle nécessite une analyse approfondie. Pour commencer, l'effet de la valeur des infrastructures sur la croissance économique nécessite une analyse de sensibilité sans considérer l'effet de la distinction entre le maintien et la bonification sur la valeur des infrastructures. Il convient de noter que le PIB évolue selon les changements dans la dynamique du facteur ω_t de croissance réelle des infrastructures sur la croissance du PIB qui dépendent de deux éléments. D'une part, pour une même élasticité du PIB à la valeur des infrastructures, l'évolution du PIB Y_t dépend du signe de la croissance réelle o_t des infrastructures par l'intermédiaire du facteur ω_t de croissance réelle des infrastructures sur la croissance du PIB : la présence de ω_t amplifie ou atténue la croissance de Y_t selon que o_t est, respectivement, positif ou négatif, comparativement au modèle standard sans effets.

$$o_t > 0 \Rightarrow \omega_t > 0 \Rightarrow Y_t \uparrow$$

$$o_t < 0 \Rightarrow \omega_t < 0 \Rightarrow Y_t \downarrow$$

D'autre part, pour une même croissance réelle des infrastructures, l'évolution du PIB Y_t dépend de l'intensité de l'élasticité ε du PIB à la valeur des infrastructures par l'intermédiaire du facteur ω_t de croissance réelle des infrastructures sur la croissance du PIB : la présence de ω_t modifie faiblement ou fortement la croissance de Y_t selon que ε est, respectivement, bas ou élevé, comparativement au modèle standard sans effets.

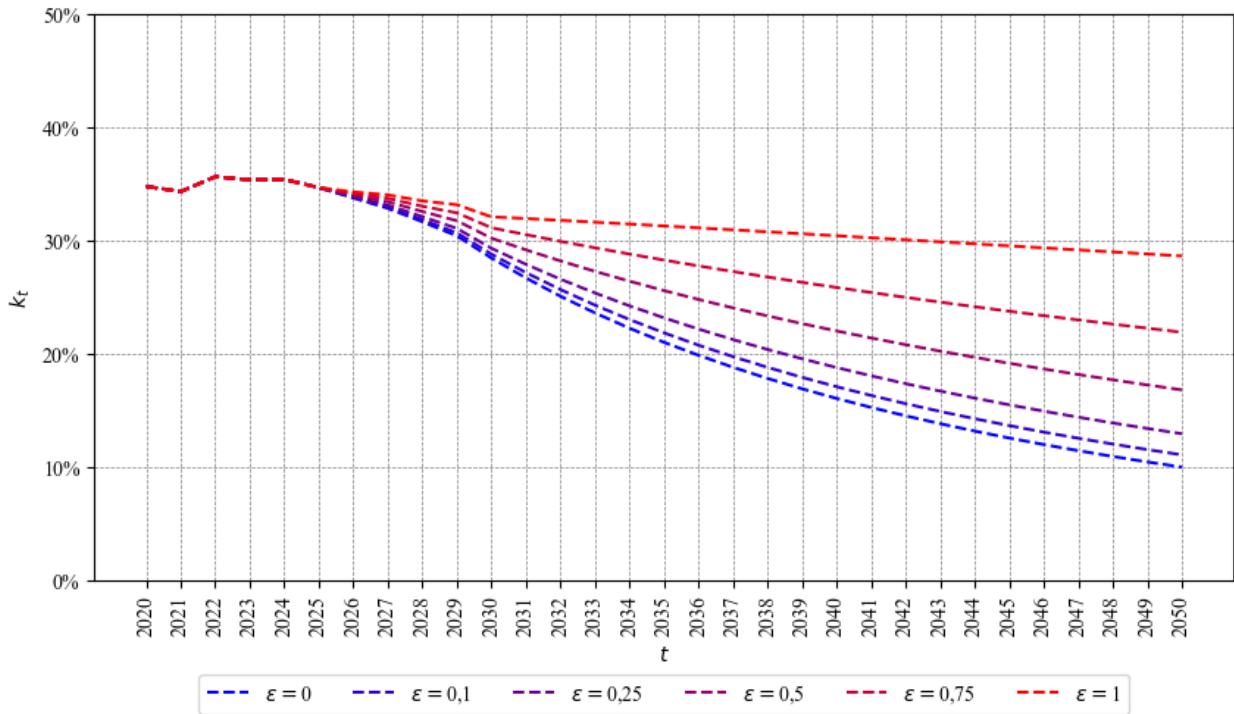
$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \omega_t = 0 \Rightarrow \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} Y_{t+1} - Y_t = Y_t(\phi + \pi)$$

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 1} \omega_t = o_t \Rightarrow \lim_{\varepsilon \rightarrow 1} Y_{t+1} - Y_t = Y_t(o_t + \phi + \pi)$$

Par conséquent, il importe d'évaluer la sensibilité du ratio k_t de la valeur nominale des infrastructures relative au PIB nominal selon le signe de o_t et l'intensité de l'élasticité ε du PIB à la valeur des infrastructures. Dans un scénario où les volumes d'investissements entraînent une diminution de la valeur nominale des infrastructures K_t et donc un o_t négatif, l'augmentation de ε vient avec une diminution du PIB Y_t qui réduit la baisse de k_t (voir Figure 7).

$$(o_t|\varepsilon \rightarrow 0) = (o_t|\varepsilon \rightarrow 1) < 0 \cap (K_t|\varepsilon \rightarrow 0) = (K_t|\varepsilon \rightarrow 1) > 0 \\ \Rightarrow (Y_t|\varepsilon \rightarrow 0) > (Y_t|\varepsilon \rightarrow 1) \Rightarrow (k_t|\varepsilon \rightarrow 0) < (k_t|\varepsilon \rightarrow 1)$$

Figure 7 : Évolution de la valeur nominale des infrastructures avec croissance réelle des infrastructures négative pour différentes élasticités du PIB à la valeur des infrastructures en l'absence des facteurs de productivité du maintien en réduction de l'âge réel (en pourcentage du PIB nominal)



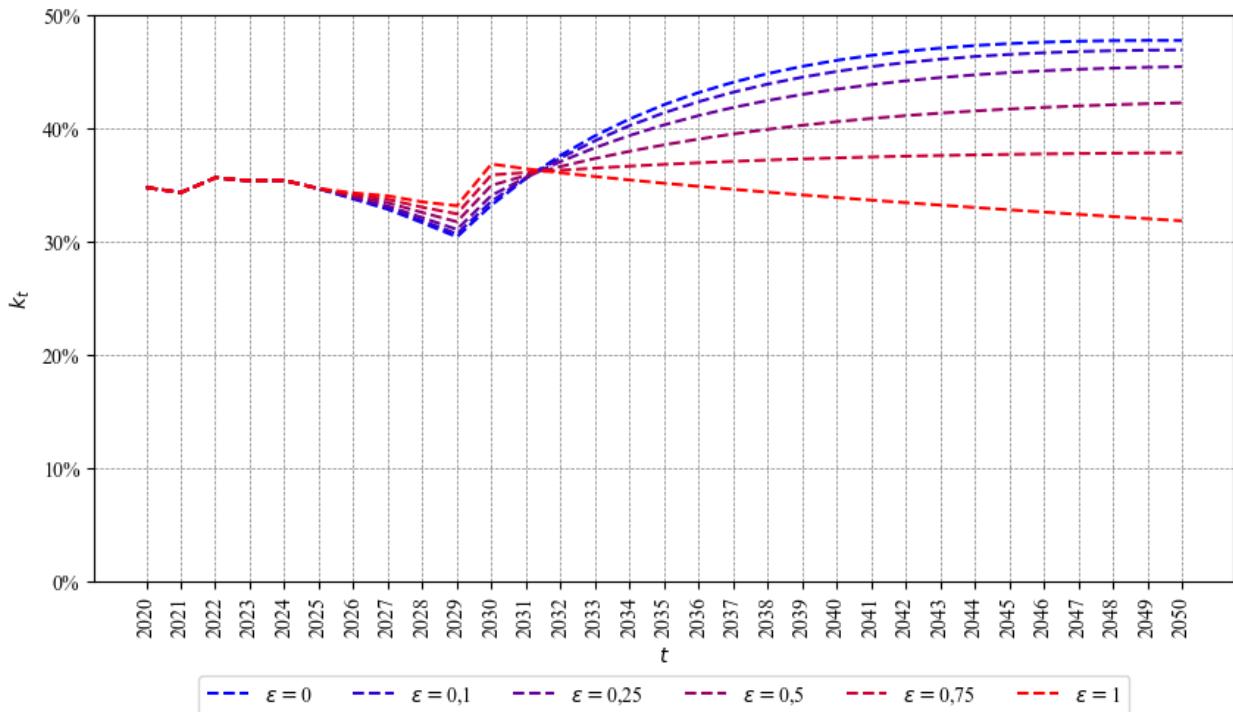
En parallèle, dans un scénario où les volumes d'investissements entraînent non seulement une augmentation de K_t mais aussi un o_t positif, l'augmentation de ε vient avec une augmentation de Y_t qui réduit l'augmentation de k_t .

$$(o_t|\varepsilon \rightarrow 0) = (o_t|\varepsilon \rightarrow 1) > 0 \quad \cap \quad (K_t|\varepsilon \rightarrow 0) = (K_t|\varepsilon \rightarrow 1) > 0$$

$$\Rightarrow (Y_t|\varepsilon \rightarrow 0) < (Y_t|\varepsilon \rightarrow 1) \quad \Rightarrow \quad (k_t|\varepsilon \rightarrow 0) > (k_t|\varepsilon \rightarrow 1)$$

Toutefois cette affirmation n'est pas vraie pour l'ensemble de la période étudiée. En effet, une élasticité du PIB à la valeur des infrastructures plus élevée apparaît paradoxalement plus favorable à l'obtention d'un ratio de la valeur nominale des infrastructures relative au PIB nominal plus élevé durant la période 2025–2031. Cette dynamique s'explique par la trajectoire exogène de la bonification et du maintien, prédefinis au début de la simulation dans le cadre du PQI 2025–2035. Ces niveaux d'investissement, trop faibles à court terme, ne permettent pas l'obtention d'une croissance réelle des infrastructures positive durant cette phase. Ce biais transitoire justifie que la période 2025–2031 soit écartée de l'analyse de sensibilité (voir Figure 8).

Figure 8 : Évolution de la valeur nominale des infrastructures avec croissance réelle des infrastructures positive pour différentes élasticités du PIB à la valeur des infrastructures en l'absence des facteurs de productivité du maintien en réduction de l'âge réel (en pourcentage du PIB nominal)



Aux vues de cette analyse de sensibilité, il semble préférable d’investir de manière soutenue dans les infrastructures en présence d’une élasticité du PIB à la valeur des infrastructures élevée, non seulement pour stimuler favorablement la croissance économique, mais aussi pour éviter la baisse de la valeur nominale des infrastructures qui peut peser négativement sur le PIB. À l’inverse, la présence d’une élasticité du PIB à la valeur des infrastructures faible n’accélère ou ne ralentit que faiblement la croissance économique selon que les investissements sont, respectivement, suffisamment élevés pour entraîner une croissance réelle des infrastructures positive ou suffisamment faibles pour entraîner une croissance réelle des infrastructures négative. Dans le cas du Québec, la stratégie d’investissements en infrastructures ne nécessite donc pas nécessairement d’augmentations soutenues du fait de répercussions économiques potentielles relativement faibles.

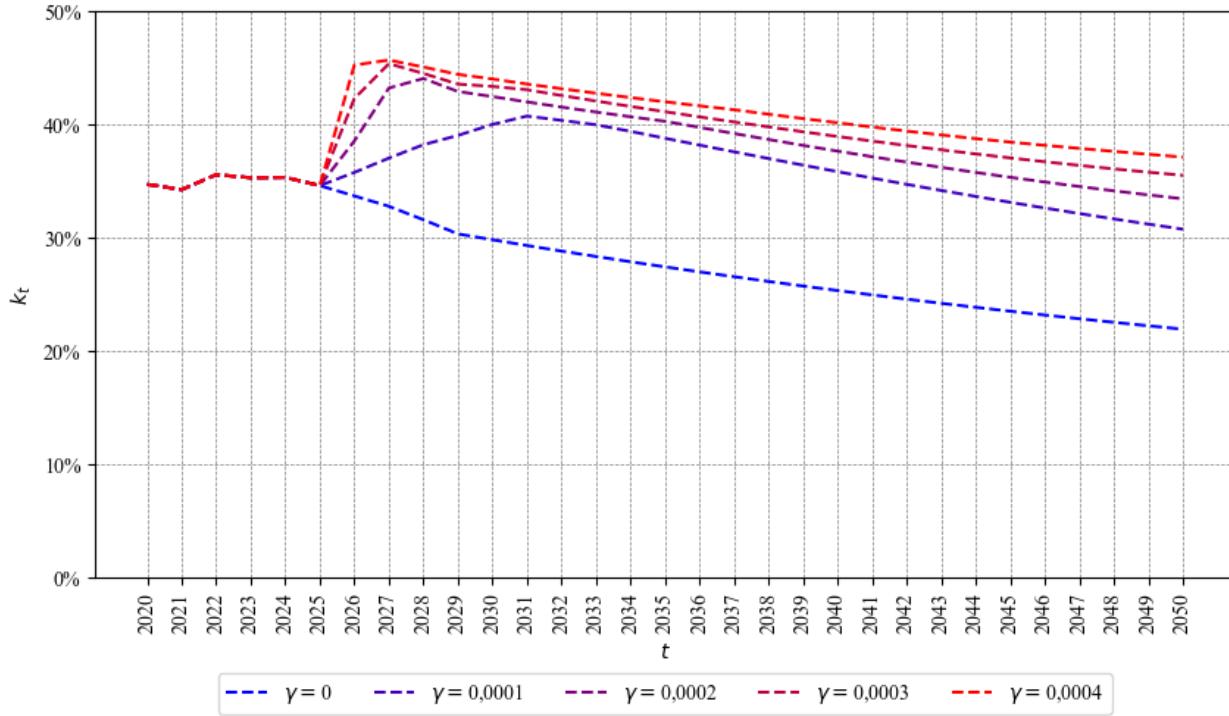
5.2 Effet de la distinction entre le maintien et la bonification sur la valeur des infrastructures

L’effet de la distinction entre le maintien et la bonification sur la valeur des infrastructures nécessite aussi une analyse de sensibilité sans considérer l’effet de la valeur des infrastructures sur la croissance économique. En fixant les facteurs de sensibilité de la dépréciation à l’âge réel ζ_i et les dépréciations de base θ_i , les changements dans la dynamique de la dépréciation dépendent principalement des facteurs d’efficacité du maintien à ralentir l’âge réel γ_i et des ratios fixes du maintien m_i relatifs au PIB nominal.

D’une part donc, la valeur nominale des infrastructures K_t et le ratio k_t de la valeur nominale des infrastructures relative au PIB nominal évoluent selon le niveau des facteurs d’efficacité du maintien à ralentir l’âge réel γ_i par l’intermédiaire du niveau de dépréciation tenant compte du maintien : la présence des γ_i entraîne nécessairement une atténuation de la dépréciation tenant compte du maintien, augmentant ainsi K_t et k_t faiblement ou fortement selon que γ_i est, respectivement, bas ou élevé (voir Figure 9).

$$(K_t|\gamma_i \neq 0) > (K_t|\gamma_i = 0) \Leftrightarrow (k_t|\gamma_i \neq 0) > (k_t|\gamma_i = 0) \quad \forall i$$

Figure 9 : Évolution de la valeur nominale des infrastructures pour différents facteurs de d'efficacité du maintien à ralentir l'âge réel en l'absence de l'élasticité du PIB à la valeur des infrastructures (en pourcentage du PIB nominal)



Par conséquent, il est préférable d'investir beaucoup dans le maintien si γ_i est faible, mais aussi si l'âge réel des infrastructures $ar_{i,n,t}$ ou le facteur de sensibilité de la dépréciation à l'âge réel ζ_i est élevé. À l'inverse, il est préférable d'investir peu dans le maintien si γ_i est élevé, mais aussi si l'âge réel des infrastructures $ar_{i,n,t}$ ou le facteur de sensibilité de la dépréciation à l'âge réel ζ_i est faible. Quoi qu'il en soit, l'implémentation de l'effet de la distinction entre le maintien et la bonification sur la valeur des infrastructures permet nécessairement d'obtenir une valeur nominale des infrastructures supérieure ou égale à valeur nominale des infrastructures dans les modèles de projection déterministes sans effets.

D'autre part, la distribution des investissements selon leur nature peut aussi entraîner des répercussions sur le ratio k_t de la valeur nominale des infrastructures au PIB nominal. Par conséquent, il importe de s'interroger sur l'optimalité et l'efficience des stratégies de distribution des investissements selon leur nature d'un point de vue axé sur le ratio de la valeur des infrastructures relative au PIB nominal, qui doit viser l'obtention du plus haut k_t possible pour un même volume d'investissements totaux et une même répartition des investissements selon les classes d'infrastructures. Pour cette analyse, les scénarios peuvent être construits en fixant

différents ratios de la bonification et du maintien relatifs au PIB nominal, qui varient entre zéro et la somme de ces ratios pour chaque classe de sorte à redistribuer les investissements totaux prévus pour chaque classe selon leur nature. Le facteur d'efficacité du maintien à ralentir l'âge réel γ_i est alors fixé pour chaque classe selon les valeurs déterminés durant la calibration.

Avec la stratégie du 100% maintien sur le long terme, l'absence de nouvelle construction ne permet pas d'augmenter la valeur nominale des infrastructures, la dépréciation tenant compte du maintien fait baisser la valeur nominale des infrastructures existantes, tandis que le PIB continue d'augmenter. Même si le facteur d'efficacité du maintien à ralentir l'âge réel par classe et le ratio fixe du maintien relatif au PIB nominal par classe sont suffisamment élevés pour permettre de maintenir parfaitement la valeur nominale des infrastructures face à la dépréciation tenant compte du maintien, la stratégie du 100% maintien a tendance à observer une diminution de son ratio k_t de la valeur nominale des infrastructures au PIB nominal. La stratégie du 100% maintien est donc inefficiente et sous-optimale selon un point de vue axé sur le ratio de la valeur des infrastructures relative au PIB nominal.

Avec la stratégie du 100% bonification sur le long terme, l'absence de maintien revient à négliger les conséquences de la dépréciation, quelles qu'elles soient, sur la valeur nominale. La valeur nominale des infrastructures peut augmenter ou diminuer selon que le facteur de sensibilité de la dépréciation à l'âge réel par classe est, respectivement, suffisamment faible ou suffisamment fort, tandis que le PIB continue d'augmenter. Le ratio k_t de la valeur nominale des infrastructures au PIB nominal peut donc augmenter ou diminuer au regard des facteurs de la simulation. La stratégie du 100% bonification est donc inefficiente et sous-optimale selon un point de vue axé sur le ratio de la valeur nominale des infrastructures relative au PIB nominal.

Les stratégies composées d'un mix bonification-maintien peuvent aussi être sujettes à une augmentation ou à une diminution du ratio k_t de la valeur nominale des infrastructures au PIB nominal selon les forces en jeu. Si certaines stratégies issues du mix bonification-maintien ne permettent pas d'obtenir un ratio k_t de la valeur nominale des infrastructures au PIB nominal plus élevé que les stratégies du 100% maintien ou du 100% bonification, d'autres surpassent ces deux stratégies et sont donc considérées comme efficientes selon un point de vue axé sur le ratio de la valeur nominale des infrastructures relative au PIB nominal. Parmi les stratégies efficientes, seule

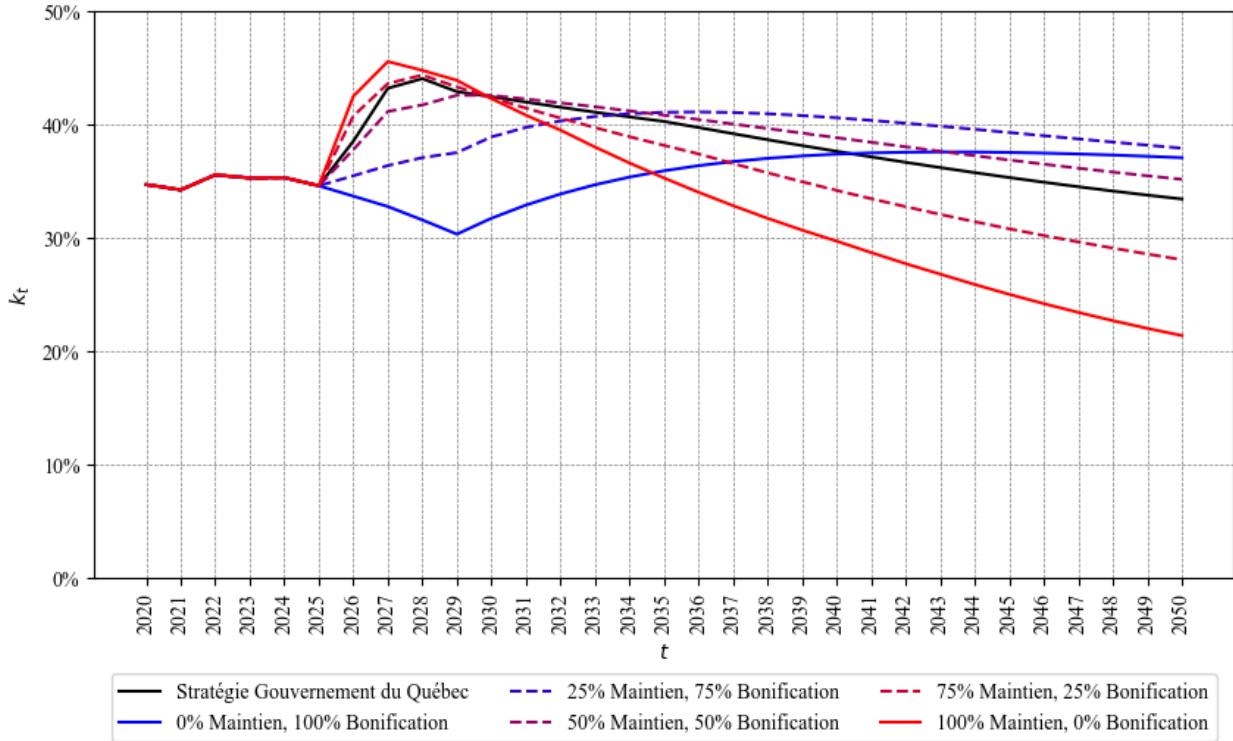
celle avec le plus haut ratio de la valeur nominale des infrastructures relative au PIB nominal est considérée comme optimale au regard des facteurs de la simulation.

En étudiant les résultats de la simulation selon les calibrations du facteur d'efficacité du maintien à ralentir l'âge réel γ_i et les ratios de la bonification et du maintien relatifs au PIB nominal, il est possible d'observer que certaines stratégies de mix bonification-maintien sont efficientes en se retrouvant au-dessus des stratégies du 100% maintien et du 100% bonification. En d'autres termes, il semble possible d'améliorer le ratio k_t de la valeur nominale des infrastructures au PIB nominal avec un même volume d'investissements et une même répartition entre les classes que la stratégie du Gouvernement du Québec.

Avec un regard non plus sur les résultats finaux de la simulation, mais sur l'évolution des ratios k_t de la valeur nominale des infrastructures au PIB nominal tout au long de la simulation, il est à observer que la stratégie du 100% maintien apparaît comme l'une des meilleures stratégies sur la période 2025-2029. Ces résultats peuvent s'expliquer par un besoin criant de maintien au Québec, la présence d'une telle nature d'investissement en volume important augmente significativement la valeur nominale des infrastructures à sa mise en place, au début de la simulation. Dans ce sens, la stratégie du 100% bonification laisse observer un ratio k_t de la valeur nominale des infrastructures au PIB nominal qui continue de baisser jusqu'en 2029, signe que la bonification n'est pas la nature d'investissements à favoriser durant les premières années de la simulation. Cette dynamique de court terme ne modifie néanmoins pas les résultats sur le long terme, étant donné que la stratégie du 100% maintien ne parvient pas à être efficiente à la fin de la simulation en obtenant un ratio k_t de la valeur nominale des infrastructures au PIB nominal inférieur à celui de la stratégie du 100% bonification à partir de 2034.

Ainsi, la stratégie proposée par le Gouvernement du Québec de distribution des investissements planifiée selon leur nature, plutôt tournée vers le maintien que vers la bonification, peut être justifiée par le besoin de maintien immédiat dans les infrastructures. Néanmoins, une telle stratégie ne permet d'obtenir des résultats efficients qu'entre 2031 et 2040 et n'est en aucun temps optimale car se trouvant en-dessous d'au moins une autre stratégie durant toute la période de la simulation (voir Figure 10).

Figure 10 : Évolution de la valeur nominale des infrastructures pour différentes distributions des investissements selon leur nature en l'absence de l'élasticité du PIB à la valeur des infrastructures (en pourcentage du PIB nominal)



5.3 Effets conjoints

Maintenant que les effets de la valeur des infrastructures sur la croissance économique et de la distinction entre le maintien et la bonification sur la valeur des infrastructures ont été étudiés individuellement, des analyses de sensibilité avec la conjonction des effets restent à faire. D'abord, il importe d'évaluer la sensibilité du ratio dn_t de dette nette relative au PIB nominal selon l'élasticité du PIB à la valeur des infrastructures en présence de l'efficacité du maintien à ralentir l'âge réel de chaque classe. Si les investissements en infrastructures, en plus d'augmenter la dette nette DN_t , entraînent une diminution de la valeur nominale des infrastructures et donc une croissance réelle des infrastructures négative, l'augmentation de l'élasticité ε du PIB à la valeur des infrastructures vient avec une diminution du PIB Y_t qui augmente la hausse du ratio dn_t de dette nette relative au PIB nominal.

$$(o_t|\varepsilon \rightarrow 0) = (o_t|\varepsilon \rightarrow 1) < 0 \quad \cap \quad (DN_t|\varepsilon \rightarrow 0) = (DN_t|\varepsilon \rightarrow 1) > 0$$

$$\Rightarrow (Y_t|\varepsilon \rightarrow 0) > (Y_t|\varepsilon \rightarrow 1) \Rightarrow (dn_t|\varepsilon \rightarrow 0) < (dn_t|\varepsilon \rightarrow 1)$$

À l'inverse, si les investissements en infrastructures, en plus d'augmenter la dette nette DN_t , entraînent une augmentation de la valeur nominale de la valeur nominale des infrastructures et une croissance réelle des infrastructures positive, l'augmentation de ε vient avec une augmentation de Y_t qui réduit la hausse de dn_t .

$$\begin{aligned} (o_t | \varepsilon \rightarrow 0) &= (o_t | \varepsilon \rightarrow 1) > 0 \quad \cap \quad (DN_t | \varepsilon \rightarrow 0) = (DN_t | \varepsilon \rightarrow 1) > 0 \\ \Rightarrow (Y_t | \varepsilon \rightarrow 0) < (Y_t | \varepsilon \rightarrow 1) &\Rightarrow (dn_t | \varepsilon \rightarrow 0) > (dn_t | \varepsilon \rightarrow 1) \end{aligned}$$

Ce dernier cas s'applique au scénario de la stratégie du Gouvernement du Québec. En présence du facteur d'efficacité du maintien à ralentir l'âge réel γ_i de chaque classe, les variations de l'élasticité ε du PIB à la valeur des infrastructures peuvent entraîner des changements majeurs sur le niveau de la dette nette en proportion du PIB nominal. En effet, le scénario avec une élasticité ε du PIB à la valeur des infrastructures de un présente un avantage d'environ 10 points de pourcentage par rapport au scénario sans effets. Il est aussi à noter que le scénario avec une élasticité ε du PIB à la valeur des infrastructures de zéro suit la courbe du scénario standard sans effets, ce qui s'explique par un effet de la valeur des infrastructures sur la croissance économique qui ne s'exprime pas et qui empêche tout changement du niveau de dette nette en proportion du PIB nominal par l'effet de la distinction entre le maintien et la bonification sur la valeur des infrastructures.

Avec un regard sur l'évolution des ratios dn_t de dette nette relative au PIB nominal tout au long de la simulation plutôt que sur les résultats finaux, il est à remarquer que l'ensemble des scénarios avec ou sans effets observent une augmentation entre le début et la fin de la simulation, ce qui laisse transparaître que même une élasticité ε du PIB à la valeur des infrastructures élevée ne permet pas d'augmenter suffisamment le PIB nominal pour réduire le ratio dn_t de dette nette relative au PIB nominal.

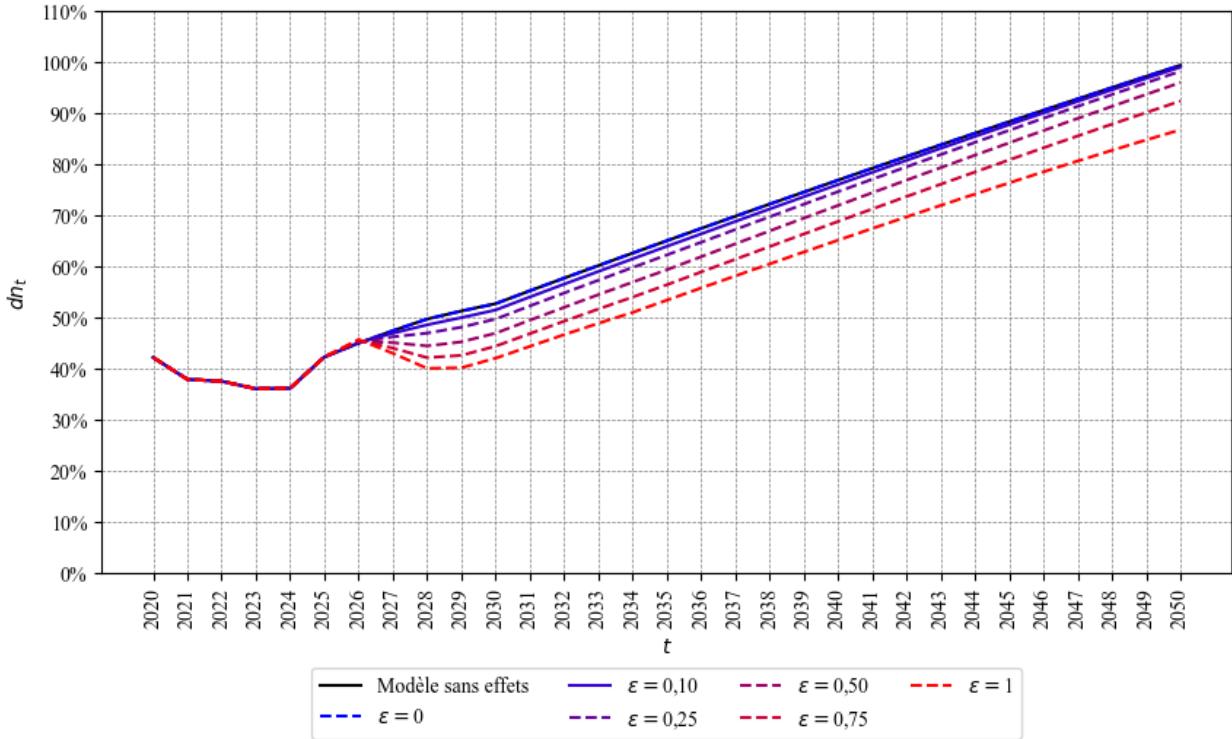
Cette trajectoire est à mettre en parallèle avec l'évolution des écarts. En effet, les scénarios pour lesquels l'élasticité ε du PIB à la valeur des infrastructures est non nulle observent l'apparition de la majeure partie de leur écart avec le scénario sans effets au début de la simulation entre 2026 et 2029, ce qui peut s'expliquer par les choix d'investissements conséquents en infrastructures du Gouvernement du Québec. Par la suite, les ratios fixes de la bonification et du maintien relatifs au PIB nominal, calculés à partir d'investissements moins élevés que ceux présentés dans le dernier PQI, ne permettent plus d'élargissements aussi conséquents qu'aux premières années.

De plus, les scénarios pour lesquels l'élasticité ε du PIB à la valeur des infrastructures est non nulle disposent de dynamiques différentes pour l'écart avec le scénario sans effets. Pour des élasticités ε du PIB à la valeur des infrastructures entre 0,1 et 0,5, l'écart tend à diminuer avec le temps, ce qui s'explique par des effets conjoints qui accentuent la divergence entre la croissance de la dette nette et celle du PIB nominal, considérant une croissance de la dette nette plus élevée que la croissance du PIB nominal. La dynamique haussière du ratio dn_t de dette nette relative au PIB nominal peut alors continuer.

Pour une élasticité ε du PIB à la valeur des infrastructures de 0,75, l'écart tend à se maintenir avec le temps, ce qui s'explique par des effets conjoints qui stabilisent la divergence entre la croissance de la dette nette et celle du PIB nominal, considérant une croissance de la dette nette plus élevée que la croissance du PIB nominal. La dynamique haussière du ratio dn_t de dette nette relative au PIB nominal peut donc également continuer.

Pour une élasticité ε du PIB à la valeur des infrastructures de 1, l'écart tend à augmenter avec le temps, ce qui s'explique par des effets conjoints qui réduisent la divergence entre la croissance de la dette nette et celle du PIB nominal, considérant une croissance de la dette nette plus élevée que la croissance du PIB nominal. La dynamique haussière du ratio dn_t de dette nette relative au PIB nominal n'est donc pas empêché jusqu'à la fin de la simulation, mais pourrait être inversée dans un horizon plus lointain si la croissance du PIB nominal parvient à être plus élevée que la croissance de la dette nette (voir Figure 11).

Figure 11 : Évolution de la dette nette pour différentes élasticités du PIB à la valeur des infrastructures en présence des facteurs de productivité du maintien en réduction de l'âge réel (en pourcentage du PIB nominal)



Ensuite, il importe d'évaluer la sensibilité du ratio dn_t de dette nette relative au PIB nominal selon le facteur d'efficacité du maintien à ralentir l'âge réel γ_i de chaque classe en présence de l'élasticité du PIB à la valeur des infrastructures. Avec l'augmentation des facteurs d'efficacité du maintien à ralentir l'âge réel γ_i , le PIB augmente et fait diminuer dn_t .

$$(o_t | \gamma_i \rightarrow 0) > (o_t | \gamma_i \rightarrow 0,0004) \cap (DN_t | \gamma_i \rightarrow 0) = (DN_t | \gamma_i \rightarrow 0,0004) > 0$$

$$\Rightarrow (Y_t | \gamma_i \rightarrow 0) < (Y_t | \gamma_i \rightarrow 0,0004) \Rightarrow (dn_t | \gamma_i \rightarrow 0) > (dn_t | \gamma_i \rightarrow 0,0004)$$

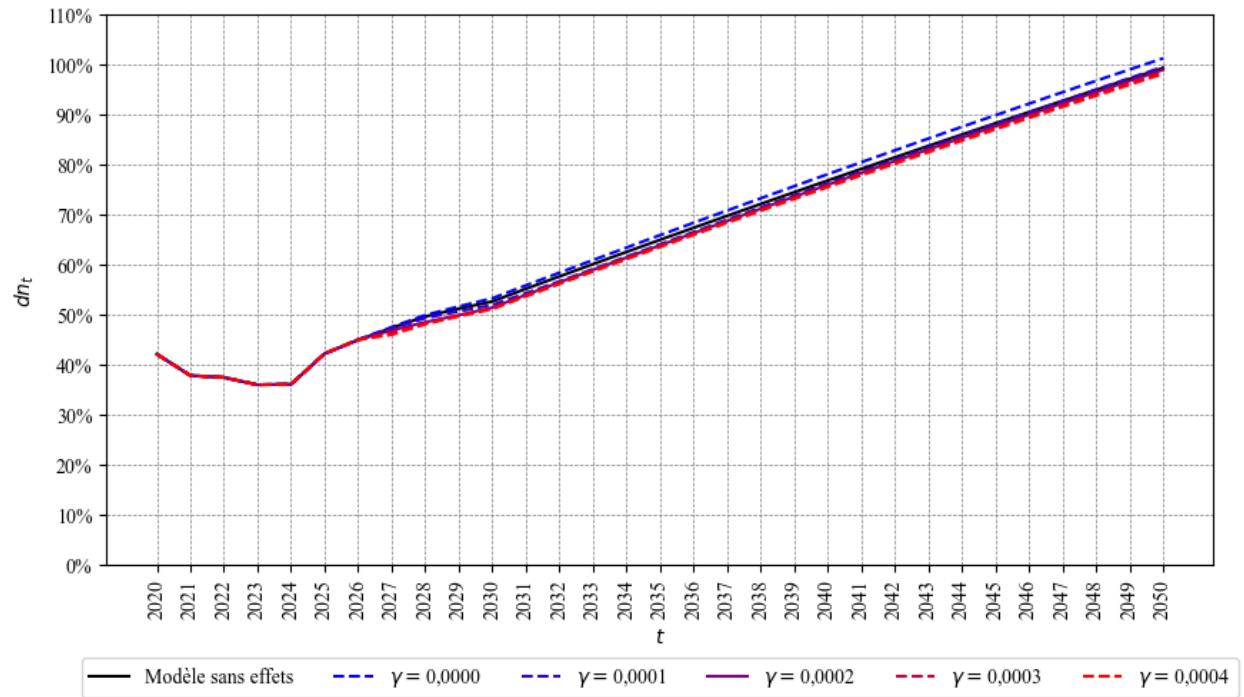
Aussi, il est à observer que la variation du facteur d'efficacité du maintien à ralentir l'âge réel γ_i de chaque classe produit des scénarios avec des ratios dn_t de dette nette relative au PIB nominal plus faibles et plus élevés que ceux du scénario standard sans effets. Une telle situation peut s'expliquer par la croissance réelle des infrastructures o_t . En effet, si les facteurs d'efficacité du maintien à ralentir l'âge réel γ_i sont suffisamment forts pour faire passer la croissance réelle des infrastructures o_t du signe négatif en l'absence d'effets au signe positif en présence d'effets, une hausse du PIB nominal se produit et entraîne une diminution du ratio dn_t de dette nette relative au PIB nominal en comparaison au scénario standard. À l'inverse, si les facteurs d'efficacité du

maintien à ralentir l'âge réel γ_i sont insuffisamment forts pour faire changer le signe négatif de la croissance réelle des infrastructures o_t , une baisse du PIB nominal se produit et entraîne une augmentation du ratio dn_t de dette nette relative au PIB nominal en comparaison au scénario standard sans effets.

En parallèle, en présence de l'élasticité ε du PIB à la valeur des infrastructures, les variations du facteur d'efficacité du maintien en réduction de l'âge réel γ_i pour chaque classe n'entraînent que des changements mineurs sur le ratio dn_t de dette nette relative au PIB nominal. En effet, le scénario avec un facteur d'efficacité du maintien en réduction de l'âge réel γ_i pour chaque classe de 0,0004 présente un avantage d'environ quelques points de pourcentage en comparaison à un scénario avec un facteur d'efficacité du maintien en réduction de l'âge réel γ_i pour chaque classe de 0. Ces faibles changements s'expliquent par le fait que l'effet de la distinction entre le maintien et la bonification sur la valeur des infrastructures passe par l'élasticité du PIB à la valeur des infrastructures pour s'inclure dans l'effet de la valeur des infrastructures sur la croissance économique, et donc pour avoir un impact sur le PIB nominal. Si l'élasticité du PIB à la valeur des infrastructures est faible, alors l'effet de la distinction entre le maintien et la bonification sur la valeur des infrastructures est实质iellement limité pour l'ensemble des facteurs d'efficacité du maintien en réduction de l'âge réel γ_i . En d'autres termes, une élasticité de 0,1 atténue le rôle du maintien dans la dynamique de croissance économique, ce qui limite l'incitation à privilégier cette nature d'investissement.

Avec un regard sur l'évolution des ratios dn_t de dette nette relative au PIB nominal tout au long de la simulation plutôt que sur les résultats finaux, il est à remarquer que l'ensemble des scénarios avec ou sans effets observent une augmentation entre le début et la fin de la simulation, ce qui laisse transparaître que même des facteurs d'efficacité du maintien à ralentir l'âge réel γ_i élevés ne permettent pas d'augmenter suffisamment le PIB nominal pour réduire le ratio dn_t de dette nette relative au PIB nominal (voir Figure 12).

Figure 12 : Évolution de la dette nette pour différents facteurs de productivité du maintien en réduction de l'âge réel en présence de l'élasticité du PIB à la valeur des infrastructures (en pourcentage du PIB nominal)



Selon ces analyses de sensibilité avec effets conjoints, les scénarios disposant de facteurs d'efficacité du maintien à ralentir l'âge réel γ_i et d'une élasticité ε du PIB à la valeur des infrastructures définis durant la calibration ne devraient pas être significativement différents des scénarios sans effets. Aussi, en fixant le ratio s du solde primaire au PIB nominal à 0%, les ratios dn_t de dette nette relative au PIB nominal des scénarios avec et sans effets augmentent respectivement de 57,66 et 57,34 points de pourcentage entre 2025 et 2050, sans pour autant montrer de signe de convergence. En d'autres termes, la stratégie du Gouvernement du Québec dans les investissements en infrastructures semble budgétairement insoutenable, avec ou sans la considération des effets implémentés. La dette nette DN_t augmente ainsi plus vite que le PIB Y_t .

$$\frac{\partial DN_t}{\partial t} > \frac{\partial Y_t}{\partial t}$$

Somme toute, il importe donc de s'interroger sur les économies nécessaires au sein du budget pour assurer la soutenabilité budgétaire d'une telle stratégie. Dans ce sens, il faut rappeler que le ratio fixe s du solde primaire au PIB nominal impacte la dette nette DN_t , et donc le ratio dn_t de dette nette relative au PIB nominal, sans impacter le PIB Y_t . Par conséquent, en fixant le

ratio s du solde primaire au PIB nominal à 2,80%, les ratios dn_t de dette nette relative au PIB nominal des scénarios avec et sans effets diminuent respectivement de 3,13 et 2,58 points de pourcentage entre 2025 et 2050, tout en convergeant vers 36%. Ici, la stratégie du Gouvernement du Québec dans les investissements en infrastructures semble budgétairement soutenable, avec ou sans la considération des effets implémentés. La dette nette DN_t augmente ainsi aussi vite que le PIB Y_t .

$$\frac{\partial DN_t}{\partial t} \approx \frac{\partial Y_t}{\partial t}$$

Considérant les répercussions des choix des facteurs d’efficacité du maintien à ralentir l’âge réel γ_i et de l’élasticité ε du PIB à la valeur des infrastructures définis durant la calibration (voir Figure 11 et Figure 12), que le ratio fixe s du solde primaire au PIB nominal soit de 0% ou de 2,80%, les scénarios avec effets présentent un avantage par rapport aux scénarios sans effets avec un écart qui se réduit respectivement à 0,32 et 0,55 point dans le niveau de dette nette en proportion du PIB à la fin de la simulation. Cet avantage laisse entendre que la stratégie du Gouvernement du Québec entraîne une croissance réelle des infrastructures qui augmente le PIB nominal et diminue le ratio dn_t de dette nette relative au PIB nominal. À l’inverse, un scénario avec effets ayant un ratio dn_t de dette nette relative au PIB nominal plus élevé qu’un scénario sans effets supposerait une baisse de la croissance réelle des infrastructures qui diminue le PIB nominal et augmente le ratio dn_t de dette nette relative au PIB nominal (voir Figure 13 et Tableau 11).

Ainsi, la stratégie du gouvernement du Québec dans les investissements en infrastructures ne peut être soutenable qu’à la condition d’avoir au moins un ratio fixe s du solde primaire au PIB nominal d’environ 2,80%. Toutefois, si le Gouvernement du Québec a régulièrement atteint par le passé un ratio fixe s du solde primaire au PIB nominal équivalent ou supérieur à une telle exigence, cette tendance se confirme de moins en moins (voir Figure 2). En parallèle, il existe un autre moyen, moins étudié car plus complexe à obtenir, pour atteindre la soutenabilité budgétaire tout en gardant un ratio fixe s du solde primaire au PIB nominal nul. En effet, il serait possible d’imaginer que le Gouvernement du Québec puisse changer dans sa stratégie le volume des investissements, la distribution des investissements selon leur nature et la répartition des investissements selon les classes d’infrastructures.

Figure 13 : Évolution de la dette nette pour différents soldes primaires selon différentes implémentations des effets (en pourcentage du PIB nominal)

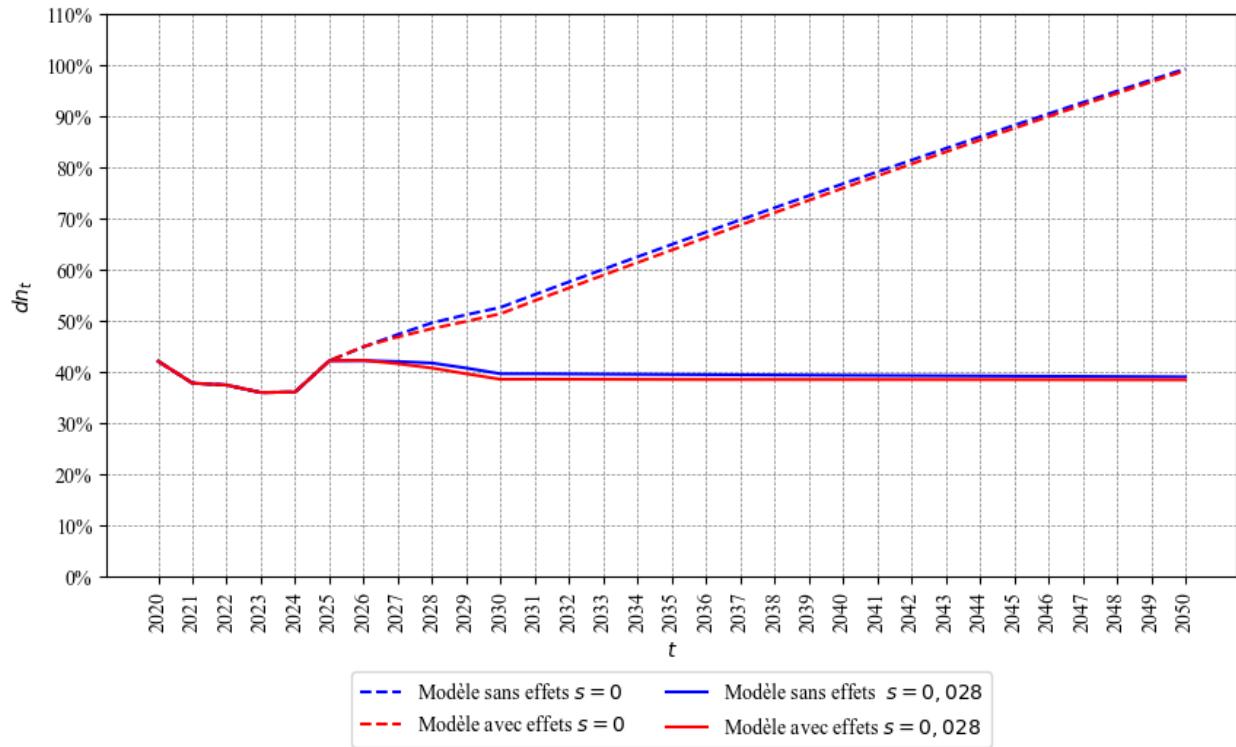


Tableau 11 : Évolution de la dette nette pour différents soldes primaires selon différentes implémentations des effets (en pourcentage du PIB nominal)

Scénarios	$t = 2025$	$t = 2050, s = 0$	$t = 2050, s = 0, 028$
Modèle sans effets	42,25%	99,34%	39,10%
Implémentation des deux effets		98,99%	38,51%

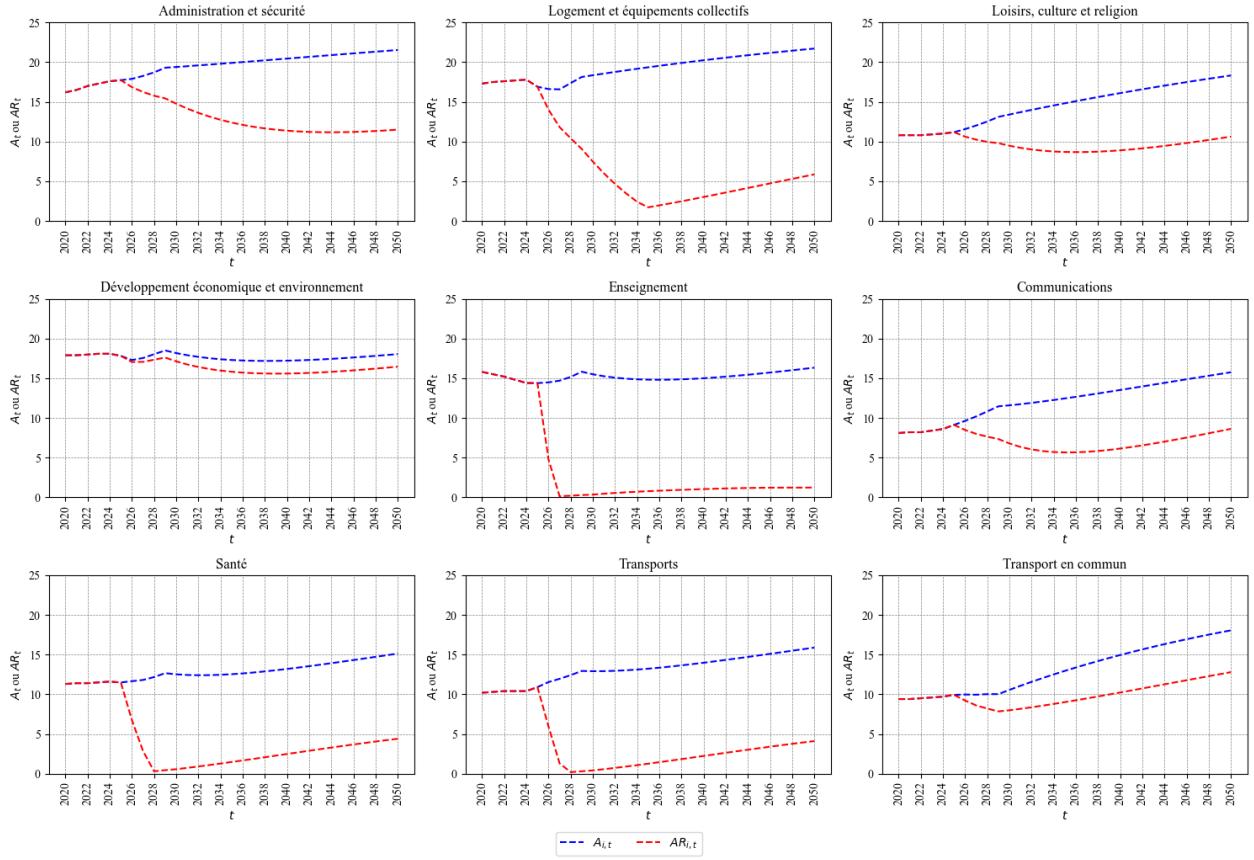
Si la stratégie des investissements en infrastructures financés par le Gouvernement du Québec semble budgétairement insoutenable pour un scénario avec un ratio fixe s du solde primaire au PIB nominal de 0 ainsi que des facteurs de productivité du maintien en réduction de l'âge réel γ_i et une élasticité ε du PIB fixés durant la calibration, une caractérisation de la tenabilité structurelle s'avère nécessaire. Pour y parvenir, il importe dans un premier temps d'analyser l'évolution de l'âge moyen $A_{i,t}$ et de l'âge réel moyen $AR_{i,t}$ de chaque classe d'infrastructures.

De fait, l'âge moyen $A_{i,t}$ de chaque classe est susceptible de diminuer à la condition de la construction de nouvelles infrastructures dont l'âge faible rajeunit la moyenne. L'âge réel moyen $AR_{i,t}$ de chaque classe dépend aussi de cette dynamique, tout en étant également susceptible de diminuer à la condition de maintien conséquent sur les infrastructures existantes. L'âge réel moyen

$AR_{i,t}$ est donc nécessairement égal ou inférieur à l'âge moyen $A_{i,t}$. Dans cette perspective, il est possible de noter au début de la simulation une superposition des courbes de l'âge moyen $A_{i,t}$ et de l'âge réel moyen $AR_{i,t}$ de chaque classe d'infrastructures. Ces résultats s'expliquent par le calcul de l'âge réel des générations existantes qui dépend au début de la simulation de l'âge à la période précédente. En effet, à partir de 2026, un écart apparaît entre l'âge moyen $A_{i,t}$ et l'âge réel moyen $AR_{i,t}$, ce qui s'explique par le calcul de l'âge réel des générations existantes qui dépend par la suite de l'âge réel à la période précédente. Il existe donc une période de transition, nécessaire à l'âge réel et à l'âge réel moyen $AR_{i,t}$ pour converger vers leur vraie valeur à l'aide des investissements en maintien à partir de la période de différenciation entre l'âge moyen $A_{i,t}$ et l'âge réel moyen $AR_{i,t}$. Toutefois, si l'âge réel et l'âge réel moyen $AR_{i,t}$ peuvent baisser durant et après la période de transition, il est alors difficile d'identifier la fin de la période de transition qui peut être propre à chaque classe. De fait, une lecture prudente sur l'origine de l'écart entre l'âge moyen $A_{i,t}$ et l'âge réel moyen $AR_{i,t}$ des différentes classes d'infrastructures entre 2026 et 2050 doit donc être de mise.

Les résultats obtenus permettent de noter que la phase de transition peut se terminer avec l'atteinte d'un âge réel moyen $AR_{i,t}$ de zéro, ce qui peut s'expliquer par un volume d'investissements en maintien suffisamment élevé pour permettre aux infrastructures de conserver une qualité équivalente à celle de leur année de construction. En parallèle de cette phase de transition, il est à observer que l'âge réel moyen $AR_{i,t}$ tend à augmenter vers la fin de la simulation. En effet, les classes d'infrastructures atteignent leur âge réel moyen $AR_{i,t}$ minimal à des dates distinctes, soit entre 2027 et 2044. Dans ce sens, l'écart entre l'âge moyen $A_{i,t}$ et l'âge réel moyen $AR_{i,t}$ peut donc se réduire si le premier augmente moins vite que le second, comme il peut être observé pour la classe d'infrastructures *Logement et les équipements collectifs*. À l'inverse, l'écart entre l'âge moyen $A_{i,t}$ et l'âge réel moyen $AR_{i,t}$ peut se creuser si le premier augmente plus vite que le second, comme il peut être observé pour la classe d'infrastructures *Administration et la sécurité*. Ces différences de dynamiques peuvent s'expliquer par la valeur de l'âge moyen $A_{i,t}$ au début de la simulation, un niveau élevé offrant un potentiel d'amélioration de l'âge réel moyen $AR_{i,t}$ plus élevé qu'un niveau faible (voir Figure 14).

Figure 14 : Évolution de l'âge moyen et de l'âge moyen réel des classes d'infrastructures



L'évolution de l'âge moyen et de l'âge réel moyen ayant été examinée, il importe dans un second temps d'analyser l'évolution de l'indicateur de l'état des infrastructures $\rho_{i,t}$, calculé à partir des éléments précédemment étudiés. Dans cette optique, il est observé que l'indicateur de l'état des infrastructures $\rho_{i,t}$ s'est amélioré sur la période de la simulation pour l'ensemble des classes d'infrastructures. Toutefois, l'ampleur de cette amélioration diffère entre les classes du fait de l'investissement alloué, mais aussi de l'état des infrastructures au début de la simulation. En outre, entre 2026 et 2050, le niveau de qualité de la classe *Logements et équipements collectifs* a progressé de 40,78 points de pourcentage, contre une augmentation de 7,31 points de pourcentage pour la classe *Transports en commun*. Toutefois, il serait imprudent d'en conclure une amélioration de la qualité des infrastructures durant la simulation car l'âge réel moyen $AR_{i,t}$ de 2026 est susceptible d'être encore dans une période de transition pour converger vers sa vraie valeur. Une méthode de comparaison plus prudente nécessiterait une comparaison de tels ratios à partir de l'année où tous les âges réels moyens $AR_{i,t}$ minimaux ont été atteints, soit en 2045. Depuis cette date jusqu'en 2050, l'ensemble des ratios de qualité baisse excepté pour la classe *Enseignement*. De ces résultats,

il est alors possible de conclure que la qualité globale des infrastructures se détériore à la fin de la simulation (voir Tableau 12). En d'autres termes, la divergence de l'indicateur de l'état des infrastructures $\rho_{i,t}$ de chaque classe à la fin de la simulation suppose une intenabilité structurelle de la stratégie des investissements en infrastructures financés par le Gouvernement du Québec pour un scénario avec un ratio fixe s du solde primaire au PIB nominal de 0 ainsi que des facteurs de productivité du maintien en réduction de l'âge réel γ_i et une élasticité ε du PIB fixés durant la calibration.

Tableau 12 : Évolution de l'état des infrastructures par classe

<i>i</i>	$\rho_{i,2026}$	$\rho_{i,2045}$	$\rho_{i,2050}$
Administration et sécurité	5,86%	46,76%	46,59%
Logement et équipements collectifs	15,68%	78,90%	73,02%
Loisirs, culture et religion	8,18%	44,27%	42,04%
Développement économique et environnement	1,47%	9,30%	8,78%
Enseignement	67,16%	92,34%	92,48%
Communications	11,97%	50,39%	45,28%
Santé	42,12%	75,32%	70,94%
Transports	48,59%	78,46%	74,18%
Transport en commun	7,60%	30,77%	29,18%

Enfin, il importe de connaître la responsabilité de chaque classe d'infrastructures dans la croissance générale de la valeur nominale des infrastructures de cette même stratégie, à l'aide des parts $C_{i,n,t}$ de croissance des infrastructures de chaque classe. Mais avant toute chose, il est à noter qu'une part $C_{i,n,t}$ de croissance des infrastructures est négative si elle augmente ou diminue dans le sens contraire à la croissance nominale : une croissance nominale des infrastructures négative avec une part $C_{i,n,t}$ de croissance des infrastructures négative signifie une hausse de la valeur nominale des infrastructures de la classe, tandis qu'une croissance nominale des infrastructures positive avec une part $C_{i,n,t}$ de croissance des infrastructures négative signifie une diminution de la valeur nominale des infrastructures de la classe. À l'inverse, une part $C_{i,n,t}$ de croissance des infrastructures est positive si elle augmente ou diminue dans le même sens que la croissance nominale : une croissance nominale des infrastructures négative avec une part $C_{i,n,t}$ de croissance des infrastructures positive signifie une baisse de la valeur nominale des infrastructures de la classe, tandis qu'une croissance nominale des infrastructures positive avec une part $C_{i,n,t}$ de croissance des infrastructures positive signifie une augmentation de la valeur nominale des infrastructures de

la classe. La somme des parts $C_{i,n,t}$ de croissance des infrastructures de chaque classe doit alors atteindre 100%.

Aussi, il est possible d'observer que toutes les classes présentent une part $C_{i,n,t}$ de croissance des infrastructures positive entre les années 2020 et 2050. Étant donné que la valeur nominale totale des infrastructures a augmenté durant la période de la simulation, alors chaque classe d'infrastructures a contribué positivement à la croissance nominale des infrastructures. De tels résultats supposent également que la croissance nominale des infrastructures est positive et que la valeur nominale des infrastructures a progressé dans toutes les classes d'infrastructures.

Néanmoins, l'ampleur de cette croissance diffère aussi entre les classes du fait de l'investissement alloué qui est susceptible de dépendre de la valeur nominale des infrastructures existantes au début de la simulation. Les catégories *Enseignement*, *Santé* et *Transports* se distinguent à cet égard, concentrant respectivement 37,23 %, 28,11 % et 19,36 % de la croissance nominale observée (voir Tableau 13). Ces résultats traduisent à la fois les dynamiques d'investissement passées, marquées par des bonifications particulièrement importantes dans ces catégories jusqu'en 2020 (voir Tableau 8), et des niveaux de capital initialement plus élevés que dans les autres classes (voir Tableau 7). En revanche, la faible contribution de la classe *Développement économique et environnement*, malgré un niveau de capital initialement important, peut s'expliquer par l'absence de projets majeurs prévus, notamment dans le domaine de l'hydroélectricité.

Tableau 13 : Part de la croissance des infrastructures attribuable à chaque classe

<i>i</i>	$C_{i,2020,2050}$
Administration et sécurité	1,82%
Logement et équipements collectifs	4,80%
Loisirs, culture et religion	1,90%
Développement économique et environnement	2,33%
Enseignement	37,23%
Communications	1,97%
Santé	28,11%
Transports	19,36%
Transport en commun	2,48%
Total	100%

6. Limites et opportunités

Au regard des résultats, il est important de rappeler que le modèle proposé demeure perfectible. En effet, celui-ci peut contenir plusieurs biais ainsi que des hypothèses qui pourraient être remises en cause. Par conséquent, de nombreuses pistes d'amélioration sont possibles. Dans ce sens, une limite à énoncer concerne l'agrégation proposée des données. Premièrement, l'absence de consensus dans la littérature pour les valeurs d'élasticités du PIB à la valeur des infrastructures propres à chaque classe a entraîné l'utilisation d'un coefficient global calculé à partir de l'ensemble des classes d'infrastructures, en zones urbaines comme rurales. Une option pour surmonter cette limite nécessiterait de nouvelles recherches visant à estimer des élasticités du PIB à la valeur des infrastructures spécifiques à chaque zone géographique et à chaque classe, bien que leur faisabilité puisse être restreinte par le faible intérêt économique lié à la construction de nouvelles infrastructures. Une autre option consisterait à ne pas recourir à une élasticité du PIB à la valeur des infrastructures et de plutôt modéliser l'ensemble de ses externalités sous-jacentes qui impactent la croissance économique, bien que les estimations nécessaires à une telle modélisation puissent également être incertaines dans la littérature.

Deuxièmement, le facteur d'efficacité du maintien à ralentir l'âge réel pourrait varier entre les classes d'infrastructures, bien que ces différences soient encore peu documentées. Une analyse de ses effets sur la dépréciation géométrique propre à chaque catégorie d'immobilisations publiques permettrait d'enrichir les modèles futurs, ouvrant la voie à une meilleure identification de la période optimale pour investir dans le maintien. Toutefois, avant d'approfondir cette voie, il est essentiel de vérifier que les taux de dépréciation géométrique issus des études empiriques antérieures ne tiennent pas déjà compte, de manière implicite ou non intentionnelle, des investissements en maintien. En effet, des estimations de la dépréciation géométrique n'excluant pas les investissements en maintien pourraient entraîner une surestimation de la dépréciation tenant compte du maintien avant même tout investissement, faussant ainsi les résultats obtenus. Avec plus de recul, il importe aussi de s'assurer que les fonctions de dépréciation soient bien décroissantes et convexes, plutôt que décroissantes et concaves ou décroissantes et sigmoïdes. En effet, la forme qui fait consensus dans la littérature rend l'intervention de moins en moins rentable avec le temps. Pourtant, certaines infrastructures peuvent ne nécessiter aucun maintien en début de cycle de vie

en raison d'une dépréciation initiale trop faible, ou en fin de cycle lorsque la dépréciation devient trop avancée pour justifier une intervention.

Troisièmement et de manière plus spécifique à l'environnement étudié, le niveau d'agrégation des classes d'infrastructures peut laisser à désirer. Il convient de noter que les documents comptables du gouvernement du Québec recensent 19 classes d'infrastructures, contre 10 dans les documents économiques de Statistique Canada. Or, l'agrégation des données est susceptible de porter atteinte à la fiabilité des valeurs estimées pour chaque classe d'infrastructures, et donc au modèle. En parallèle, si le mémoire propose une agrégation avec de nouvelles classes d'infrastructures, il semble possible de faire plutôt le choix d'un regroupement des infrastructures par catégories fonctionnelles. Il n'empêche qu'une meilleure coordination entre les institutions provinciales et fédérales dans la définition des classes ou des catégories fonctionnelles permettrait d'accroître la précision du modèle en évitant que des infrastructures similaires soient réparties dans des groupes distincts. Somme toute, le Canada est l'un des rares pays développés à disposer d'un historique aussi long et détaillé à la fois sur ses investissements en infrastructures et sur la valeur de son capital, ce qui rend la reproduction d'une modélisation similaire dans un autre pays potentiellement bien plus complexe.

En parallèle, des extensions pourraient permettre de compléter le modèle. D'abord, il serait possible d'inclure l'ensemble des équations relatives aux finances publiques de l'environnement d'études pour assurer un suivi des données comptables davantage détaillées, pour mieux évaluer l'impact des politiques budgétaires sur l'évolution des actifs et des passifs, mais aussi pour identifier plus précisément les leviers d'ajustement disponibles.

Il serait envisageable de concevoir un modèle non plus déterministe mais stochastique pour introduire une dimension d'incertitude. Le PIB et la dépréciation peuvent en effet être sujets à des chocs exogènes, respectivement à travers des chocs économiques ou des catastrophes naturelles. L'analyse consisterait alors à étudier l'ensemble des résultats potentiels selon les probabilités d'occurrence des différents scénarios. Cette approche, plus réaliste dans un contexte d'incertitude, offrirait un cadre d'aide à la décision plus robuste.

Il serait également pertinent de faire varier le taux d'emprunt de la dette. Celui-ci répond avant tout à une dynamique de prime de risque liée à l'endettement, selon laquelle l'accroissement du niveau de dette publique tend à augmenter le coût de financement pour les gouvernements,

tandis qu'une diminution du niveau d'endettement tend à le réduire. Au-delà de la question de l'endettement, le taux d'emprunt d'une économie ouverte est aussi influencé par une dynamique de confiance internationale : un État perçu comme politiquement stable, sécurisé sur le plan intérieur et peu exposé aux menaces extérieures tend à attirer davantage de capitaux étrangers, cette crédibilité permettant un accroissement de la demande de dette souveraine et donc une réduction de son coût de financement.

Il serait possible d'améliorer le modèle en permettant aux ratios du maintien et de la bonification du Gouvernement du Québec et du Gouvernement fédéral en proportion du PIB nominal de varier à chaque période. En effet, il a été observé que le maintien permettait un gain conséquent de valeur nominale des infrastructures en proportion du PIB nominal au Québec sur le court terme, mais qu'une telle stratégie n'était pas efficiente sur le long terme, d'où l'importance de substituer le maintien par de la bonification une fois que la dépréciation a été suffisamment réduite. En réalité, la révision de stratégies d'investissements planifiées chaque année est justifiée par le besoin constant d'adaptation du volume d'investissements, de la distribution des investissements selon leur nature et de la répartition des investissements selon les classes d'infrastructures pour répondre aux changements politiques, économiques, sociaux et environnementaux. En définitive, même si une évaluation de la soutenabilité budgétaire sur le long terme peut et doit être effectuée, les stratégies d'investissements en infrastructures n'ont d'autres choix que de se focaliser sur le court terme, faute de données sur les changements dans un horizon plus lointain. Le choix d'un PQI de planification sur dix ans des investissements est donc cohérent avec les changements relativement prévisibles sur le court terme.

Dans un même sens, l'hypothèse d'une élasticité constante du PIB à la valeur des infrastructures dans le temps pourrait être remise en question. En effet, l'accumulation progressive d'infrastructures tend à réduire l'élasticité du PIB à la valeur des infrastructures, comme en témoigne la différence observée entre pays émergents et pays développés. Dès lors, l'élasticité du PIB à la valeur des infrastructures pourrait décroître avec l'augmentation du volume d'infrastructures, et s'accroître en situation de dégradation ou de réduction de ce volume.

Plus globalement, il faut s'interroger sur l'ordonnancement des éléments constituant toute stratégie d'investissements en infrastructures. Plutôt que de mettre sur le même niveau le volume d'investissements, la distribution des investissements selon leur nature et la répartition des

investissements selon les classes d'infrastructures, il serait pertinent de s'orienter vers une logique visant à garantir une qualité minimale pour les infrastructures utilisées. Dans cette optique, il faudrait donc prioriser un volume d'investissements en maintien pour chaque classe avant d'orienter un volume d'investissements en bonification selon une répartition par classe selon les priorités de la société.

Par ailleurs, le niveau d'utilisation des infrastructures pourrait être mieux pris en compte. Il serait envisageable d'introduire une fréquence d'usage, associée à un facteur dans l'équation de l'âge réel, afin de refléter l'accélération du vieillissement due à une utilisation plus intensive. Dans une logique similaire, l'intensité des conditions météorologiques pourrait également être intégrée, en tenant compte de leur impact sur la dégradation des infrastructures, notamment pour celles sensibles aux variations ou aux changements climatiques. Cette approche permettrait de modéliser de manière plus réaliste l'influence des facteurs environnementaux sur la durée de vie des infrastructures.

Ce mémoire a volontairement omis d'aborder deux autres natures d'investissements en infrastructures qui ne sont que très rarement considérés, à savoir la déconstruction et la démolition. Pourtant, il semble que de tels investissements puissent être bénéfiques, dans certains cas, à la croissance économique. En effet, la présence d'infrastructures vieillissantes impossibles à maintenir est susceptible d'avoir un coût plus élevé que ses bénéfices à l'économie du fait même de sa présence. Bien que la déconstruction et la démolition puissent être plus difficiles à défendre politiquement, il mèrriterait de s'y pencher pour ne pas perpétuer l'entretien coûteux d'infrastructures obsolètes au détriment d'alternatives plus efficientes.

Enfin, sur une note plus humaine, il est crucial de considérer le nombre de vies perdues et d'accidents impliquant des citoyens, conséquences directes d'une gestion défaillante des infrastructures. Il serait dès lors pertinent d'estimer ces coûts évités, ou d'envisager l'utilisation d'autres indicateurs pour évaluer l'impact de ces défaillances sur la sécurité publique.

7. Conclusion

Une bonne gestion des infrastructures nécessite une compréhension approfondie des interactions entre volume, état, endettement et croissance du PIB. Pour y parvenir, il importe de s'appuyer sur des données économiques qui rapportent fidèlement la réalité de la situation, contrairement aux données comptables façonnées par des cadres normatifs qui peuvent limiter toute portée analytique. Au Québec, les rapports sur la soutenabilité budgétaire de la stratégie des investissements en infrastructures financés par le gouvernement provincial n'offrent pas d'horizon radieux aux finances publiques, en plus d'illustrer une prise en main tardive des impératifs de l'exécutif.

Pour confirmer ou infirmer ces constats, un modèle de projection déterministe d'endettement avec générations d'actifs est proposé pour suivre l'évolution de la dette nette, du PIB ainsi que le volume et l'état des infrastructures. Afin de rendre la dynamique des infrastructures la plus fidèle possible à la réalité, l'effet de la distinction entre le maintien et la bonification sur la valeur des infrastructures ainsi que l'effet de la valeur des infrastructures sur la croissance économique sont implémentés par la transformation des équations économiques habituellement utilisées dans la littérature.

L'analyse de sensibilité met en évidence que l'élasticité du PIB à la valeur des infrastructures a un effet sur le capital et sur la soutenabilité budgétaire dès lors que le volume des investissements est conditionné au niveau du PIB. En parallèle, le facteur de sensibilité de la dépréciation à l'âge réel agit sur le capital à travers un investissement en maintien non nul, mais son effet sur la soutenabilité budgétaire ne se manifeste que si l'élasticité du PIB à la valeur des infrastructures est élevée.

Les résultats indiquent que, si le solde primaire demeure nul, une dégradation de l'état des finances publiques est attendue avec une augmentation de près de 57 points de pourcentage du niveau de dette nette en proportion du PIB entre 2025 et 2050. Cette perspective budgétaire sombre s'accompagne d'une baisse de la qualité des infrastructures dans la quasi-totalité des classes à la fin de la période étudiée. Les craintes des analyses passées semblent pour ainsi dire justifiées. L'atteinte de la soutenabilité budgétaire nécessite par conséquent de rendre le solde primaire positif. Néanmoins, seule une refonte en profondeur des investissements en matière de volume, de

distribution selon leur nature et de répartition selon les classes d'infrastructures permettrait de répondre simultanément aux enjeux de soutenabilité budgétaire et de tenabilité structurelle.

Cette évolution s'inscrit dans une prévision de croissance de la valeur nominale des infrastructures dans la province, principalement portée par les secteurs de l'Enseignement, de la Santé et des Transports. Somme toute, la croissance des infrastructures n'entraîne que de négligeables écarts entre les scénarios sans et avec effets du fait d'une élasticité du PIB à la valeur des infrastructures faible dans la province. Ainsi, l'implémentation des effets relatifs aux infrastructures importe peu pour évaluer la soutenabilité budgétaire, mais joue tout de même un rôle dans l'évaluation de la qualité des actifs publics et leur contribution à la croissance économique.

Néanmoins, le modèle proposé est loin d'être parfait. L'implémentation de variables comptables pour mieux suivre l'évolution de valeurs normées ou de variables économiques pour mieux représenter la réalité peut être envisagée. La considération de nouvelles données ou d'une meilleure désagrégation des classes d'infrastructures serait également souhaitable.

Finalement, bien que la littérature se soit déjà intéressée aux effets de la distinction entre le maintien et la bonification sur la valeur des infrastructures et de la valeur des infrastructures sur la croissance économique, les estimations nécessaires à leur implémentation dans les modèles de projection déterministes habituels demeurent imparfaites, insuffisantes ou inexistantes. Il en découle une nécessité de travaux supplémentaires afin de renforcer la robustesse des analyses de soutenabilité budgétaire et de tenabilité structurelle.

A. Bibliographie

- Acosta Ormaechea, Santiago et Leonardo Martinez (2021). *A Guide and Tool for Projecting Public Debt and Fiscal Adjustment Paths with Local- and Foreign-Currency Debt*, International Monetary Fund.
- Afonso, António et Miguel St. Aubyn (2019). *Economic growth, public, and private investment returns in 17 OECD economies*, Portuguese Economic Journal, vol. 18, p. 47-65.
- Agénor, Pierre-Richard (2009). *Infrastructure Investment and Maintenance Expenditure: Optimal Allocation Rules in a Growing Economy*, Journal of Public Economic Theory, vol. 11, no. 2, p. 233-250.
- Albonico, Alice, Sarantis Kalyvitis et Evi Pappa (2014). *Capital maintenance and depreciation over the business cycle*, Journal of Economic Dynamics & Control, vol. 39, p. 273-286.
- Aschauer, David Alan (1989). *Is public expenditure productive?*, Journal of Monetary Economics, vol. 23, no. 2, p. 177-200.
- Assemblée Nationale du Québec (2022). *Loi concernant la mise en œuvre de certaines dispositions du discours sur le budget du 25 mars 2021 et modifiant d'autres dispositions*, Projet de loi no. 17.
- Assemblée Nationale du Québec (2009). *Loi modifiant la Loi sur l'équilibre budgétaire et diverses dispositions législatives concernant la mise en œuvre de la réforme comptable*, Projet de loi no. 40.
- Assemblée Nationale du Québec (2006). *Loi sur la réduction de la dette et instituant le Fonds des Générations*, Projet de loi no. 1.
- Balaras, Constantinos A. (2001). *Energy retrofit of a neoclassic office building--social aspects and lessons learned*, ASHRAE Transactions, vol. 107, p. 191-197.
- Baldwin, John, Huju Liu et Marc Tanguay (2015). *An Update on Depreciation Rates for the Canadian Productivity Accounts*, Statistique Canada.
- Banque du Canada (2021). *Politique monétaire*.

Bajo-Rubio, Oscar et Simón Sosvilla-Rivero (1993). *Does public capital affect private sector performance?: An analysis of the Spanish case, 1964–1988*, Economic Modelling, vol. 10, no 3, p. 179-185.

Bennett, Jennifer, Robert Kornfeld, Daniel Sichel et David Wasshausen (2020). *Measuring Infrastructure In Bea's National Economic Accounts*, National Bureau of Economic Research, no. 27446.

Berechman, Joseph, Dilruba Ozmen et Kaan Ozbay (2006). *Empirical analysis of transportation investment and economic development at state, county and municipality levels*, Transportation, vol. 33, p. 537-551.

Blanchard, Olivier, Jean Claude Chouraqui, Robert P. Hagemann et Nicola Sartor (1990). *La "soutenabilité" de la politique budgétaire : réponses nouvelles à une question ancienne*, Revue économique de l'OCDE, no. 15, p. 7-38.

Blankespoor, Brian, M. Shahe Emra, Forhad Shilpi et Lu Xu (2021). *Bridge to bigpush or backwash? Market integration, reallocation and productivity effects of Jamuna Bridge in Bangladesh*, Journal of Economic Geography, vol. 22, no. 4, p. 853-871.

Bock, Margaret, Alexander Cardazzi et Brad R. Humphreys (2021). *Where the rubber meets the roads: pavement damage reduces traffic safety and speed*, National Bureau of Economic Research, NBER Working Paper, no. 29176.

Boscá, José Emilio, Francisco Javier Escriba et María José Murgui (2002). *The Effect of Public Infrastructure on the Private Productive Sector of Spanish Regions*, Journal of Regional Science, vol. 42, no 2, p. 301-326.

Bougheas, Spiros, Panicos O. Demetriades et Theofanis P. Mamuneas (2003). *Infrastructure, specialization, and economic growth*, Canadian Journal of Economics, vol. 33, no. 2, p. 506-522.

Breidenbach, Philipp (2019). *Ready for take-off? The economic effects of regional airport expansions in Germany*, Regional Studies, vol. 54, no. 8, p. 1084-1097.

Bureau du Budget du Congrès (2018). *The Budget and Economic Outlook: 2024 to 2034*.

- Burnside, Craig et Martin Eichenbaum (1996). *Factor-Hoarding and the Propagation of Business-Cycle Shocks*, The American Economic Review, vol. 86, no. 5, p. 1154-1174.
- Collectif (2021). *Les règles budgétaires du Québec : Réflexions d'un panel d'experts*, Regard CFFP n° R2021/15, Chaire de recherche en fiscalité et en finances publiques.
- Commission Européenne (2023). *Debt Sustainability Monitor 2023*, European Economy.
- Crescenzi, Riccardo et Andrés Rodríguez-Pose (2012). *Infrastructure and regional growth in the European Union*, Papers in Regional Science, vol. 91, no. 3, p. 487-513.
- Datta, Anusua et Sumit Agarwal (2006). *Telecommunications and economic growth: a panel data approach*, Applied Economics, vol. 36, no. 15, p. 1649-1654.
- De Borger, Bruno, Ismir Mulalic et Jan Rouwendal (2019). *Productivity Effects of an Exogenous Improvement in Transport Infrastructure: Accessibility and the Great Belt Bridge*, Tinbergen Institute Discussion Paper, vol. 65, no. VIII.
- Dioikitopoulos, Evangelos V. et Sarantis Kalyvitis (2008). *Public capital maintenance and congestion: Long-run growth and fiscal policies*, Journal of Economic Dynamics and Control, vol. 32, no. 12, p. 3760-3779.
- Donaldson, Dave (2018). *Railroads of the Raj: estimating the impact of transportation infrastructure*, American Economic Review, vol. 108, no. 4-5, p. 899-934.
- Données Québec (2023). *Dette nette (mars 2023)*.
- Dong, Bonnie, Christopher Kennedy et Kim Pressnail (2005). *Comparing life cycle implications of building retrofit and replacement options*, Canadian Journal of Civil Engineering, vol. 32, no. 6, p. 1051-1063.
- Eilrich, Fred C., Cheryl F. St. Clair et Gerald A. Doeksen (2017). *The Economic Impacts of 26-50 Bed Prospective Pay System (PPS) Hospitals and 51-100 Bed PPS Hospitals on the Local Economies*, National Center for Rural Health Works.
- Eilrich, Fred C., Gerald A. Doeksen, et Cheryl F. St. Clair (2015). *The Economic Impact of Recent Hospital Closures on Rural Communities*, National Center for Rural Health Works.
- Finn, Mary (1993). *Is All Government Capital Productive?*, Federal Reserve Bank of Richmond, Economic Quaterly, vol. 79, no. 4, p. 53-80.

Fonds Monétaire International (2025). *General Government Debt (percent of GDP)*.

Fonds Monétaire International (2024). *Primary net lending/borrowing (also referred as primary balance) (% of GDP)*.

Fuentes-Saguar, Patricia D., Juan A. Vega-Cervera et Manuel Alejandro Cardenete. (2017). *Socio-economic impact of a nuclear power plant: Almaraz (Spain)*, Applied Economics, vol. 49, no. 47, p. 4782-4792.

Galvão, João Rafael, Licinio Moreira, Gonçalo Gaspar et Samuel Vindeirinho et Sérgio Leitão (2016). *Energy system retrofit in a public services building*, Management of Environmental Quality, vol. 28, no. 3, p. 302-314.

Garcia-Milà, Teresa et Therese J. McGuire (1992). *The contribution of publicly provided inputs to states' economies*, Regional Science and Urban Economics, vol. 22, no. 2, p. 229-241.

Godbout, Luc (2023). *Modernisation de trois lois : de l'équilibre budgétaire à la réduction de la dette en passant par le Régime des Rentes du Québec...et quelques autres améliorations possibles*, Université de Sherbrooke.

Godbout, Luc, Suzie St-Cerny, Matthieu Arseneau, Ngoc Ha Dao et Pierre Fortin (2014). *La soutenabilité budgétaire des finances publiques du gouvernement du Québec*, Chaire de recherche en fiscalité et en finances publiques, Université de Sherbrooke.

Godbout, Luc (2008). *La loi sur l'équilibre budgétaire : au service de la protection du bien commun*, Éthique publique, vol. 10, no. 1.

Gollin, Douglas et Richard Rogerson (2014). *Productivity, transport costs and subsistence agriculture*, Journal of Development Economics, vol. 107, p. 38-48.

Gouvernement de Nouvelle-Zélande (2021). *He Tirohanga Mokopuna 2021 ; The Treasury's combined Statement on the Long-term Fiscal Position and Long-term Insights Briefing*.

Gouvernement du Canada (2024). *Tableaux de référence financiers décembre 2024*.

Gouvernement du Québec (2025a). *Budget 2025-2026*, Plan budgétaire.

Gouvernement du Québec (2025b). *Plan Québécois des Infrastructures 2025•2035*, Budget de dépenses 2024•2025, vol. 6.

Gouvernement du Québec (2024a). *Comptes publics 2023-2024*.

Gouvernement du Québec (2024b). *Comptes publics 2022-2023*.

Gouvernement du Québec (2024c). *Plan Québécois des Infrastructures 2024•2034*, Budget de dépenses 2024•2025, vol. 6.

Gouvernement du Québec (2023a). *Plan Québécois des Infrastructures 2023-2033*.

Gouvernement du Québec (2023b). *Projet de loi concernant la mise en œuvre de certaines dispositions du discours sur le budget du 21 mars 2023 et modifiant d'autres dispositions*, Mémoire au Conseil des Ministres.

Gouvernement du Québec (2022a). *Comptes publics 2021-2022*.

Gouvernement du Québec (2022b). *Plan Québécois des Infrastructures 2022-2032*.

Gouvernement du Québec (2021a). *Comptes publics 2020-2021*.

Gouvernement du Québec (2021b). *Plan Québécois des Infrastructures 2021-2031*.

Gouvernement du Québec (2020). *Plan Québécois des Infrastructures 2020-2030*.

Gouvernement du Québec (2019). *Les infrastructures publiques du Québec*.

Gouvernement du Québec (2018). *Les infrastructures publiques du Québec*.

Gouvernement du Québec (2017). *Les infrastructures publiques du Québec*.

Gouvernement du Québec (2016). *Les infrastructures publiques du Québec*.

Gouvernement du Québec (2015). *Les infrastructures publiques du Québec*.

Gouvernement du Québec (2014). *Plan Québécois des Infrastructures 2014-2024*.

Gouvernement du Québec (2010). *Comptes publics 2009-2010*.

Gouvernement du Québec (2007a). *Comptes publics*, vol. 1.

Gouvernement du Québec (2007b). *La dette du gouvernement du Québec*.

Gouvernement du Québec (1998a). *Rapport du comité d'étude sur la comptabilité du gouvernement*.

Gouvernement du Québec (1998b). *Réforme sur la comptabilité gouvernementale*, Ministère des Finances.

Greenwood, Jeremy, Zvi Hercowitz et Gregory W.Huffman (1988). *Investment, Capacity Utilization, and the Real Business Cycle*, The American Economic Review, vol. 78, no. 3, p. 402-417.

Hartman, Joseph C. (2004). *Multiple asset replacement analysis under variable utilization and stochastic demand*, European Journal of Operational Research, vol. 159, no. 1, p. 145-165.

Hegazy, Tarek et Dina A. Saad (2014). *A microeconomic perspective on infrastructure rehabilitation*, Construction Management and Economics, vol. 32, no. 5, p. 443-445.

Hicks, J. R. (1942). *Maintaining Capital Intact: a Further Suggestion*, Economica, New Series, vol. 9, no. 34, p. 174-179.

Hulten, Charles R. et Frank C. Wykoff (1980). *The measurement of economic depreciation, Depreciation, Inflation & the taxation of income from capital*.

Infrastructure Canada (2023). *Programme d'Infrastructure Investir dans le Canada*, Gouvernement du Canada.

Jackson, William B. (1911). *The depreciation problem*, The ANNALS of the American Academy of Political and Social Science, vol. 37, no. 1, p. 31-42.

Jarvis, Stephen, Olivier Deschenes et Akshaya Jha (2019). *The Private And External Costs Of Germany's Nuclear Phase-Out*, National Bureau of Economic Research, NBER Working Paper Series, no. 26598.

Kalaitzidakis, Pantelis et Sarantis Kalyvitis (2004). *On the macroeconomic implications of maintenance in public capital*, Journal of Public Economics, vol. 88, no. 3-4, p. 695-712.

Kalyvitis, Sarantis et Eugenia Vella (2015). *Productivity effect of public capital maintenance: evidence from U.S. States*, Economic Inquiry, vol. 53, no. 1, p. 72-90.

Kalyvitis, Sarantis et Eugenia Vella (2011). *Public Capital Maintenance, Decentralization and U.S. Productivity Growth*, Public Finance Review, vol. 39, no. 6, p. 784-809.

Kemmerling, Achim et Andreas Stephan (2002). *The contribution of local infrastructure to private productivity and its local political economy: Evidence from a panel of large German cities*, Public Choice, vol. 113, p. 403-424.

Kim, Moshe et Giora Moore (1987). *Economic VS. Accounting Depreciation*, Journal of Accounting and Economics, vol. 10, p. 111-125.

Kornfeld, Robert et Barbara M. Fraumeni (2022). *How Should We Measure Infrastructure? The Case of Highways and Streets*, National Bureau of Economic Research, no. 30045.

LégisQuébec (2024). *Loi sur les infrastructures publiques*.

LégisQuébec (2023). *Loi sur la réduction de la dette et instituant le Fonds des générations*, chapitre R-2.2.0.1.

LégisQuébec (2013). *Loi favorisant le maintien et le renouvellement des infrastructures publiques*, chapitre M-1.2.

Lehmus Markku (2009). *Empirical macroeconomic model of the Finnish economy (EMMA)*, Economic Modelling, vol. 26, p.926–933.

Lokshin, Michael et Ruslan Yemstov (2005). *Has Rural Infrastructure Rehabilitation in Georgia Helped the Poor?*, The World Bank Economic Review, vol. 19, no. 2, p. 311-333.

Lowe, Robert (2007). *Technical options and strategies for decarbonizing UK housing*, Building Research and Information, vol 35, no. 4, p. 412-425.

Macdonald, Ryan (2008). *An Examination of Public Capital's Role in Production, authority of the Minister responsible for Statistics Canada*, Economic Analysis Research Paper Series.

Macek, Daniel et Jiří Dobiáš (2014). *Buildings Renovation and Maintenance in the Public Sector*, Procedia Engineering, vol. 85, p. 368-376.

Maciulyte-Sniukiene, Alma et Mindaugas Butkus (2022). *Does Infrastructure Development Contribute to EU Countries' Economic Growth?*, Sustainability, vol. 14, no. 9, art. 5610.

Margolis, Stephen E. (1981). *Depreciation and Maintenance of Houses*, Land Economics, vol. 57, no. 1, pp. 91–105.

Marrocu, Emanuela et Raffaele Paci (2010). *The effects of public capital on the productivity of the Italian regions*, Applied Economics, vol. 42, no. 8, p. 989-1002.

McGrattan, Ellen R. et James A. Schmitz, Jr. (1999). *Maintenance and Repair: Too Big to Ignore*, Federal Reserve Bank of Minneapolis Quarterly Review, vol. 23, no. 4, p.2-13.

Melo, Patricia C., Daniel J. Graham et Ruben Brage-Ardao (2013). *The productivity of transport infrastructure investment: A meta-analysis of empirical evidence*, Regional Science and Urban Economics, vol. 43, no. 5, p. 695-706.

Michaud, Pierre-Carl, Louis Lévesque, Marcellin Joanis, Jonathan Brasseur et Quentin Winstel (2023). *Plan Québécois des Infrastructures : Comparaison interprovinciale et soutenabilité*, Centre Interuniversitaire de Recherche en Analyse des Organisations.

Mikulić, Davor, Ivana Rašić Bakarić et Sunčana Slijepčević (2016). *The economic impact of energy saving retrofits of residential and public buildings in Croatia*, Energy Policy, vol. 96, p. 630-644.

Ministère des Finances du Québec (2024a). *Cotes de crédit du Québec*.

Ministère des Finances du Québec (2024b). *Dette brute du gouvernement du Québec*.

Ministère des Finances du Québec (2024c). *Historique de la cote de crédit du Québec*.

Munarim, Ulisses et Enedir Ghisi (2016). *Environmental feasibility of heritage buildings rehabilitation*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 58, p. 235-249.

Munnell, Aticia H. (1990) *How Does Public Infrastructure Affect Regional Economic Performance?*.

Negash Kahsay, Tewodros, Diane Arjoon, Onno Kuik, Roy Brouwer, Amaury Tilmant et Pieter van der Zaag (2019). *A hybrid partial and general equilibrium modeling approach to assess the hydro-economic impacts of large dams – The case of the Grand Ethiopian Renaissance Dam in the Eastern Nile River basin*, Environmental Modelling & Software, vol. 117, p. 76-88.

Norman, Dana B. (2014). *School Facility Renovation and Student Achievement*, Virginia Tech.

Orcesi, André D. et Dan M. Frangopol (2011). *A stakeholder probability-based optimization approach for cost-effective bridge management under financial constraints*, Engineering Structures, vol. 33, no. 5, p. 1439-1449.

- Ozbay, Kaan, Dilruba Ozmen-Ertekin et Joseph Berechman (2007). *Contribution of transportation investments to county output*, Transport Policy, vol. 14, no. 4, p. 317-329.
- Papageorgiou, Chris (2003). *Distinguishing Between the Effects of Primary and Post-primary Education on Economic Growth*, Review of Development Economics, vol. 7, no. 4, p. 527-656.
- Perry, Gregory M., et J. David Glyer (1990). *Durable Asset Depreciation: A Reconciliation between Hypotheses*, The Review of Economics and Statistics, vol. 72, no. 3, p. 524–29.
- Qvist, Staffan, Paweł Gładysz, Łukasz Bartela et Anna Sowiżdżał (2020). *Retrofit Decarbonization of Coal Power Plants—A Case Study for Poland*, Energies, vol. 14, no. 120.
- Rioja, Felix K. (2003). *Filling potholes: macroeconomic effects of maintenance versus new investments in public infrastructure*, Journal of Public Economics, vol. 87, no. 9-10, p. 2281-2304.
- Sous-secrétariat aux infrastructures publiques (2022). *Cahier d'instructions ; Plan annuel de gestion des investissements publics en infrastructures*, Gouvernement du Québec.
- Statistique Canada (2025a). *Compte économique d'infrastructure, âge moyen et durée de vie utile restante par actif et fonction de l'actif*, tableau 36-10-0611-01.
- Statistique Canada (2025b). *Compte économique d'infrastructure, investissement et stock net par actif, par industrie et par fonction de l'actif (x 1 000 000)*, tableau 36-10-0608-01.
- Statistique Canada (2025c). *Dette du gouvernement central (x 1 000 000)*, tableau 10-10-0002-01.
- Statistique Canada (2025d). *Valeur de remplacement estimée des actifs d'infrastructures publiques essentielles, selon l'évaluation de l'état physique (x 1 000 000)*, tableau 34-10-0284-01.
- Statistique Canada (2024a). *Indice des prix à la consommation, moyenne annuelle, non désaisonné*, tableau 18-10-0005-01.
- Statistique Canada (2024b). *Indices des prix de la construction de bâtiments, selon le type d'immeuble et la division*, tableau 18-10-0276-01.
- Statistique Canada (2024c). *Produit intérieur brut, en termes de dépenses, provinciaux et territoriaux, annuel (x 1 000 000)*, tableau 36-10-0222-01.
- Statistique Canada (2019). *Comptes économiques : Foire aux questions*.

St-Maurice, Yves, Luc Godbout et Suzy St-Cerny (2023). *Soutenabilité budgétaire à long terme du Québec, édition 2023 ; Un portrait différent*, Chaire en fiscalité et en finances publiques.

Timbeau, X., E. Aurissergues et E. Heyer (2023). *Debtwatch, un simulateur de dette publique pour le XXIe siècle*, Observatoire français des conjonctures économiques.

Toader, Elena, Bogdan Narcis Firtescu, Angela Roman et Sorin Gabriel Anton (2018). *Impact of Information and Communication Technology Infrastructure on Economic Growth: An Empirical Assessment for the EU Countries*, Sustainability, col. 10, no. 10, art. 3750.

Université de Pennsylvanie (2019). *Penn Wharton Budget Model: Dynamic OLG Model*.

Valero, Anna et John Van Reenen (2019). *The economic impact of universities: Evidence from across the globe*, Economics of Education Review, vol. 68, p. 53-67.

Vérificateur général du Québec (2012). *Rapport du Vérificateur général du Québec à l'Assemblée nationale pour l'année 2012-2013* ; Vérification de l'optimisation des ressources.

Déclaration relative à l'intelligence artificielle générative :

Dans le cadre de ce mémoire, l'intelligence artificielle générative a été utilisé comme support pour structurer certains éléments du code Python, reformuler des phrases et vérifier l'orthographe.

B. Annexes

B.1. Sources de données pour le modèle

Tableau 14 : Sources de données

t	S_t	SD_t	π	DN_t	g_t et r	Y_t
2020	Gouvernement du Québec (2021a)			Données Québec (2023)	Gouvernement du Québec (2025a)	Statistique Canada (2024c)
2021	Gouvernement du Québec (2022a)	Gouvernement du Canada (2024)	Statistique Canada (2024a)			
2022	Gouvernement du Québec (2024b)					
2023		Gouvernement du Québec (2025a)				
2024						
t	$M_{t,t,Q}$ et $B_{t,t,Q}$	$K_{t,t}$ et $I_{t,t,C}$		$A_{t,t}$	ψ	
2020	Gouvernement du Québec (2022b)					
2021	Gouvernement du Québec (2023a)		Statistique Canada (2025b)	Statistique Canada (2025a)	Statistique Canada (2024b)	Statistique Canada (2024b)
2022	Gouvernement du Québec (2024c)					
2023						
2024						
2025						
2026	Gouvernement du Québec (2025b)					
2027						
2028						
2029						

B.2. Choix de l'Indice des prix de la construction de bâtiments institutionnels

Tableau 15 : Évolution de l'inflation provenant de l'Indice des prix à la consommation et de l'Indice des prix de la construction de bâtiments institutionnels

<i>t</i>	π	ψ	$\psi - \pi$
2009	0,0062	0,0235	0,0172
2010	0,0123	0,0163	0,0040
2011	0,0305	0,0327	0,0022
2012	0,0211	0,0205	-0,0007
2013	0,0074	0,0051	-0,0024
2014	0,0140	0,0120	-0,0020
2015	0,0105	0,0095	-0,0011
2016	0,0072	0,0120	0,0048
2017	0,0103	0,0296	0,0193
2018	0,0165	0,0395	0,0230
2019	0,0209	0,0387	0,0178
2020	0,0084	0,0306	0,0222
2021	0,0377	0,0665	0,0289
2022	0,0668	0,1091	0,0424
2023	0,0449	0,0446	-0,0003
$E[x]$ $\forall x \in \{\pi, \psi, \psi - \pi\}$	0,0210	0,0327	0,0117
$E[x \psi > \pi]$ $\forall x \in \{\pi, \psi, \psi - \pi\}$	0,0217	0,0399	0,0182
$E[x \psi < \pi]$ $\forall x \in \{\pi, \psi, \psi - \pi\}$	0,0196	0,0183	0,0013

B.3. Choix de la croissance réelle de long terme du PIB potentiel

Tableau 16 : Évolution de la croissance réelle, du facteur de croissance réelle des infrastructures sur la croissance du PIB et de la croissance réelle de long terme du PIB potentiel

t	g_t	ω_t	ϕ
2009	-0,0057	0,0058	-0,0115
2010	0,0307	0,0057	0,0251
2011	0,0201	0,0050	0,0150
2012	0,0063	0,0057	0,0006
2013	0,0222	0,0034	0,0188
2014	0,0163	0,0026	0,0136
2015	0,0181	0,0020	0,0161
2016	0,0226	-0,0003	0,0229
2017	0,0384	0,0003	0,0380
2018	0,0336	0,0015	0,0322
2019	0,0249	0,0000	0,0248
2020	-0,0268	-0,0008	-0,0260
2021	0,0867	0,0043	0,0824
2022	0,0204	0,0020	0,0184
2023	0,0055	-0,0002	0,0057
$E[x]$ $\forall x \in \{g_t, \omega_t, \phi\}$	0,0209	0,0025	0,0184

B.4. Choix du facteur de transition

Tableau 17 : Évolution du facteur de transition

t	τ
2015	0,6967
2016	0,7188
2017	0,6686
2018	0,6727
2019	0,7731
2020	0,8710
2021	0,8225
2022	0,9405
2023	0,9315
2024	0,9051

B.5. Transformation et utilisation des équations de l'âge

L'équation de l'âge a pu être transformée avec de l'intuition pour simplifier son usage et obtenir la bonification au début de la simulation. En effet, plutôt que d'avoir besoin de la bonification effectuée chaque année, il est possible de n'utiliser que l'âge moyen de l'année précédente :

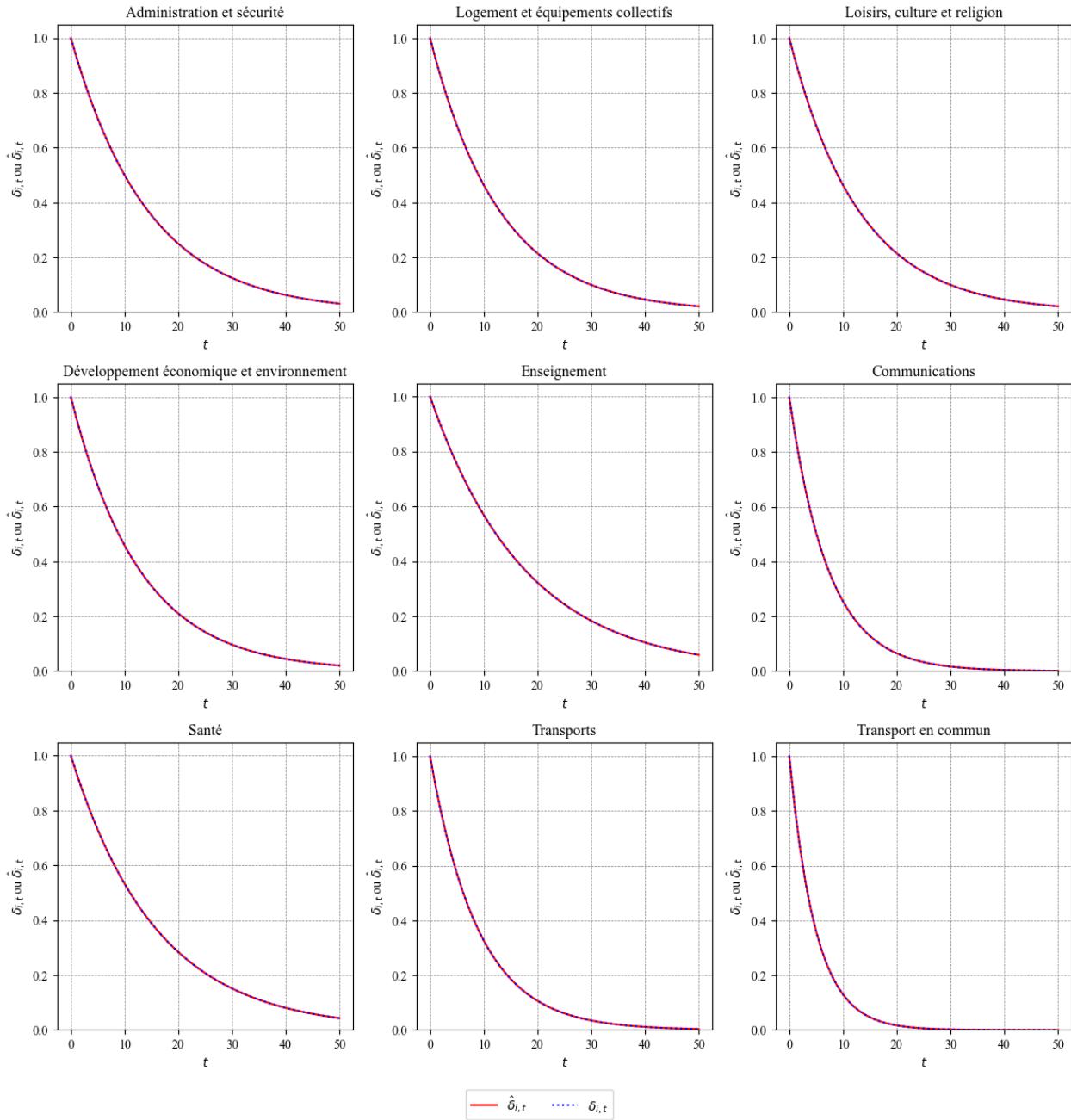
$$\begin{aligned}
A_{i,t} &= \frac{\sum_{n=-\infty}^t B_{i,n,C}(t-n)}{\sum_{n=-\infty}^t B_{i,n,C}} \\
&= \frac{\sum_{n=-\infty}^{t-1} B_{i,n,C}(t-1-n)}{\sum_{n=-\infty}^t B_{i,n,C}} + \frac{B_{i,t,C}(t-t)}{\sum_{n=-\infty}^t B_{i,n,C}} \\
&= \frac{\sum_{n=-\infty}^{t-1} B_{i,n,C}(t-1-n)}{\sum_{n=-\infty}^t B_{i,n,C}} \\
&= \frac{\sum_{n=-\infty}^{t-1} B_{i,n,C}(t-1-n)}{\sum_{n=-\infty}^{t-1} B_{i,n,C}} \frac{\sum_{n=-\infty}^{t-1} B_{i,n,C}}{\sum_{n=-\infty}^t B_{i,n,C}} \\
&= (A_{i,t-1}|t) \frac{\sum_{n=-\infty}^{t-1} B_{i,n,C}}{\sum_{n=-\infty}^t B_{i,n,C}} \\
&= (A_{i,t-1} + 1) \frac{\sum_{n=-\infty}^{t-1} B_{i,n,C}}{\sum_{n=-\infty}^t B_{i,n,C}} \\
&= (A_{i,t-1} + 1) \left(\frac{\sum_{n=-\infty}^t B_{i,n,C}}{\sum_{n=-\infty}^t B_{i,n,C}} - \frac{B_{i,t,C}}{\sum_{n=-\infty}^t B_{i,n,C}} \right) \\
&= (A_{i,t-1} + 1) \left(1 - \frac{B_{i,t,C}}{\sum_{n=-\infty}^t B_{i,n,C}} \right)
\end{aligned}$$

La structure de cette nouvelle équation de l'âge permet d'isoler la bonification cumulée historiquement par classe jusqu'à t . De telles valeurs, bien qu'issues d'une manipulation d'équation, ne peuvent toutefois pas être considérées comme exactes mais plutôt comme approximatives étant donné que la bonification cumulée historiquement est susceptible de remonter à une période lointaine :

$$\begin{aligned}
A_{i,t} &= (A_{i,t-1} + 1) \left(1 - \frac{B_{i,t,C}}{\sum_{n=-\infty}^t B_{i,n,C}} \right) \\
\Leftrightarrow \frac{A_{i,t}}{(A_{i,t-1} + 1)} &= 1 - \frac{B_{i,t,C}}{\sum_{n=-\infty}^t B_{i,n,C}} \\
\Leftrightarrow 1 - \frac{A_{i,t}}{(A_{i,t-1} + 1)} &= \frac{B_{i,t,C}}{\sum_{n=-\infty}^t B_{i,n,C}} \\
\Leftrightarrow \sum_{n=-\infty}^t B_{i,n,C} &= \frac{B_{i,t,C}}{1 - \frac{A_{i,t}}{(A_{i,t-1} + 1)}} \\
\Leftrightarrow \sum_{n=-\infty}^{t-1} B_{i,n,C} &= \frac{B_{i,t,C}}{1 - \frac{A_{i,t}}{(A_{i,t-1} + 1)}} - B_{i,t,C}
\end{aligned}$$

B.6. Correspondance des fonctions de dépréciation

Figure 15 : Correspondance de la dépréciation tenant compte du maintien avec la dépréciation géométrique pour les nouvelles classes d'infrastructures (en niveau de dépréciation)



B.7. Code pour le modèle déterministe

Pour commencer, les libraires sont importées et des options de visualisation sont ajustés pour une permettre une meilleure lecture des résultats.

```
import numpy as np
from matplotlib import pyplot as plt
import pandas as pd
import matplotlib.ticker as mtick
from matplotlib import rcParams
rcParams['font.family'] = 'Times New Roman'
from matplotlib.colors import LinearSegmentedColormap
np.set_printoptions(threshold=np.inf)
pd.set_option('display.max_columns', None)
pd.set_option('display.max_rows', None)
```

Le nom des classes d'infrastructures est importé. Les valeurs fixes de l'élasticité du PIB à la valeur des infrastructures ε et du facteur de sensibilité de la dépréciation à l'âge réel ζ_i sont importés. Les valeurs des autres variables, transformées au préalable et placées dans un seul et même fichier Excel, sont importées. Les cellules de ce fichier sont vides si les données restent à évaluer. Seules les colonnes pour le niveau de dette nette en proportion du PIB nominal et le niveau de dette nette en proportion du PIB nominal ne sont pas encore créées.

```
zeta_nc = pd.read_excel(r"transformed_data/depreciation_exponentielle_nouvelle_classification.xlsx")
zeta_nc = zeta_nc.iloc[0].to_dict()
elasticite = pd.read_excel(r"raw_data/epsilon/epsilon.xlsx")
epsilon = elasticite['epsilon'].iloc[0]
nouvelle_classification = pd.read_excel(r"raw_data/classification/classification.xlsx", sheet_name =
"Nouvelle classification")
nouvelle_classification=nouvelle_classification["Nouvelle classification"].tolist()
```

Plusieurs équations sont réécrites sous forme de définitions.

```
def delta (ar, C, zeta):
    return np.exp(-zeta*ar - C)
def age_r_plus_un (ar, gamma, zeta, M) :
    return ar + 1 - (gamma/zeta)*M
def bonif(Y, b):
    return Y*b
def maintien(Y, m):
    return Y*m
def tau(invest_C, tau):
    return invest_C*tau
def age_moyen_plus_un(A, B, B_cumulée):
    return (A+1)*(1- B/B_cumulée)
def croissance_nominales_infra_plus_un (K_plus_un, K):
    return K_plus_un/K -1
def croissance_reelle_infra(0, psi):
    return 0 - psi
def effet_infra(o, epsilon):
    return o * epsilon
def g(phi, omega):
    return phi + omega
def Y_plus_un (Y, g, pi):
    return Y*(1 + g + pi)
```

```

def service_dette(DN, r):
    return DN*r
def debt_plus_un (DN, SD, S, I):
    return DN + SD - S + I

```

Une définition est par la suite conçue pour faire tourner le modèle déterministe à partir de l'ensemble des données à disposition. La définition se présente sous la forme d'un dictionnaire de listes. La définition intègre le choix de la prise en compte des effets implémentés.

```

def evol(m,b,theta,gamma,epsilon,s,consideromega,considergamma):
    pb = pd.read_excel(r"transformed_data/plan_budgetaire_avec_hypotheses.xlsx")
    pb_np = {}

    for colonne in pb.columns:
        pb_np[colonne] = pb[colonne].tolist()

```

La durée de la modélisation, qui correspond à T, a été fixée durant la présentation de la modélisation.

```
T=len(pb_np["t"])
```

Des matrices sont créées pour le niveau de capital, les investissements en maintien, les investissements en bonification, l'âge et l'âge réel. Chaque ligne représente une génération et chaque colonne représentant une nouvelle période.

```

Ks_dict = {}
Ms_dict = {}
Bs_dict = {}
Ds_dict = {}
as_dict = {}
ars_dict = {}

```

La création de générations d'actifs débute après les périodes pour lesquelles le capital est déjà agrégé.

```

for i in nouvelle_classification:
    Ks_dict[i] = np.zeros((T-4, T-4))
    Ms_dict[i] = np.zeros((T-4, T-4))
    Bs_dict[i] = np.zeros((T-4, T-4))
    Ds_dict[i] = np.zeros((T-4, T-4))
    as_dict[i] = np.zeros((T-4, T-4))
    ars_dict[i] = np.zeros((T-4, T-4))

```

Un premier ensemble de variables qui ne disposent pas de classes sont calculées.

```

for t in range(T) :
    if np.isnan(pb_np['Y'][t]):
        pb_np['Y'][t] = Y_plus_un(pb_np['Y'][t-1],
                                    pb_np["g"][t-1],
                                    pb_np["pi"][t-1])

    if np.isnan(pb_np["s"][t]):
        if not np.isnan(pb_np["S"][t]) :
            if not np.isnan(pb_np['Y'][t]):
                pb_np["s"][t]=pb_np["S"][t]/pb_np['Y'][t]
        else :

```

```

pb_np["s"][t]=s

if np.isnan(pb_np["S"][t]):
    pb_np["S"][t]=pb_np["s"][t]*pb_np['Y'][t]

if np.isnan(pb_np["SD"][t]):
    pb_np["SD"][t]=service_dette(pb_np['DN'][t-1],
                                pb_np["r"][t-1])

if np.isnan(pb_np['DN'][t]):
    pb_np['DN'][t]=debt_plus_un(pb_np['DN'][t-1],
                                pb_np["SD"][t-1],
                                pb_np["S"][t-1],
                                pb_np["I_Q"][t-1])

```

Un calcul par génération et par classe est ensuite effectué selon les conditions énoncées dans le Chapitre 4.

```

if t-4>=0:
    for n in range(t-4+1) :
        for i in nouvelle_classification :

            if np.isnan(pb_np["m_C_+i"][t]):
                pb_np["m_C_+i"][t]=m[i]

            if np.isnan(pb_np["b_C_+i"][t]):
                pb_np["b_C_+i"][t]=b[i]

            if t-4-n==0:
                if not np.isnan(pb_np["B_C_+i"][t]):
                    Bs_dict[i][n,t-4]=pb_np["B_C_+i"][t]

                else :
                    Bs_dict[i][n,t-4]= bonif(pb_np["Y"][t],
                                                pb_np["b_C_+i"][t])

                pb_np["B_C_+i"][t]=Bs_dict[i][n,t-4]
                pb_np["B_Q_+i"][t]=tau(pb_np["B_C_+i"][t],
                                         pb_np["tau"][t])

            if np.isnan(pb_np["B cumulée_+i"][t]):
                pb_np["B cumulée_+i"][t]=pb_np["B cumulée_+i"][t-1]+pb_np["B_C_+i"][t]

            if n==0:
                as_dict[i][n, t-4] = pb_np["A_+i"][n+4]
                ars_dict[i][n, t-4] = pb_np["A_+i"][n+4]
                Ds_dict[i][n, t-4]= delta(pb_np["A_+i"][n+4],
                                            theta[i],
                                            zeta_nc[i])
            else:
                Ds_dict[i][n, t-4]=delta(ars_dict[i][n,t-4],
                                         theta[i],
                                         zeta_nc[i])

            if not np.isnan(pb_np["K_+i"][t]):
                if t-4==0:
                    Ks_dict[i][n,t-4]=pb_np["K_+i"][t]
                else:
                    Ks_dict[i][n,t-4]=Bs_dict[i][n,t-4]* Ds_dict[i][n, t-4]

            else:
                if n==0:
                    Ms_dict[i][n, t-4] = maintien(pb_np['Y'][t],
                                                    pb_np["m_C_+i"][t]) * pb_np["B cumulée_+i"][4]/
                                                    pb_np["B cumulée_+i"][t-1]
                    as_dict[i][n, t-4] = t-4-n+pb_np["A_+i"][n+4]

```

```

if considergamma == 1 :
    ars_dict[i][n, t-4] = age_r_plus_un(ars_dict[i][n, t-5],
                                         gamma[i],
                                         zeta_nc[i],
                                         Ms_dict[i][n,t-5])

if considergamma == 0 :
    ars_dict[i][n, t-4] = age_r_plus_un(ars_dict[i][n, t-5],
                                         0,
                                         zeta_nc[i],
                                         Ms_dict[i][n,t-5])

Ds_dict[i][n, t-4]= delta(ars_dict[i][n, t-4],
                           theta[i],
                           zeta_nc[i])

if ars_dict[i][n, t-4]<0:
    ars_dict[i][n, t-4]=0

if Ds_dict[i][n, t-4] > 1 :
    Ds_dict[i][n, t-4]=1

Ks_dict[i][n, t-4]= (1-(Ds_dict[i][n, n]-Ds_dict[i][n, t-4]))*Ks_dict[i][n,n]

else:
    Ms_dict[i][n, t-4] = maintien(pb_np['Y'][t],
                                   pb_np["m C_"+i][t]) * Bs_dict[i][n,n] /
                                   pb_np["B cumulée_"+i][t-1]
    as_dict[i][n, t-4] = t-4-n

    if considergamma == 1 :
        ars_dict[i][n, t-4] = age_r_plus_un(ars_dict[i][n, t-5],
                                             gamma[i],
                                             zeta_nc[i],
                                             Ms_dict[i][n,t-5])

    if considergamma == 0 :
        ars_dict[i][n, t-4] = age_r_plus_un(ars_dict[i][n, t-5],
                                             0,
                                             zeta_nc[i],
                                             Ms_dict[i][n,t-5])

    Ds_dict[i][n, t-4]= delta(ars_dict[i][n, t-4],
                               theta[i],
                               zeta_nc[i])

    if ars_dict[i][n, t-4]<0:
        ars_dict[i][n, t-4]=0

    if Ds_dict[i][n, t-4] > 1 :
        Ds_dict[i][n, t-4]=1

    Ks_dict[i][n, t-4]= Ds_dict[i][n, t-4]*Ks_dict[i][n,n]

```

Un deuxième ensemble de variables qui ne disposent pas de classes agrège les données de classes.

```

if np.isnan(pb_np["K"][t]):
    pb_np["K"][t]=0

if np.isnan(pb_np["I Q"][t]):
    pb_np["I Q"][t]=0

if np.isnan(pb_np["I C"][t]):
    pb_np["I C"][t]=0

```

```

for i in nouvelle_classification:

    if np.isnan(pb_np["K_ "+i][t]):
        pb_np["K_ "+i][t]=Ks_dict[i].sum(axis=0)[t-4]

    pb_np["K"] [t]+=pb_np["K_ "+i][t]

    if np.isnan(pb_np["M C_ "+i][t]):
        pb_np["M C_ "+i][t]=Ms_dict[i].sum(axis=0)[t-4]

    if np.isnan(pb_np["M Q_ "+i][t]):
        pb_np["M Q_ "+i][t]=tau(pb_np["M C_ "+i][t],
                               pb_np["tau"] [t])

    pb_np["I C"] [t] += pb_np["M C_ "+i][t]
    pb_np["I C"] [t] += pb_np["B C_ "+i][t]

    pb_np["I Q"] [t] += pb_np["M Q_ "+i][t]
    pb_np["I Q"] [t] += pb_np["B Q_ "+i][t]

    if np.isnan(pb_np["A_ "+i][t]):
        as_B_cumule = 0
        for n in range(t-4+1):
            if n==0:
                as_B_cumule += as_dict[i][n, t-4] *pb_np["B cumulée_ "+i][n+4]
            else:
                as_B_cumule += as_dict[i][n, t-4] * Bs_dict[i][n, n]
        pb_np["A_ "+i][t] = as_B_cumule / pb_np["B cumulée_ "+i][t]

    if np.isnan(pb_np["AR_ "+i][t]):
        ars_B_cumule = 0
        for n in range(t-4+1):
            if n==0:
                ars_B_cumule += ars_dict[i][n, t-4] *pb_np["B cumulée_ "+i][n+4]
            else:
                ars_B_cumule += ars_dict[i][n, t-4] * Bs_dict[i][n, n]
        pb_np["AR_ "+i][t] = ars_B_cumule / pb_np["B cumulée_ "+i][t]

```

Un premier ratio est calculé à la fin de la boucle sur les classes.

```

if np.isnan(pb_np["rho_ "+i][t]):
    pb_np["rho_ "+i][t] = 1 - (pb_np["AR_ "+i][t] / pb_np["A_ "+i][t])

```

Un troisième et dernier ensemble de variables qui ne disposent pas de classes est calculé.

```

if np.isnan(pb_np["O"] [t]):
    pb_np["O"] [t]=croissance_nominale_infra_plus_un(pb_np["K"] [t],
                                                       pb_np["K"] [t-1])

if np.isnan(pb_np["o"] [t]):
    pb_np["o"] [t]=croissance_reelle_infra(pb_np["O"] [t],
                                             pb_np["psi"] [t])

if consideromega == 1:
    if np.isnan(pb_np["omega"] [t]):
        pb_np["omega"] [t] = effet_infra(pb_np["o"] [t],
                                         epsilon)

if consideromega == 0:
    if np.isnan(pb_np["omega"] [t]):
        pb_np["omega"] [t] = 0

if np.isnan(pb_np["g"] [t]):
    pb_np["g"] [t] = g(pb_np["phi"] [t],
                      pb_np["omega"] [t])

```

Finalement, les derniers ratios qui ne disposaient pas de colonnes sont calculés lorsque toutes les valeurs des autres variables ont été obtenues.

```
pb_np["dn"] = np.array(pb_np['DN'])/np.array(pb_np['Y'])
pb_np["k"] = np.array(pb_np['K'])/np.array(pb_np['Y'])

return pb_np
```

Les graphiques obtenus pour les résultats supposent par la suite d'utiliser la dernière définition, de choisir les différentes variables à fixer (entre parenthèses) et de sélectionner la variable dont l'évolution est à afficher (entre crochets).

```
m_mod = {"Administration et sécurité" : 0.000632,
          "Logement et équipements collectifs" : 0.001900,
          "Loisirs, culture et religion" : 0.000651,
          "Développement économique et environnement" : 0.000183,
          "Enseignement" : 0.004955,
          "Communications" : 0.001383,
          "Santé" : 0.002875,
          "Transports" : 0.005365,
          "Transport en commun" : 0.001449}
b_mod = {"Administration et sécurité" : 0.000426,
          "Logement et équipements collectifs" : 0.000538,
          "Loisirs, culture et religion" : 0.000368,
          "Développement économique et environnement" : 0.000498,
          "Enseignement" : 0.004588,
          "Communications" : 0.000710,
          "Santé" : 0.004680,
          "Transports" : 0.001408,
          "Transport en commun" : 0.001257}
theta_mod = {"Administration et sécurité" : 0.01,
             "Logement et équipements collectifs" : 0.01,
             "Loisirs, culture et religion" : 0.01,
             "Développement économique et environnement" : 0.01,
             "Enseignement" : 0.01,
             "Communications" : 0.01,
             "Santé" : 0.01,
             "Transports" : 0.01,
             "Transport en commun" : 0.01}
epsilon_mod = 0.1
s_mod = 0
omega_actif = 1
gamma_actif = 1

reference_mod = evol(
    m_mod, b_mod, theta_mod, gamma_mod,
    epsilon_mod, s_mod, omega_actif, gamma_actif)[dn]
```

