



Titre: État des infrastructures et innovation dans leur construction : une
Title: analyse économétrique du réseau québécois

Auteur: Alexandre Touw
Author:

Date: 2019

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Touw, A. (2019). État des infrastructures et innovation dans leur construction :
Citation: une analyse économétrique du réseau québécois [Mémoire de maîtrise,
Polytechnique Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/4006/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/4006/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Marcelin Joanis
Advisors:

Programme: Maîtrise recherche en génie industriel
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

**État des infrastructures et innovation dans leur construction : une analyse
économétrique du réseau québécois**

ALEXANDRE TOUW

Département de mathématiques et de génie industriel

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*
Génie industriel

Août 2019

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

**État des infrastructures et innovation dans leur construction : une analyse
économétrique du réseau québécois**

présenté par **Alexandre TOUW**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Jean-Philippe CHARRON, président

Marcelin JOANIS, membre et directeur de recherche

Patrick RICHARD, membre

DÉDICACE

*À mes grands-parents,
À mes parents.*

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d’abord sincèrement à remercier chaleureusement mon directeur de recherche, Monsieur **Marcelin Joanis** pour son soutien continu tout au long de cette année, qui dépassa nettement le simple cadre académique, et qu’il aura su me témoigner jusqu’au dernier instant de cette aventure universitaire malgré son emploi du temps particulièrement chargé.

Je tiens également à exprimer ma gratitude à **M. Jean-Philippe Charron** pour avoir accepté de présider mon jury ainsi que **M. Patrick Richard** d’avoir accepté d’examiner mes travaux.

Je remercie sincèrement le Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton (**CRIB**) pour m’avoir fourni les ressources financières qui m’ont permis d’aborder mon expérience à Montréal avec plus de simplicité et bien évidemment la Ville de Montréal et particulièrement MM. **Étienne Cantin Bellemare** et **Louis-Philippe Riopel** pour leur confiance.

Je remercie grandement **M. René Gagnon** de la Direction des Structures du Ministère des Transports du Québec qui a pris le temps de répondre à tous mes questionnements de façon rapide et précise et qui m’a permis de récupérer la base de données des structures remplacées sur laquelle se fonde une grande partie de ce mémoire.

Je tiens également à remercier tout particulièrement **Mme Nicole Brind’Amour**, bibliothécaire au centre de documentation du Ministère des Transports à Montréal pour sa patience et son expertise qui a su me mettre sur la voie de bon nombre de documents qui ont permis la rédaction de ce mémoire.

Je remercie également le Centre Interuniversitaire de Recherche en Analyse des Organisations (**CIRANO**) de m’avoir accueilli et d’avoir mis à ma disposition un lieu de travail dans une ambiance de recherche et de découverte toute particulière. Travailler dans ce lieu n’aurait pas été pareil sans la présence et le soutien inconditionnel de **Manon Desjardins** qui a su me conseiller et m’accompagner dans les moments de doute et m’a permis de réguler mon affolante consommation de café. Un grand merci à toi !

Un grand merci également à **Thibaud Le Scolan** pour tous tes dimanches soir spécialement réservés, pour ces découvertes sud-coréennes et pour ces marathons impromptus. Plus largement, je tiens remercier tous mes colocataires ; Paul, Lynda, Amandine, Thibaut, Zachary, Nolwenn, Louis, Sacha, Manuel et Laura. Un grand merci également à **Nina Dissler** dont la jovialité constante et la passion pour la cuisine nippone a su égayer mes journées les plus difficiles. Un grand merci également à tous les albigeois avec lesquels j’ai vécu cette expérience montréalaise et qui ont su y apporter un peu de camaraderie : Louise, Clémence, Quentin, Romain, Emma, Matija, Marie, Marc et bien d’autres.

Pour avoir su égayer mes journées avec les histoires plus saugrenues, un immense merci à **Alexandre Riveaux** dont les conseils sur les élasticités ne sont plus à vanter, ainsi qu'à **Hugo Boichat** dont l'aventure musicale aura, je n'en doute pas, toute l'attention qu'elle mérite. Plus largement, je remercie **tous les amis** qui m'ont soutenu de près ou de loin pendant ces deux ans à Montréal.

Enfin, le plus grand des remerciements va à **mes parents** pour m'avoir toujours soutenu dans mes démarches et ce, au meilleur de leurs capacités et sous toutes les formes imaginables malgré la distance et parfois même, l'incompréhension. Merci à **ma famille** pour son support constant.

RÉSUMÉ

Depuis quelques années, le gouvernement québécois prend le pas de la problématique du vieillissement de son réseau d'infrastructures en mettant en place de grandes politiques d'investissements. Le Plan Québécois des Infrastructures 2019-2029 prévoit ainsi un montant total d'investissements de près de 115,4 milliards de dollars (CAD) dont la grande majorité est réservée au maintien de l'offre de service (environ 80%). La priorité est mise sur l'accélération de la remise en état de ses infrastructures les plus vétustes (rétablissement de l'état de l'infrastructure ou remplacement dans le cas le plus extrême) mais prévoit également de plus simples rénovations ou améliorations des structures en mauvais état. Nous avons décidé de nous intéresser tout particulièrement aux 19,4 milliards qui concernent les remplacements des infrastructures au travers de l'étude d'une base des données des structures remplacées par le Ministère des Transports du Québec sur la période 1990-2019.

Cet intérêt particulier pour les remplacements vient du cas d'étude idéal des passerelles Barr et Isabey-Darnley à Montréal qui sont à l'origine de la démarche de ce mémoire. Ces deux passerelles sont soumises aux mêmes contraintes extérieures et ont été remplacées à un an d'intervalle, la première par une nouvelle structure en béton armé, l'autre par une structure en Béton Fibré à Ultra Hautes Performances développé dans les laboratoires de l'École Polytechnique de Montréal. La situation de ces deux passerelles permettra à la Ville de Montréal d'étudier l'évolution de l'état des deux structures et de les comparer au fil du temps, la passerelle Barr jouant le rôle de structure de contrôle tandis que la passerelle Isabey-Darnley construite dans un matériau nouveau jouera le rôle de la structure test. C'est cette démarche de comparaison de structures similaires que nous avons essayé de reproduire dans ce mémoire.

Nous nous efforcerons donc d'abord de dresser un portrait de l'état du parc d'infrastructures du Ministère des Transports du Québec et de le modéliser à l'aide de méthodes statistiques d'une part, de décrire le sous-groupe de structures remplacées ainsi que les structures qui les remplacent. Nous nous attarderons tout particulièrement sur les structures remplacées par des structures d'un type autre que leur type initial ainsi que sur les facteurs explicatifs de ces remplacements particuliers. Enfin, nous chercherons à étudier le lien entre cette décision de remplacer une structure par une structure d'un type différent et l'état de la structure qui sera caractérisé par l'Indice de Condition Générale (ICG). Le cas général sera abordé à l'aide de méthodes économétriques d'inférence causale et d'estimation d'effet de traitement en particulier via une méthode d'appariement par score de propension. Ces méthodes nous permettent de comparer des structures en contrôlant pour un vecteur de covariables défini

et ainsi nous assurer de comparer des observations similaires ou réellement comparables entres-elles. Certains cas particuliers bien spécifiés seront discutés.

Après constitution d'une base de données par association de plusieurs bases fournies, ou rendues disponibles, par le Ministère des Transport, les analyses descriptives de l'état du réseau sont effectuées sur 11 455 observations, parmi lesquelles nous traitons plus en détail 1636 observations de remplacement sur la période 1990-2019.

Il apparaît alors que, pour le cas général, remplacer une structure par une structure d'un autre type a un effet positif sur l'état de la structure. Ce résultat est confirmé lorsque l'on s'intéresse uniquement aux remplacements des ponts acier-bois mais est opposé lorsque l'on considère uniquement les remplacements des ponts à poutres en béton armé. Ces différences de résultats entre une étude globale sur tout le réseau d'infrastructures et d'autres plus précises basées uniquement sur certains types particuliers rendent compte des difficultés que l'on peut avoir à remplacer l'expérience quasi-naturelle qui consiste à comparer les évolutions de deux structures soumises aux mêmes conditions environnementales mais qui diffèrent par leur type ou leur matériau.

L'objectif de ce mémoire est donc de mettre en exergue la possibilité de mise en place de démarches d'analyse au travers de certaines méthodes économétriques et de dégager des tendances ou des pistes de réflexion au lecteur qui pourraient conduire à de futures études sur la gestion d'un parc d'infrastructures.

ABSTRACT

In recent years, the Quebec government tries to tackle its aging infrastructure network problem by initiating major investment policies. The Quebec Infrastructures Plan 2019-2029 thus provides for a total investment of 115,4 billion (CAD), nearly 80% of which is reserved for maintaining the service offering. The priority is put on accelerating the rehabilitation of its most obsolete infrastructure (restoration of the condition of the infrastructure or replacement in the most extreme cases) but also provides for simpler renovations or improvements to structures in poor condition. We have decided to pay special attention to the 19,4 billion dedicated to infrastructure replacements through the study of a database of structures replaced by the Ministère des Transports du Québec over the period 1990-2019.

This particular interest in replacements comes from the ideal case study of the Barr and Isabey-Darnley pedestrian bridges in Montreal, which are at the origin of the approach of this document. These two bridges are subject to the same external constraints and have been replaced one year apart, the first by a new reinforced concrete structure, the other by an Ultra High Performance Fiber Concrete structure developed in the laboratories of the École Polytechnique de Montréal. The ideal situation of these two bridges will allow Ville de Montréal to study the evolution of the condition of the two structures and compare them over time, with the Barr pedestrian bridge acting as a control structure and the Isabey-Darnley pedestrian bridge built in a new material playing the role of the test structure. It is this process of comparing similar structures that we have tried to reproduce in this document.

We will therefore first attempt to draw up a picture of the state of the Ministère des Transports du Québec's infrastructure network and model it using statistical methods, on the one hand, and to describe the sub-group of replaced structures and the structures that replace them, on the other. We will focus in particular on structures replaced by structures of a type other than their initial one and on the factors explaining these particular replacements.

Finally, we will investigate the relationship between this decision to replace a structure with a different type of structure and the condition of the structure that will be characterized by the General Condition Index (GCI). The general case will be addressed using econometric methods of causal inference and treatment effect estimation, in particular through a propensity score matching method. These methods allow us to compare structures by controlling for a chosen vector of covariates and thus ensure that we compare similar observations with each other. Some specific cases will be discussed.

After setting up a database by combining several databases provided by the Ministry of

Transport, descriptive analyses of the state of the network will be carried out on 11 455 observations. We will deal in more detail with 1636 replacement observations over the period 1990-2019.

We find that, for the general case, replacing a structure with a different type of structure has a positive effect on its global condition. This result is confirmed when we only study the replacements of steel-wood bridges but is opposite when we only study the ones of reinforced concrete beam bridges. These differences in results between a global study on the entire infrastructure network and more precise studies based only on specific types of infrastructure reflect the difficulties that may be encountered in replacing the quasi-natural experience of comparing the evolution of two structures that are subject to the same environmental conditions but differ in type or material.

The objective of this thesis is therefore to highlight the possibility of implementing analytical approaches through certain econometric methods and to identify trends or interesting tracks to the reader that could lead to future studies on the management of an infrastructure network.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iii
REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	vi
ABSTRACT	viii
TABLE DES MATIÈRES	x
LISTE DES TABLEAUX	xiii
LISTE DES FIGURES	xv
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xvii
LISTE DES ANNEXES	xviii
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 État des infrastructures et investissements publics au Québec	1
1.2 La place de l'innovation dans les contrats publics en infrastructure au Québec	6
1.2.1 L'évolution de l'utilisation de matériaux de constructions au Québec : un historique	6
1.2.2 Les enjeux de l'innovation pour la construction publique	10
1.3 Mise en contexte : la situation des passerelles Barr et Isabey-Darnley	13
1.4 Objectifs et démarche	15
CHAPITRE 2 LES DONNÉES	17
2.1 La base de données du Ministère des Transports du Québec (MTQ)	17
2.1.1 Format général de la base de données	17
2.1.2 Détail des variables	23
2.2 La base de données des structures remplacées	24
2.2.1 Détails de la base de données	25
2.2.2 Fusion avec la base de données du MTQ	27
2.3 Base de données relative à l'Indice de Condition Générale (ICG)	28
2.3.1 Présentation rapide de la base de données	28

2.3.2	Variables exploitables et modifications	29
2.4	Base de données finale épurée	31
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE : MODÉLISATIONS STATISTIQUES ET ÉCONO-		
	MÉTRIQUES	34
3.1	Généralités	34
3.2	Retour sur les fondements de l'analyse de régression	35
3.2.1	Objectifs généraux	35
3.2.2	Performance d'un modèle	36
3.2.3	Sélection des variables	37
3.3	Les modèles de régression logistiques	40
3.3.1	Les modèle logit et probit	41
3.3.2	Interprétations	42
3.3.3	Estimation et tests	42
3.4	Méthodes d'identification économétrique d'effets causaux	44
3.4.1	Considérations statistiques et problématiques générales	44
3.4.2	L'expérimentation randomisée	45
3.4.3	Les méthodes quasi-expérimentales	46
3.4.4	Estimation par ajustement régressif (RA)	47
3.4.5	Estimation par pondération inverse (IPW)	47
3.4.6	L'estimation doublement robuste (IPWRA)	48
3.4.7	Appariement par score de propension	48
CHAPITRE 4 RÉSULTATS		
4.1	Introduction	52
4.1.1	Rappel de la démarche	52
4.1.2	Quelques résultats généraux	52
4.1.3	Matériaux	55
4.2	Statistiques descriptives du réseau québécois	60
4.2.1	Ponceaux	61
4.3	Expliquer l'ICG : quel modèle?	68
4.3.1	les variables quantitatives	68
4.3.2	Le cas des matériaux et de la catégorie de structure	70
4.3.3	Le vecteur de covariables	71
4.3.4	Test de robustesse pour l'interprétation des variables géographiques	72
4.4	Caaractérisation des traitements	73
4.4.1	Rappel de la démarche	73

4.4.2	Comment caractériser le remplacement par un autre type ?	75
4.4.3	Analyse bivariée	75
4.4.4	Analyse multivariée	77
4.4.5	Détermination des covariables	77
4.5	Détermination des types pour l'étude	79
4.5.1	Caractérisation des types disparus	79
4.5.2	Quels types pour l'étude ?	83
4.5.3	Structures remplaçantes	84
4.6	Effet du traitement : remplacer par un type "innovant"	90
4.6.1	Cas général	90
4.6.2	Type 18 - Ponceaux arqués en acier	98
4.6.3	Type 45 - Ponts acier-bois	99
4.6.4	Synthèse partielle	103
4.7	Effet du traitement : Comparaison simple de construire dans un type plutôt qu'un autre : le cas des ponts à poutres en béton armé	105
CHAPITRE 5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		109
5.1	Synthèse des travaux	109
5.1.1	Objectifs et approche	109
5.1.2	Résultats	109
5.2	Limitations de la solution proposée et améliorations futures	113
5.2.1	La problématique des données	113
5.2.2	La méthode	114
RÉFÉRENCES		116
ANNEXES		122

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Variables de la base de données du MTQ	18
Tableau 2.2	Répartition des catégories de structures en fonction de leur présence dans la base de données	19
Tableau 2.3	Répartition des fréquences d'observation par direction territoriale . . .	21
Tableau 2.4	Nouvelles appellations des variables relatives aux structures remplacées	27
Tableau 2.5	Codage de l'ICG	30
Tableau 4.1	Moyenne de l'ICG par direction territoriale	54
Tableau 4.2	Moyenne de l'ICG par matériau de construction utilisé	56
Tableau 4.3	Catégorisation des ponceaux	61
Tableau 4.4	Moyenne de l'ICG par catégorie de ponceau	63
Tableau 4.5	Moyenne de l'ICG par matériau de construction de ponceau	63
Tableau 4.6	Moyenne de l'ICG des ponceaux par direction territoriale	65
Tableau 4.7	Résultats des régressions sur l'ICG moyen des ponceaux. (t_{stat}) <i>Significativités :</i> $*p < 0.10$, $**p < 0.05$, $***p < 0.01$	66
Tableau 4.8	Matrice de corrélation des différentes variables explicatives de l'ICG moyen pour les ponceaux.	67
Tableau 4.9	Résultats des régressions sur l'ICG (t_{stat}) Niveaux de significativités : 1%($***$), 5%($**$) et 10%($*$).	69
Tableau 4.10	Résultats du test de robustesse à l'exclusion de la région de Montréal des régressions sur l'ICG (t_{stat}) Niveaux de significativités : 1%($***$), 5%($**$) et 10%($*$).	73
Tableau 4.11	Dates de première et de dernière construction d'un type de structure .	81
Tableau 4.12	Répartition des types de structures remplaçant le type 18 de ponceaux arqués en acier.	84
Tableau 4.13	Répartition des types de structures remplaçant le type 41 de ponts à poutres en béton armé.	86
Tableau 4.14	Répartition des types de structures remplaçant le type 45 de ponts acier-bois.	89
Tableau 4.15	Résultat des estimations des effets sur l'ICG de remplacer dans un type nouveau plutôt que dans le même type.	94
Tableau 4.16	Tableau des différences moyennes des variables par groupe et par mé- thode d'appariement.	96

Tableau 4.17	Résultat des estimation des effets de remplacer une structure par une structure d'un autre type sur l'ICG en fonction de la méthode d'appariement par score de propension. t_{stat}	97
Tableau 4.18	Résultat des estimations des effets de remplacer dans un type autre que le type 45 sur l'ICG.	99
Tableau 4.19	Résultat des estimations des effets sur l'ICG de remplacer un pont acier-bois par une structure en béton armé plutôt que par une en acier-bois.	102
Tableau 4.20	Moyenne des largeurs des deux structures remplaçantes en béton armé principales des ponts acier-bois.	103
Tableau 4.21	Résultat des estimations des effets sur l'ICG de construire dans un type considéré comme nouveau plutôt que dans le type 41.	107
Tableau B.1	Nouvelle catégorisation des ponts	124
Tableau B.2	ICG moyen par categorie de pont.	124
Tableau B.3	ICG moyen selon le matériau de construction et la catégorie de pont.	125
Tableau B.4	Moyenne de l'ICG des ponts par direction territoriale	127
Tableau C.1	Distribution et ICG moyen des portiques	128
Tableau C.2	Moyenne de l'ICG des portiques par direction territoriale	129
Tableau D.1	Résultats de la régression générale sur l'ICG (t_{stat}) contrôlant pour les ponceaux arqués, les ponts en arc, le béton armé et le Bas-Saint-Laurent. Niveaux de significativités : 1%(* * *), 5%(**) et 10%(*).	130
Tableau E.1	Associations bivariées des caractéristiques, de la localisation géographique, de la catégorie de structure, du matériau de construction et de la Direction Territoriale avec la probabilité d'être une structure remplacée par une structure d'un autre type (t_{stat}) Niveaux de significativités : 1%(* * *), 5%(**) et 10%(*).	131
Tableau E.2	Résultat de la régression logistique multivariée du remplacement par un type nouveau selon les caractéristiques (contrôlant pour la largeur), la localisation géographique (contrôlant pour la longitude), la catégorie de structure (contrôlant pour les portiques), le matériau de construction (contrôlant pour le béton précontraint) et la Direction Territoriale (contrôlant pour l'Abitibi)(t_{stat}) Niveaux de significativités : 1%(* * *), 5%(**) et 10%(*).	133
Tableau F.1	Répartition des types de structures remplacées	134

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Distribution de l'âge des structures (pourcentage). Source : Base de données du MTQ.	2
Figure 1.2	Description de l'indice d'état gouvernemental (MTQ, 2019b).	4
Figure 1.3	Principes directeurs guidant la priorisation des investissements en infrastructures (PQI, 2019)	5
Figure 1.4	Répartition des types d'investissements du gouvernement du Québec pour le réseau routier (pourcentage). Source (MTQ, 2019b)	5
Figure 1.5	Évolution du nombre de constructions annuel par matériau	8
Figure 2.1	Répartition des matériaux utilisés dans la construction des structures .	20
Figure 2.2	Carte des directions territoriales du Ministère des Transports du Québec	22
Figure 2.3	Format de la base de données des structures remplacées	26
Figure 2.4	Résultats de l'appariement des deux bases de données du MTQ et des structures remplacées	28
Figure 2.5	Résultats des appariements des ponts (a) puis des ponceaux (b) de la base de données ICG à la base de données du MTQ.	31
Figure 2.6	Processus de construction de la base de données finale à partir des trois bases du MTQ, des structures remplacées et de l'ICG.	33
Figure 3.1	Nombre de constructions recensées au fil du temps des types de ponts à poutres (a) en béton armé (b) en béton précontraint préfabriqué . .	39
Figure 3.2	Représentation des méthodes d'appariement de Kernel et par plus proches voisins	49
Figure 4.1	Répartition des catégories de structures	53
Figure 4.2	Répartition des observations par direction territoriale	54
Figure 4.3	Répartition des structures selon leur matériau de construction	55
Figure 4.4	Distribution de l'âge des structures en acier-bois par valeur d'ICG . . .	57
Figure 4.5	Évolution du nombre de constructions par an brut, et cumulé	58
Figure 4.6	Répartition en % du nombre total d'observations au fil du temps	59
Figure 4.7	Évolution du nombre de constructions selon le type de pont	60
Figure 4.8	$\overline{ICG}$ en fonction du genre de ponceau.	62
Figure 4.9	Répartition des matériaux de ponceaux	64
Figure 4.10	Distribution de l'âge des ponceaux (a) et de l'ICG moyen en fonction de l'âge des ponceaux (b).	67
Figure 4.11	Évolution de l'ICG moyen en fonction de l'âge des structures	71

Figure 4.12	Évolution du nombre de constructions par an des ponceaux arqués en acier et de ses trois principales types de structures remplaçantes	85
Figure 4.13	Évolution du nombre de constructions par an des ponts à poutres en béton armé et de ses trois principales types de structures remplaçantes	87
Figure 4.14	Évolution du nombre de construction de ponts acier-bois et des types qui les remplacent.	89
Figure 4.15	Densité estimée des probabilités prédites qu’une structure remplacée par un même type le soit réellement et qu’une structure remplacée par un nouveau type soit remplacée par son type initial en contrôlant pour toutes les covariables (a), les covariables significatives (b), les covariables significatives sauf l’acier-bois (c) et les covariables continues seulement (d)	92
Figure 4.16	Histogramme de répartition des scores de propension après appariement.	97
Figure A.1	Représentation des relations entre bases de données avant les appariements.	122
Figure B.1	Répartition des catégories de ponts	123
Figure B.2	Distribution du pourcentage de ponts par Direction Territoriale	126
Figure C.1	Nombre de constructions de portiques par Direction Territoriale	129

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ATE	Average Treatment Effect
ATET	Average Treatment Effect on the Treated
BDLM	Bayesian Dynamic Linear Model
BFUP	Béton Fibré à Ultra-haute Performance
CIRANO	Centre Interuniversitaire de Recherche en Analyse des Organisations
CRIB	Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton
DJMA	Débit Journalier Moyen Annuel
DT	Direction Territoriale
FMI	Fonds Monétaire International
ICG	Indice de Condition Générale
MTQ	Ministère des Transports du Québec
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Économiques
PAGI	Plan annuel de gestion des investissements publics en Infrastructures
PIB	Produit Intérieur Brut
PQI	Plan Québécois des Infrastructures

LISTE DES ANNEXES

Annexe A	Relations entre les trois bases de données MTQ, ICG et des structures remplacées	122
Annexe B	Statistiques descriptives - Ponts	123
Annexe C	Statistiques descriptives - Portiques	128
Annexe D	Résultats de la régression de l'ICG	130
Annexe E	Associations bivariées et multivariées	131
Annexe F	Type de structures remplacées	134

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 État des infrastructures et investissements publics au Québec

La situation des infrastructures semble toujours avoir été source d'inquiétudes et de débats de la part de l'opinion publique, peut-être particulièrement plus au Québec où les conditions climatiques rudes et agressives envers le réseau d'infrastructures forcent des investissements annuels considérables. L'aspect visuel et le ressenti que les citoyens peuvent donc percevoir du réseau et de son état fait partie des préoccupations principales des Québécois. De Marcellis-Warin et Peignier (2018) viennent confirmer et préciser ces ressentis en relevant même une augmentation de l'inquiétude des Québécois sur ces risques passant de 64 à 67% entre 2016 et 2018 et un manque de confiance envers les autorités publiques de s'occuper correctement du réseau (55% contre 44% en 2016). La confrontation individuelle inévitable du citoyen avec le réseau couplée avec l'impact médiatique que certaines situations peuvent engendrer comme la "saga" du Pont Champlain ou, plus tragique, l'effondrement du pont Morandini à Gênes causant la mort de 43 personnes en août 2018, ont un poids non négligeable sur le niveau de préoccupation des Québécois sur ce sujet.

Pourtant, les institutions sont loin d'être inactives ; au Québec, c'est la chute du Viaduc de la Concorde le 30 septembre 2006 sur l'autoroute 19 à Laval qui entraîne la mort de cinq personnes et fait six blessés qui fait réagir. Une commission d'enquête est fondée quelques jours après l'accident et un rapport d'enquête est produit, pointant du doigt le manque de sérieux lors des inspections et lors de la collecte de données nécessaires au suivi de l'évolution de l'état de la structure (Johnson *et al.*, 2007). En France, la chute du pont de Gênes rappelant la catastrophe du tunnel du Mont Blanc de 1999, a entraîné une mission d'information dédiée à l'évaluation des modalités de surveillance et d'entretien des ponts gérés par le secteur public, pointant du doigt 25000 ouvrages en mauvais état et dangereux pour la sécurité de ses usagers (Maurey *et al.*, 2018). La cause relevée de cet état ? Le vieillissement du parc d'infrastructures et le sous-investissement de son entretien.

La situation a longuement été similaire au Québec et l'état de l'âge des structures inquiète. Gagné et Haarman (2011) rappelle ainsi qu'après les investissements conséquents de la Révolution Tranquille, le gouvernement québécois a drastiquement réduit ses investissements sur la période du milieu des années 1970 jusqu'à la fin des années 1990. Cette réduction d'investissement pourra être constatée par les tendances présentées dans ce mémoire sur

l'évolution du nombre de constructions annuel mais il a surtout également entraîné une accélération du vieillissement du réseau d'infrastructures due à un manque d'entretien. La Figure 1.1 présente ainsi la distribution de l'âge des structures gérées par le Ministère des Transports et l'on constate aisément les tendances historiques évoquées. De nombreuses structures construites entre les années 1950 et 1980 commencent ainsi à atteindre leur durée de vie utile ensemble. Les décisions d'investissements conséquents sur une période relativement resserrée et celle d'avoir délaissé ces structures par la suite retombent maintenant sur les gouvernements actuels.

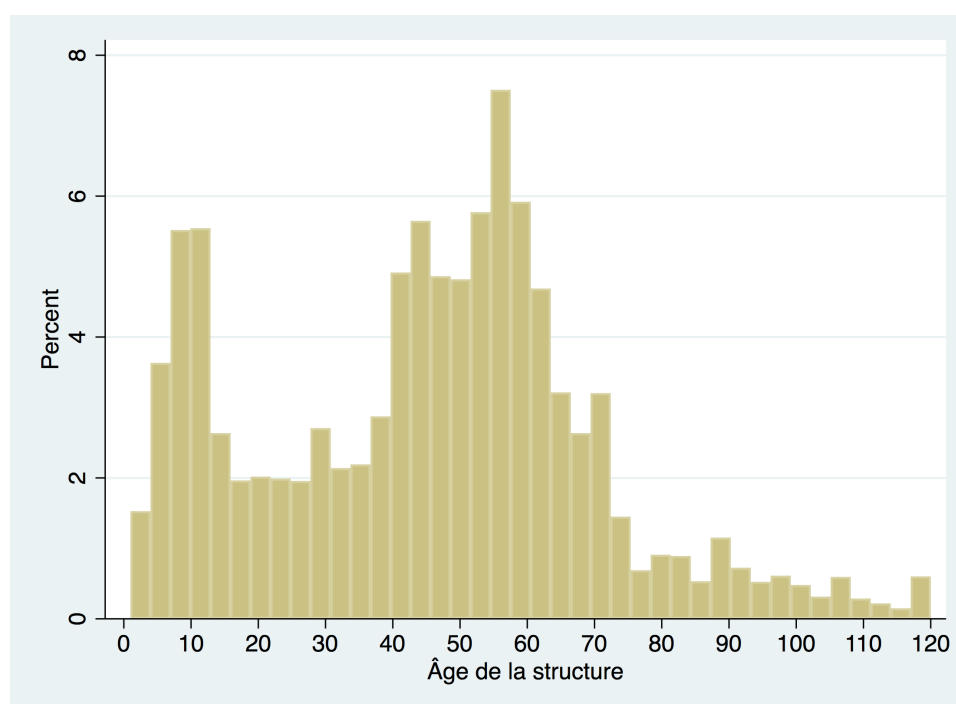


Figure 1.1 Distribution de l'âge des structures (pourcentage). Source : Base de données du MTQ.

Ce vieillissement du parc se ressent aujourd'hui au travers d'un déficit de maintien d'actifs des routes et des structures évalué à plus de 16 milliards (\$CAD) en 2019 et le constat que 50% des chaussées et 47% de structures du réseau routier peuvent être considérées en mauvais état (Chaussées, 2018; Structures, 2018). Ce déficit correspond au montant qu'il aurait fallu investir pendant leur vie utile pour les maintenir dans un état satisfaisant par rapport aux montants qu'il faudrait investir pour les réparer, remplacer ou reconstruire actuellement (Galipeau et Pourreaux, 2017).

Pourtant, le lien positif qui existe entre infrastructures et économie est très souvent ré-établi,

que cela soit via la croissance économique ou au travers de la productivité (Gagné et Haarman, 2011; O’Fallon, 2003; Cadot *et al.*, 2002). Joanis et Lapierre (2017) corroborent ce constat en rappelant que les infrastructures soutiennent et stimulent le développement de l’activité économique. Un rapport du Fonds Monétaire International FMI (2014) souligne les effets positifs des investissements publics en infrastructure, selon la manière dont ils sont financés, sur la croissance de la productivité (via une hausse du PIB à court terme qui traduit une hausse de la demande mais également à long terme)¹. Il dresse également un portrait sombre d’un manque d’investissements publics en infrastructures pour les pays du G7 et les lie, lui aussi, à la dégradation de leur état.

Par ailleurs, une fois ces investissements effectués, leur suivi est l’une des conditions nécessaires à l’assurance d’une bonne performance de la structure sur toute sa vie utile. Un rapport de OCDE (2017) met l’accent sur la nécessité de mettre en place une démarche de suivi, une bonne gestion transparente de son parc d’infrastructure afin de pouvoir suivre la bonne rentabilité de l’investissement (au travers du bon état de la structure) et de pouvoir anticiper les difficultés et problèmes d’entretien que les structures pourraient rencontrer.

C’est pourquoi, depuis 2007, le gouvernement québécois a mis en place un plan audacieux d’investissement dont l’un des objectifs est de résorber ce déficit d’entretien. Le dernier Plan Québécois des Infrastructures (MTQ, 2019b) présente un investissement massif de 15 milliards (\$CAD) supplémentaires qui viennent porter le total des investissements pour la période 2019-2029 à 115.4 milliards (\$CAD). D’autre part, depuis 2015 sont publiés des Plans Annuels de Gestion des Investissements publics en infrastructures (MTQ, 2019a). Ces documents, associés aux PQI ont pour objectif de dresser le portrait le plus représentatif du parc d’infrastructures afin d’améliorer la bonne gestion des investissements ainsi que des travaux de maintien de l’offre. Ce recensement de l’état des infrastructures se fait par l’intermédiaire d’un indice d’état gouvernemental dont la catégorisation est donnée en Figure 1.2². Ainsi simplement, une structure catégorisée A, B ou C (vert) aura un état jugé satisfaisant, mauvais (jaune et D) ou très mauvais (orange et E).

Cet indice gouvernemental permet une évaluation de l’état des infrastructures et surtout de réajuster les objectifs du ministère en fonction de l’état du parc de structures. Pour se faire, un système de priorisation des investissements a été mis en place. Le maintien d’un niveau d’offre de service a été considéré comme la priorité la plus importante ; à savoir maintenir l’état d’une structure ou la rénover si besoin afin de réajuster son état à un niveau acceptable. Lorsque cela n’est plus possible, un remplacement sera considéré (ce sont sur ces structures

1. Une littérature abondante sur les effets des investissements sur la croissance du PIB existe et on pourra par exemple se référer à Eklou *et al.* (2017) mais également à Joanis *et al.* (2017); Harchaoui et Tarkhani (2003) sur la manière de financer ces investissements.

2. Cet indice est semblable à l’Indice de Condition Générale (ICG) que nous définirons en Chapitre 2.

Indice d'état gouvernemental

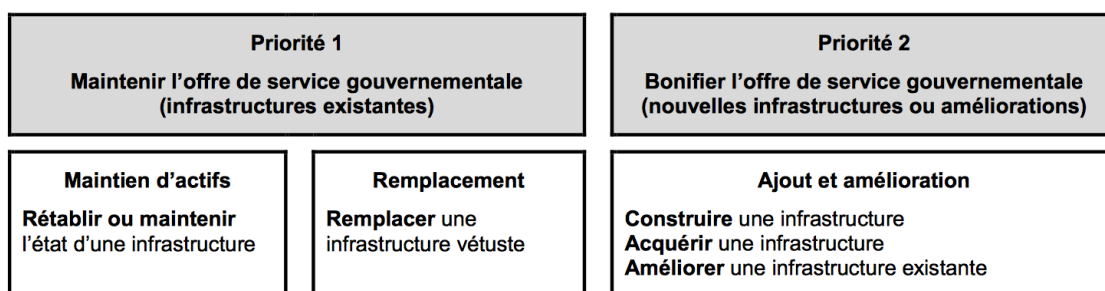
Indice	État	Description
A	Très bon	L'infrastructure est habituellement récente ou elle est remise à neuf. Elle rend le service sans interruption ou ralentissement. Elle nécessite peu de travaux de maintien d'actifs.
B	Bon	L'infrastructure présente un niveau léger de dégradation et de défectuosité. Elle nécessite certains travaux de maintien d'actifs. Habituellement, l'infrastructure est dans son deuxième tiers de vie utile. Des interruptions ou ralentissements de service de l'infrastructure peuvent survenir occasionnellement.
C	Satisfaisant	L'infrastructure présente un niveau modéré de dégradation et de défectuosité. Elle nécessite régulièrement des travaux de maintien d'actifs. Habituellement, l'infrastructure est dans son troisième tiers de vie utile. Des interruptions ou ralentissements de service de l'infrastructure surviennent occasionnellement. Au besoin, des mesures d'atténuation de risques sont en place.
Seuil d'état		
D	Mauvais	L'infrastructure présente un niveau élevé de dégradation et de défectuosité. Elle nécessite des travaux de maintien d'actifs importants et parfois urgents. Habituellement, l'infrastructure dépasse sa durée de vie utile. Des interruptions ou ralentissements de service de l'infrastructure surviennent souvent. Au besoin, des mesures importantes d'atténuation de risques sont en place.
E	Très mauvais	L'infrastructure présente un niveau très élevé de dégradation et de défectuosité. Elle nécessite des travaux de maintien d'actifs très importants et souvent urgents. Habituellement, l'infrastructure dépasse nettement sa durée de vie utile. Des interruptions ou ralentissements de service de l'infrastructure surviennent très souvent. Des mesures très importantes d'atténuation de risques sont en place.

Figure 1.2 Description de l'indice d'état gouvernemental (MTQ, 2019b).

particulières que notre étude se portera principalement par la suite). Dans un second temps seulement, l'objectif est d'élargir l'offre de service du Ministère en construisant ou en achetant de nouvelles structures ou, dans certains cas, en en améliorant une autre.

Cette démarche de suivi de son parc d'infrastructure représente un défi majeur de contrôle et rejoint ainsi bien les conseils de l'OCDE (2017). Il est à noter que parmi les 15% d'augmentation d'investissement par rapport au PQI de 2018-2028, une grande partie ira à la priorité du maintien de l'offre de service et pour lequel le réseau routier sera tout particulièrement favorisé, recevant 5.3 milliards (\$ CAD). La répartition des investissements donnée en Figure 1.4 conforte la démarche globale de priorisation.

Sur les 25 milliards (\$ CAD) d'investissements de prévus environ pour le réseau routier au PQI 2019-2029, ce sont 80% qui vont à l'objectif de priorisation numéro 1, à savoir le maintien de l'offre de service soit environ 20 milliards (\$ CAD). Parmi ces projets, on peut citer par exemple la réfection du pont Pie-IX entre Montréal et Laval qui devrait être fonctionnel en 2022. Nous avons décidé au travers de ce mémoire d'étudier l'état des infrastructures du réseau du MTQ mais également de nous attarder tout particulièrement sur la démarche de remplacement d'une structure par un autre type que son type initial, et d'en étudier l'impact sur l'état final de la structure. En effet, à la vue des montants mis en jeu par le Ministère, il



Par conséquent, le PQI 2019-2029 alloue la majorité des investissements prévus à des projets assurant la pérennité du parc existant, soit 65 %.

Figure 1.3 Principes directeurs guidant la priorisation des investissements en infrastructures (PQI, 2019)

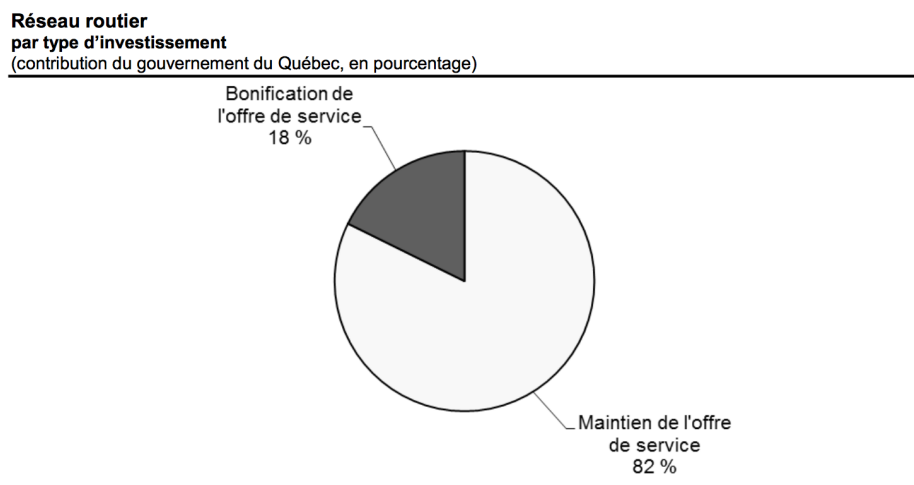


Figure 1.4 Répartition des types d'investissements du gouvernement du Québec pour le réseau routier (pourcentage). Source (MTQ, 2019b)

est légitime de se demander par quoi les structures sont remplacées ? Le sont-elles par une structure du même type ou va-t-on préférer une structure d'un autre type ? Ce type sera-t-il considéré comme "innovant", nouveau ou simplement autre ? Et quel effet en globalité ce remplacement aura sur l'état des infrastructures ?

1.2 La place de l'innovation dans les contrats publics en infrastructure au Québec

On peut donc s'interroger sur la place de ce que l'on considère comme l'innovation dans le parc du réseau québécois. Nous allons ainsi effectuer un bref constat historique sur l'évolution des différents types de structures et des différents matériaux employés au cours du XXème siècle et jusqu'à nos jours, puis nous attarder sur la gestion du parc d'infrastructures et enfin sur les différentes recherches plus techniques

1.2.1 L'évolution de l'utilisation de matériaux de constructions au Québec : un historique

Pour essayer de comprendre la diversité du réseau québécois et les difficultés qu'il peut rencontrer, il est intéressant de se tourner vers l'histoire du réseau et la manière dont il a évolué au fil des ans.³

Le Saint-Laurent ayant servi d'axe principal de colonisation, il dessert les villes majeures du Québec. Son utilisation pour le transport était quasi-majoritaire jusqu'au milieu du XIXème siècle et les autorités publiques ne jugeaient alors pas nécessaire la mise en place d'infrastructures routières dans la province.

Le bois À partir du milieu du XIXème siècle, on construit des ponts majoritairement en bois à travers tout le Canada, reflet de la grande disponibilité du matériau d'une part et de celle des compétences d'autre part. En effet, à cette époque, il est bien plus facile et moins coûteux de mandater un charpentier qu'un maçon étant donné que le bois était sans doute l'élément le plus travaillé au Canada à ce moment là. Les caractéristiques du bois et particulièrement sa résistance en tension et en pression en faisaient un matériau particulièrement privilégié. Néanmoins, la durée de vie des premiers ponts en bois ne dépassait pas quelques décennies ; les conditions climatiques ayant tendance à accélérer le pourrissement du bois ou les cours d'eau franchis en crue emportaient tout ou une partie de la structure.

3. Cette section est référencée principalement par l'intermédiaire de 3 ouvrages : (Ball, 1988; Bizier, 2019; Desrosiers, 1991).

Les techniques finissent néanmoins par évoluer au cours de la seconde moitié du XIX^{ème} et on voit apparaître des ponts en bois à poutres triangulés ainsi que des recouvrements des toitures et des poses de murs latéraux pour protéger le pont des aléas climatiques. Il reste encore 72 ponts observables au Québec dont la moitié environ sont répartis dans les seules Directions territoriales de l'Abitibi-Témiscamingue (27%), du Bas-Saint-Laurent (15%) et de la Chaudière-Appalaches (11%).

Le problème de la détérioration des ponts en bois et donc de sa durabilité et la problématique des charges de transport ferroviaires de plus en plus lourdes à assumer poussa les constructeurs à se tourner vers des matériaux plus résistants comme le fer ou l'acier.

Fer et acier Le fer, considéré comme un matériau rare à cette époque, a vu son prix baisser à la fin du XVIII^{ème} siècle et on a commencé à s'en servir pour renforcer des structures déjà existantes. On construisit néanmoins beaucoup de ponts à poutres en fer pour les ponts de chemins de fer pratiques par leur résistance accrue au feu qui permettaient de supporter les vapeurs des locomotives les traversant. Déjà, la problématique de la durabilité des structures faisait débat : lors de la construction du premier chemin de fer national, l'Intercolonial, cette ligne de transport qui devait relier la Nouvelle-Écosse, le Québec, l'Ontario et le Nouveau-Brunswick, l'ingénieur en chef du projet de l'Intercolonial Sandford Fleming du insister contre les commissaires de la compagnie des chemins de fer pour ne pas faire construire les structures en bois qui était beaucoup moins cher que le fer. Fleming insista, mettant en avant le fait que la pierre et le fer éviteraient à coup sûr de multiples incendies et seraient bien plus durables que le bois, réduisant ainsi les coûts réels totaux des structures en réduisant la fréquence d'entretien ou de rénovation, et finit par avoir gain de cause.

C'est néanmoins l'acier qui est la vraie révolution du XIX^{ème} siècle et qui va, très vite, remplacer complètement le fer et le bois. L'acier permet effectivement une grande rigidité et une meilleure capacité de charge ainsi qu'une portée plus conséquente. Le développement du trafic ferroviaire joua pour beaucoup à l'expansion de son utilisation comme matériau de référence : on commerce plus, les hommes et les marchandises doivent être affrétés de plus en plus loin, les charges à soutenir sont de plus en plus lourdes, les obstacles à franchir sont de plus en plus longs. De nombreux ponts à poutres en acier subsistent encore et sont considérés comme des chef-d'œuvres d'architecture civile ; on pensera notamment au pont de Québec et au pont Jacques Cartier à Montréal pour les ponts à poutres ou le pont de l'Île d'Orléans pour ceux suspendus ou à câble.

Béton Les ponts en béton font leur apparition au début du XX^{ème} siècle et vont s’y imposer comme le matériau de construction de prédilection partout dans le monde. Ce mélange de sable, de ciment, de gravier et d’eau va former un matériau durci. On ne construit initialement que de petites structures au début du siècle et sous le format de poutres en acier enrobées de béton. Le béton armé, matériau pour lequel on coule le béton autour de tiges en fer ou en acier, prendra le pas rapidement et s’imposera sur une grande majorité de structures. Des précisions sur les utilisations de ces matériaux selon les catégories de structures (ponceaux, portiques, ponts) seront données au Chapitre 4 mais on peut déjà constater en Figure 1.5 la prédominance du béton armé sur les autres matériaux au cours du siècle passé.

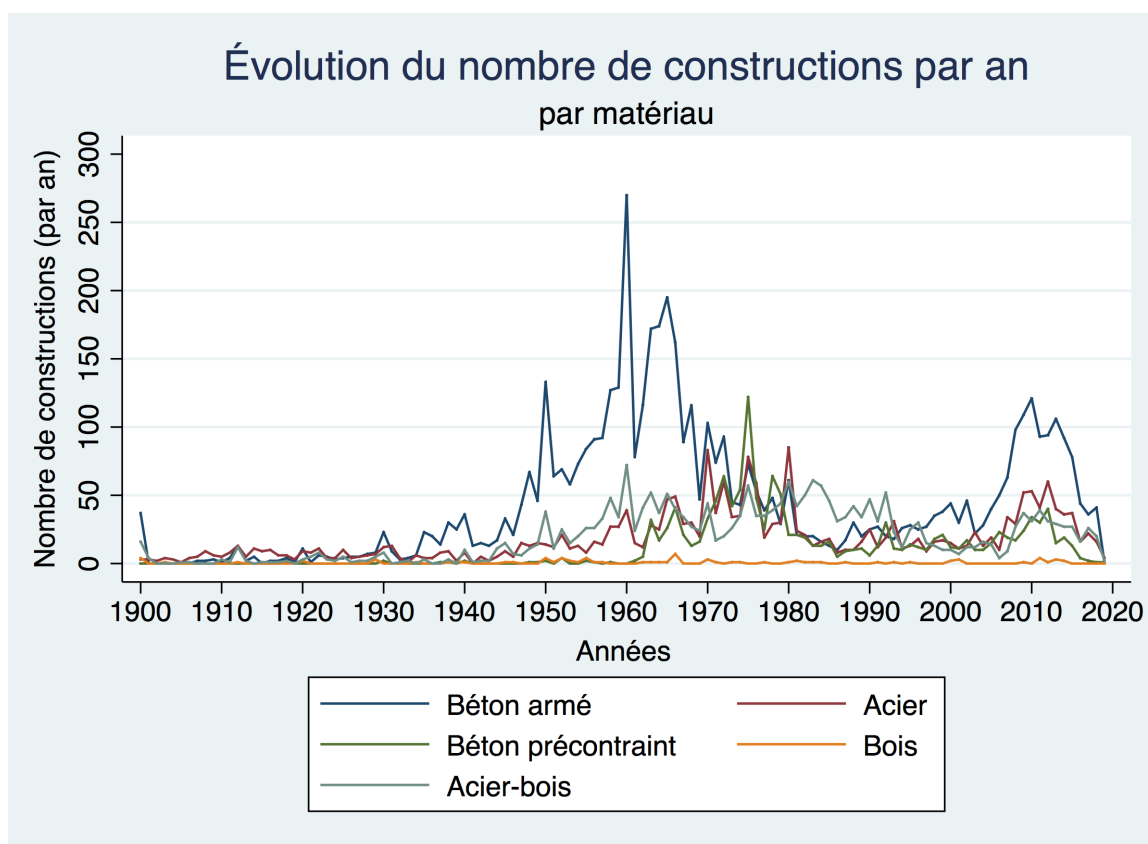


Figure 1.5 Évolution du nombre de constructions annuel par matériau

Le béton précontraint fait lui son apparition comme le dernier grand matériau utilisé du XX^{ème} siècle dans les années 1950 au Canada. Développé en France dans les années 1930 par le Polytechnicien et Ingénieur du corps des Ponts et Chaussées Eugène Freyssinet, cette technique consiste à comprimer le béton avant ou après son durcissement afin d’augmenter sa résistance.

De nos jours Comme nous l'avons montré et comme la Figure 1.5 le résume bien, il est possible d'établir relativement précisément les causes d'apparition d'un nouveau matériau, d'un nouveau type de structure, d'une nouvelle façon de construire et de constater leurs effets sur la quantité de structures du réseau canadien et plus particulièrement québécois. Les conditions environnementales, sociales, politiques, le développement du trafic routier ont servi de catalyseur pour la recherche et ont permis de façonner le paysage d'infrastructures tout au long du siècle.

Force est de constater que des remplacements de types par d'autres ont ainsi eu lieu de façon assez naturelle et ce sont ces démarches de remplacement qui vont particulièrement nous intéresser dans ce mémoire. Néanmoins, aucune littérature liée à de quelconques directives officielles n'ont pu être mises en exergue ; il semblerait que les décisions de construction dans un type plutôt qu'un autre relevaient directement des services de constructions municipaux ou régionaux selon des manuels de conduite de construction nationaux et des aptitudes, connaissances et expertises des ingénieurs y travaillant. Très peu voire aucune documentation (à l'exception du Code Canadien de la Construction ou du Québec) relative à une homogénéisation nationale des directives de construction dans certains types ou de remplacements de certains types par d'autres n'a pu être étudiée. Chaque situation de construction est unique et de l'analyse des responsables découleront des décisions de constructions. Des analyses de cycle de vie et des études coûts-bénéfices sont donc régulièrement menées au cas par cas afin d'accompagner les décideurs publics dans l'établissement de leurs plans d'investissement en infrastructures.

La recherche sur les problématiques liées aux structures progresse de jour en jour comme en témoignent par exemple les multiples participations de chercheurs et de professionnels au Colloque annuel sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art ⁴. Organisée chaque année par le Ministère des Transports et les universités de Laval, de Sherbrooke, l'École de Technologie Supérieure (ÉTS) et l'École Polytechnique de Montréal, elle vise à réunir des experts de la recherche sur les ouvrages d'art et les professionnels du domaine. De nombreux axes de recherche sont ainsi développés et visent à répondre de façon innovante aux problématiques techniques liées aux matériaux, à l'inspection, à la conception mais également à la bonne gestion du réseau d'infrastructures québécoises. Ce sont ces problématiques d'innovation que nous allons ainsi mettre en exergue dans la section suivante.

4. Lien : https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/ministere/role_ministere/colloques-congres-conferences/colloques-ouvrages-art/Pages/Colloque-progression-ouvrages-art.aspx

1.2.2 Les enjeux de l'innovation pour la construction publique

Ce colloque est un exemple particulièrement édifiant de la collaboration entre universités et autorité publique ; les axes engagés sont ainsi en concordance avec les problématiques rencontrées par le Ministère et développées dans le MTQ (2019b). Pour la 26ème édition qui a eu lieu à Québec le 7 et 8 mai 2019, le maintien de l'offre d'infrastructures est abordé au travers des thématiques « Gestion des Infrastructures », « Réparation et réhabilitation », « Inspection-Instrumentation-Auscultation » d'une part tandis que la bonification de l'offre de service l'est principalement via la thématique « Conception et construction ». Des thématiques croisent les deux approches : celle des « Matériaux » et de « Modèle numérique-sismique ». Étant donné que les dépenses et les objectifs premiers du Ministère sont pour l'instant tournés vers le maintien de l'offre d'infrastructures, nous avons choisi d'étudier la littérature principalement pour cet axe ci en les décrivant au travers de deux des trois développements proposés par Beaulieu *et al.* (2017), à savoir la gestion du parc d'infrastructures et l'ambition d'augmenter la durée de vie des structures.

Gestion du parc d'infrastructures La gestion du parc d'infrastructures est une problématique cruciale de la mise en oeuvre d'un plan d'investissements efficace. En effet, comme nous allons le discuter au travers de ce mémoire, avoir des données mises à jour et fiables est loin d'être évident. Le recueil de données d'état de structures en particulier peut être très compliqué à obtenir ; le soucis des effectifs d'employés pour effectuer les inspections est bien évidemment à prendre en compte mais l'une des difficulté est de ne pas abîmer la structure pendant la détection de fissures ou de corrosion (Rivard, 2019). Comme le rappelle Conciatori et Keserle (2018), la situation environnementale et climatique québécoise particulièrement rude entraîne des coûts extrêmement élevés en Amérique du Nord à cause de la détérioration des structures. Plusieurs modèles se proposent ainsi d'estimer ou de déterminer la durée de vie restante d'une structure depuis les conditions climatiques dans lesquelles elles se trouvent en prenant en considération vitesse du vent, précipitations, etc. D'autres favorisent des méthodes probabilistes comme celle de Guizani *et al.* (2018) et tentent, par exemple, d'estimer les fiabilités de ponts isolés à leur base dans ces mêmes conditions. L'analyse d'images est également une méthode d'approche non destructive de compréhension du comportement des structures lors de leur endommagement (Tremblay, 2019). D'autres chercheurs comme Anterrieu (2019) conçoivent que le recueil de données sur certaines variables (ici la vitesse de corrosion) soient particulièrement chronophages et compliquées à mettre en oeuvre (dans ce cas, la prise de mesure de données est réalisée point par point) et ne peuvent pas être employées de façon systématiques. Il insiste sur le fait qu'elles devraient être croisées avec des résultats d'analyses

effectuées en laboratoire et que, ce faisant, il serait possible à l'aide de méthodes d'intelligence artificielle par apprentissage supervisé et de simulation séquentielle bayésienne, de prévoir l'état global de la structure. Des approches similaires comme celle de Goulet (2018) tentent par apprentissage automatique d'extraire des connaissances sur la vitesse de dégradation via les bases de données d'inspection des ouvrages d'art. Cet indicateur permettrait alors de prédire la durée de vie de la structure.

Toutes ces approches techniques ou probabilistes ont pour objectif de recueillir, de quantifier, d'évaluer et d'analyser des données sur l'état d'endommagement des structures du réseau québécois. La visée finale de ce recueil est que l'information serve directement aux décideurs publics dans la prévision de leur agenda de rénovations, de réhabilitations, de remplacements et donc, d'investissement public (Conciatori, 2019). Si ces techniques permettent un recueil de données en temps réel ou sur une période de temps régulière relativement courte (de l'ordre du mois), un historique de certains indicateurs de dégradation peut donc également être mis en place et des approches prédictives statistiques ou économétriques (par séries temporelles par exemple) peuvent être employées. Marmoux (2016) a mis en avant dans ses travaux la nécessité d'une telle démarche pour la bonne gestion et la bonne prévision des investissements en infrastructures via la variable d'ICG donnée par le MTQ. Cette approche probabiliste mettait en jeu des données fixées dans le temps, principalement des caractéristiques dimensionnelles ou de localisation de la structure pour prévoir la valeur de cet indicateur et donc l'état de la structure. Certaines méthodes utilisent des approches statistiques plus poussées comme modèles bayésiens linéaires dynamiques (BDLM) qui permettent d'analyser des séries temporelles afin de prévoir le comportement futur de la variable mais qui vont encore plus loin en étant capable de détecter les changements de comportements de la série temporelle étudiée. Ce logiciel présenté par Goulet (2019) permet ainsi dans le cadre des ouvrages d'art au Québec, de prévoir l'évolution de l'état de la structure dans le temps (à court, moyen ou long terme) tout en détectant les changements de régime de l'endommagement, reflets d'une possible anomalie.

Ainsi, ce genre d'exemples de méthodes de prédiction de l'état d'une infrastructure, même si elles ne permettent pas toujours de percevoir d'où vient précisément le problème de l'aggravation de l'état, permettent au moins, dans une certaine mesure, de fournir des outils prévisionnels aux décideurs publics qui leur permettront de mieux gérer leur parc d'infrastructures et par la même occasion, d'investir en conséquence de manière plus informée. Il est évident que bien que ces méthodes aient une application de gestion prévisionnelle indéniable, la recherche plus technique sur les matériaux ou les méthodes de conception, de construction, de réparation, de réhabilitation permettent de donner le pas à ces informations

en donnant aux décideurs publics des moyens techniques de résorption des problèmes diagnostiqués.

Recherche technique L’une des solutions évidente à la réduction du déficit de maintien d’actifs est de faire en sorte que les structures aient une durée de vie plus élevée. Les coûts d’entretien, de rénovation, de réhabilitation et autres seraient ainsi réduits et, à l’instar de Fleming pour l’Intercolonial, le coût total de ces structures serait inférieur à celui de structures de durabilité plus faible. Marchand (2019) et Beaulieu *et al.* (2017) rejoignent par exemple la vision du Ministère (MTQ, 2019b) en mettant en avant les objectifs d’atteindre une durée de vie de 100 ans pour les futures structures.

La recherche sur les matériaux et leur durabilité évolue donc de plus en plus en ce sens avec la mise en place de certains projets pilotes comme le projet de construction de la passerelle Isabey-Darnley à Montréal entièrement construite en Béton Fibré à Ultra Hautes Performances (BFUP), une première au Canada (Beaulieu *et al.*, 2017). Nous discuterons plus en détail de ce projet, qui est à l’origine de la démarche générale de ce mémoire, dans la section suivante. Le BFUP est un matériau qui offre une grande résistance en compression ainsi qu’une durabilité élevée et commence à se démocratiser au Québec et dans le monde (Doiron, 2016). Ses propriétés mécaniques permettent d’améliorer la performance globale de réparations et Maltais *et al.* (2018) montre dans le cadre d’une étude de réparation de murs d’écluses pour la Voie maritime du Saint-Laurent, que le BFUP peut supporter efficacement les impacts de navires. Son emploi de plus en plus fréquent conduit les instances de régulation à introduire des règles concernant son utilisation (Massicotte, 2018) et pose la question plus large du bon encadrement de l’emploi de matériaux nouveaux ou innovants. En effet, l’emploi d’un matériau dont les propriétés mécaniques ne sont pas encore parfaitement bien comprises ou dont la mise en place sous certaines conditions n’est pas encore bien maîtrisée peut créer des risques. Ainsi, l’engouement pour les découvertes mécaniques fortes d’un matériau et son développement rapide ne doivent pas prendre le pas sur la sécurité des utilisateurs de la structure. La mise en place de normes pour des pratiques innovantes est donc une étape cruciale du bon développement de ces méthodes par la suite. Le BFUP est l’un des matériaux innovants les plus prometteurs et les plus utilisés mais de nombreux autres formes de béton ont vu le jour cette dernière décennie et la recherche creuse en ce sens. On peut ainsi penser aux bétons cicatrisants (Lauch, 2019) ou à des méthodes plus inscrites dans des démarches durables comme l’éco-ciment (Muhammad Shoaib, 2019). On peut également apprécier un retour à l’étude de certains matériaux déjà bien connus comme l’aluminium ; ainsi, bien qu’il soit plus cher que le béton ou le bois, l’aluminium pourrait en fait se révéler être un matériau

plus rentable sur le long terme étant donné que les structures ont une plus longue durabilité (Conciatori et Fafard, 2019).

Nous l'avons vu, la recherche avance également au Québec sur le plan technique, de façon pragmatique et en adéquation avec les besoins du réseau d'infrastructures québécois. De nouvelles innovations voient constamment le jour avec de nombreux projets pilotes qui permettent de corroborer ou d'infirmer les résultats de laboratoire. Nous allons nous attarder dans la section suivante sur l'un d'entre-eux, celui de la passerelle Isabey-Darnley à Montréal, qui a le profil d'un cas d'étude idéal.

1.3 Mise en contexte : la situation des passerelles Barr et Isabey-Darnley

Ainsi, comme nous l'avons vu, l'innovation dans les marchés publics en construction est primordiale et ce, particulièrement au Québec où les conditions climatiques peuvent être très agressives. Les structures sont alors très sollicitées et leur entretien et conservation peut alors tenir du challenge technique. La durabilité prend alors une importance notoire et la recherche sur les matériaux, un sens particulier. Construire dans un matériau plus innovant entraîne généralement un coût de construction initial conséquent mais le coût total d'une structure ne se limite pas seulement à ceux de sa simple construction. Les différents coûts d'entretien au cours de sa durée de vie sont également à considérer et ils deviennent de plus en plus important à mesure que la structure vieillit. Construire dans un matériau plus durable, plus résistant aux sollicitations extérieures devient un enjeu primordial pour les autorités publiques leur permettant de réduire leur fréquence d'inspection et d'intervention sur les structures et par conséquent les coûts croissants associés (Marchand, 2019). Comme nous l'avons mentionné précédemment, pour une meilleure gestion du parc d'infrastructures, le suivi de l'état des structures est primordial et doit être régulièrement mis à jour au travers des différentes bases de données et par l'établissement de rapports d'études et d'analyses croisés.

C'est dans cette situation et ces problématiques que le projet des passerelles Barr et Isabey-Darnley a vu le jour. Considérée comme l'une des structures les plus à risque de la Ville de Montréal, la passerelle Isabey construite en 1967 est en 2015 dans un état particulièrement délétère (Charron et Cantin Bellemare, 2017). La passerelle piétonne empruntée par plus de 430 personnes quotidiennement (Maillard et Michaud, 2009) sera remplacée en 2016. Quelques années auparavant, la Ville de Montréal avait alors décidé de lancer un projet pilote avec une équipe de chercheurs de Polytechnique Montréal afin de mettre au point des éléments préfabriqués en béton fibré pour les ponts et c'est la passerelle Isabey-Darnley qui a été sélectionnée pour en faire partie. Ce sont huit ans de recherche dans ce domaine qui vont être mis en application. Ce projet souligne la volonté des autorités publiques de travailler conjointement avec les

acteurs de la recherche et de considérer sérieusement l'intégration des nouveaux résultats de la recherche scientifique dans la réalité civile. Il est à noter que projet est d'autant plus important que la passerelle Isabey-Darnley devient la seconde passerelle à être construite en BFUP au Québec presque vingt ans après la première passerelle construite à Sherbrooke en 1997 (Denoël *et al.*, 2013) ouvrant possiblement la voie à une nouvelle méthode de construction plus durable.

En 2014, la passerelle Barr, initialement construite en 1971 et surplombant le même autoroute A-520 que la passerelle Isabey-Darnley, est démolie. Elle était dans le même état critique que passerelle Isabey-Darnley et également en fin de vie utile. Il est décidé que le lien piéton que constitue cette passerelle entre l'arrondissement de Saint-Laurent et la zone industrielle doit être conservé. Le remplacement de cette passerelle a été conçu directement par la Division des ponts et tunnels de la Ville de Montréal, démarche qui n'avait pas été effectuée depuis près de 35 ans par la Ville depuis la construction du pont Galt en 1979. L'appel d'offre est publié à la fin 2014 et la construction commence en 2015 et avec une dalle de tablier en béton armé coulé sur place, une méthode plus "classique" (Thuillier et Laporte, 2015).

Les conditions d'étude sont ainsi idéales : les deux passerelles sont construites au dessus du même autoroute donc subissent une usure due au débit de véhicules journalier moyen annuel similaire (les ingénieurs de la Ville ont procédé à des mesures de vibrations afin de s'en assurer), à une distance l'une de l'autre relativement faible et l'une est construite dans un matériau innovant tandis que l'autre est construite dans un matériau plus classique. Nous sommes donc dans un cas quasi-idéal où la passerelle Barr pourra jouer le rôle de structure de contrôle et la passerelle Isabey-Darnley la structure test. C'est dans cette optique que la Ville de Montréal en partenariat avec le Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton (CRIB) établira un rapport d'analyse économique comparative entre ces deux passerelles dont l'objectif principal consiste à chiffrer les coûts et bénéfices économiques, ainsi que les impacts environnementaux, de la construction d'une passerelle piétonne en BFUP (la passerelle Isabey-Darnley) par rapport à un mode de construction conventionnel. Ce rapport fera l'objet d'un document indépendant et séparé de ce mémoire.

Des hypothèses seront évidemment à poser pour mettre en place cette analyse et notamment sur la durabilité théorique de la passerelle Isabey-Darnley. Étant donné qu'elle est la seconde passerelle mise en oeuvre dans ce mode de construction, peu de données d'observation sur l'évolution de son état au fil du temps n'est disponible et il faudra donc se baser sur les résultats estimés par Charron *et al.* (2018) et Charron et Desmettre (2015) pour fixer les principaux horizons temporels et notamment les dates d'entretiens probables ainsi que de réfections majeures. Pour la passerelle Barr, le mode plus conventionnel permettra de recueillir

des données observées classiquement pour des structures de cette envergure et de ce type. Par ailleurs, étant donné que nous sommes dans le cas d'un projet pilote, le rapport mettra en avant certains points d'améliorations qui pourraient être apportés sur les travaux qui ont été réalisés et par conséquent les réductions de coûts envisageables pour d'autres projets du même type. On peut penser par exemple à des réductions de temps d'installations, des corps d'épreuves coûteux, des contrôles qualités dispendieux, des problématiques liées aux normes du Code Canadien de Construction, des débalancements des prix dans les soumissions, etc ⁵.

C'est le raisonnement même de ce projet d'analyse économique comparative qui a structuré notre approche globale pour ce mémoire. En effet, dans un cas idéal, chaque nouvelle méthode de construction ou emploi de matériau innovant serait comparé à son équivalent dans une méthode contemporaine mais plus classique. On pourrait alors, de façon systématique, réitérer la démarche d'étude et suivre le développement de certaines démarches de construction ou d'emploi de certains matériaux particuliers. Dans la pratique, il est évidemment délicat de trouver les moments de basculement d'un type particulier à un autre dans le temps mais on peut être capable d'observer sur une période de temps similaire une coexistence d'un type que l'on peut considérer comme "ancien" et d'un type "innovant" et ainsi étudier d'une part leur évolution dans le temps (à savoir est que le type innovant va remplacer le type plus ancien ou vont-ils continuer à coexister?) et leur effet sur l'état général des structures (est-ce qu'une structure construite dans un type plus innovant va avoir un effet plus positif sur l'état final de la structure observable aujourd'hui ou non?).

De manière plus large, ce projet est le reflet d'une démarche qu'il serait bon de réitérer de façon systématique lors de projets pilotes. Il permettrait de mettre en place des cas idéaux d'étude qui serviraient d'exemple par la suite pour d'autres décisions de construction au Québec.

1.4 Objectifs et démarche

Ce mémoire s'inscrit dans la lignée des précédentes études et des différents mémoires sur l'état des infrastructures au Québec. Sa particularité réside dans le fait que l'on essaie de mettre en exergue comment les démarches d'innovations mises en œuvre au cours du XXème siècle ont modifié le réseau québécois et en particulier quel a été leur impact sur l'état des infrastructures qui le composent.

En utilisant les bases de données à notre disposition par l'intermédiaire du Ministère des Transports, l'un des objectifs est donc de dresser un portrait de l'état des infrastructures du

5. Pour une analyse de risques, voir Beaulieu *et al.* (2017)

réseau québécois au travers de l'étude de l'Indicateur de Condition Générale (ICG) mis en place par le Ministère. Le détail sur la construction de notre base de données sera donné au Chapitre 2.

L'une des particularité de ce mémoire est donc de baser notre étude sur les observations de ces bases de données afin d'établir des liens causaux au travers de méthodes statistiques et économétriques développées au Chapitre 3, classiquement utilisées en sciences sociales, sciences politiques ou en évaluation de politiques publiques et qui nous permettraient de mettre en évidence certaines tendances, notamment d'établir quels sont les facteurs explicatifs de la condition d'une structure.

D'autre part, au travers des bases de données, nous allons nous intéresser aux structures remplacées de manière descriptive d'abord puis d'essayer d'établir un modèle explicatif du remplacement d'une structure par une structure d'un autre type (que l'on caractérisera par le terme de structure "innovante").

L'un des intérêt de ce mémoire réside en particulier dans l'approche causale qui vient croiser les facteurs explicatifs de l'état des structures et le modèle explicatif du remplacement d'une structure par une structure "innovante". Autrement dit, dans quelle mesure remplacer une structure par une structure d'un autre type ou d'un type nouveau affecte-t-il l'état de ces structures? Les méthodes employées dans ce cadre du domaine de la construction et des infrastructures au Québec n'ont, à notre connaissance au moment de la rédaction, encore jamais été employées. Elles nous permettront particulièrement de mettre en place des groupes qui seront à même de comparer des structures semblables vis-à-vis de certains critères déterminés et donc, plus largement, de comparer des structures réellement comparables entre elles. L'objectif est de rejoindre à plus grande échelle le raisonnement mené pour la comparaison des passerelles Barr et Isabey-Darnley, à savoir comparer deux structures similaires, l'une dans un matériau de contrôle (de référence), l'autre dans un matériau ou un type "innovant" (ou autre de façon plus large).

Nous nous affairerons également à l'étude de certains types de structures particuliers et de leurs remplacements afin de venir préciser et nuancer les résultats généraux avancés. Ce mémoire a donc une vocation triple de description non plus seulement de l'état des infrastructures québécoises mais également du sous-groupe de structures remplaçantes et remplacées d'une part, de modélisation de l'état des infrastructures au travers de l'ICG et de la décision d'innover d'autre part et enfin d'estimation d'inférence causale entre cette décision et l'état final de l'infrastructure.

Nous concluons en synthétisant nos résultats et en discutant des limites et ouvertures de notre approche au Chapitre 5.

CHAPITRE 2 LES DONNÉES

La construction d’une base de données unique s’est déroulée autour de 3 étapes : la récupération d’une base de données recensant toutes les structures du Ministère des Transports du Québec, une autre (non exhaustive) recensant les structures ayant été remplacées depuis les années 1990 et une dernière liée directement à l’Indice de Condition Générale (ICG). Nous allons décrire les processus de récupération, d’agrégation et d’épuration de ces bases de données. L’attention particulière portée à ce chapitre tient en partie aux complexités rencontrées dans la construction ou la récupération de ces bases de données et en particulier pour les rendre exploitables.

2.1 La base de données du Ministère des Transports du Québec (MTQ)

La base de données du Ministère des Transports (MTQ) disponible à l’adresse suivante : <https://www.donneesquebec.ca/recherche/fr/dataset/structure> sous format .CSV est mise à jour de façon régulière par la Direction de la Géomatique du Ministère.

2.1.1 Format général de la base de données

La base de données téléchargée contient 13 754 observations¹ relatives à toutes les structures construites par le MTQ depuis leur volonté de recensement. Chaque ligne représente ainsi une construction effective encore en place au Québec. De nombreuses structures ainsi très anciennes sont ainsi présentées allant de 1800 à nos jours selon 35 variables différentes.

Pour 1532 d’entre elles, nous ne disposons pas de l’année de construction. Cette information étant primordiale pour le reste de l’étude, nous nous permettrons par la suite de ne pas les considérer dans la base de données, amenant le nombre d’observations utiles à 12 222. Les variables de cette base de données sont présentées au Tableau 2.1 et leur utilité et pertinence pour notre étude sera discutée dans les prochaines sections.

1. Base téléchargée à la date du 1er mai 2019. La base est actualisée en continue par des employés de la Direction de la Géomatique du MTQ.

Tableau 2.1 Variables de la base de données du MTQ

Variable	Description
<i>ide_strct</i>	Identifiant de la structure
<i>num_dossr</i>	Numéro de dossier de la structure
<i>val_annee</i>	Année de construction
<i>code_des_s</i>	Statut inventaire
<i>nom_route</i>	Nom de la route
<i>nom_obstc</i>	Nom de l'obstacle
<i>muncp_strc</i>	Identifiant de la municipalité
<i>ide_muncp</i>	Identifiant de la municipalité principale
<i>des_cs</i>	Nom du Centre de services
<i>code_des_t</i>	Code - Description du type de structure
<i>nom_strct</i>	Nom de la structure
<i>rte_ind_pr</i>	Indicateur de route principale
<i>num_route</i>	Numéro de route
<i>num_tronc</i>	Numéro de tronçon
<i>num_sectn</i>	Numéro de section
<i>num_sr</i>	Sous-route
<i>num_rts</i>	RTSS (Route/Tronçon/Section/Sous-route)
<i>nbr_voie</i>	Nombre de voies
<i>val_chang</i>	Chaînage de début
<i>val_chan00</i>	Chaînage de fin
<i>cod_type_r</i>	Code de type de responsable
<i>geo_coord</i>	Coordonnée X
<i>geo_coor00</i>	Coordonnée Y
<i>geo_lattd</i>	Latitude
<i>geo_longt</i>	Longitude
<i>val_longr</i>	Longueur (mm)
<i>cod_type_s</i>	Code type statut inventaire
<i>cod_type00</i>	Code de type de structure
<i>cod_type_e</i>	Code type emplacement (mur)
<i>ind_strct</i>	Indicateur déficient état
<i>ind_strc00</i>	Indicateur déficient fonctionnalité
<i>dirct_gen</i>	Numéro du Sous-ministériat (ancienne DG)
<i>dirct_terr</i>	Numéro de la Direction Générale Territoriale (ancienne DT)
<i>dirct_te00</i>	Nom de la Direction générale territoriale (ancienne DT)

Les catégories de structures

Le Tableau 2.2 présente la répartition des catégories de structures en fonction du nombre d'observations recensées. Sans surprise, plus de la moitié des observations sont des ponts (57%), suivent les ponceaux (21%) puis les portiques (9%), les murs (8%) et, de façon bien plus anecdotique, les stations de pompage et les tunnels ($< 1\%$).

Tableau 2.2 Répartition des catégories de structures en fonction de leur présence dans la base de données

Catégorie de structure	Nombre d'observations	Proportion de la base de données (%)
Ponceaux	3194	23,22
Ponts	8209	56,94
Portiques	1244	9,04
Murs	1056	7,68
Tunnels	12	0,09
Stations de pompage	39	0,28
Total	13 754	100

Nous allons limiter notre étude aux infrastructures à proprement parler, c'est-à-dire, aux ponts, ponceaux et portiques. Les murs, tunnels et stations de pompage sont abandonnés pour plusieurs raisons :

- Ils ne sont pas régis par les mêmes processus d'inspection ;
- La part qu'ils représentent en terme d'investissements de la part du Ministère des Transports est négligeable par rapport aux trois autres catégories, particulièrement dans les proportions relevées ;
- On peut facilement supposer qu'ils ne s'usent pas de la même façon qu'une structure de type pont ;
- On ne pourra pas effectuer d'étude de remplacement sur ces structures.

Des détails plus spécifiques sur les types particuliers de ponts et ponceaux seront donnés en Statistiques descriptives au Chapitre 4.

Les matériaux utilisés

La Figure 2.1 nous donne la proportion de matériaux utilisés pour la construction des structures du Ministère des Transports. Le béton armé est le matériau le plus utilisé (44%) suivi de l'acier (21%) et du couple acier-bois (20%). Le béton précontraint est également très utilisé (11%) tandis que l'utilisation du bois, de l'acier enrobé de béton ou des "Autres" recensant des matériaux plus exotiques comme le polyéthylène par exemple reste anecdotique.

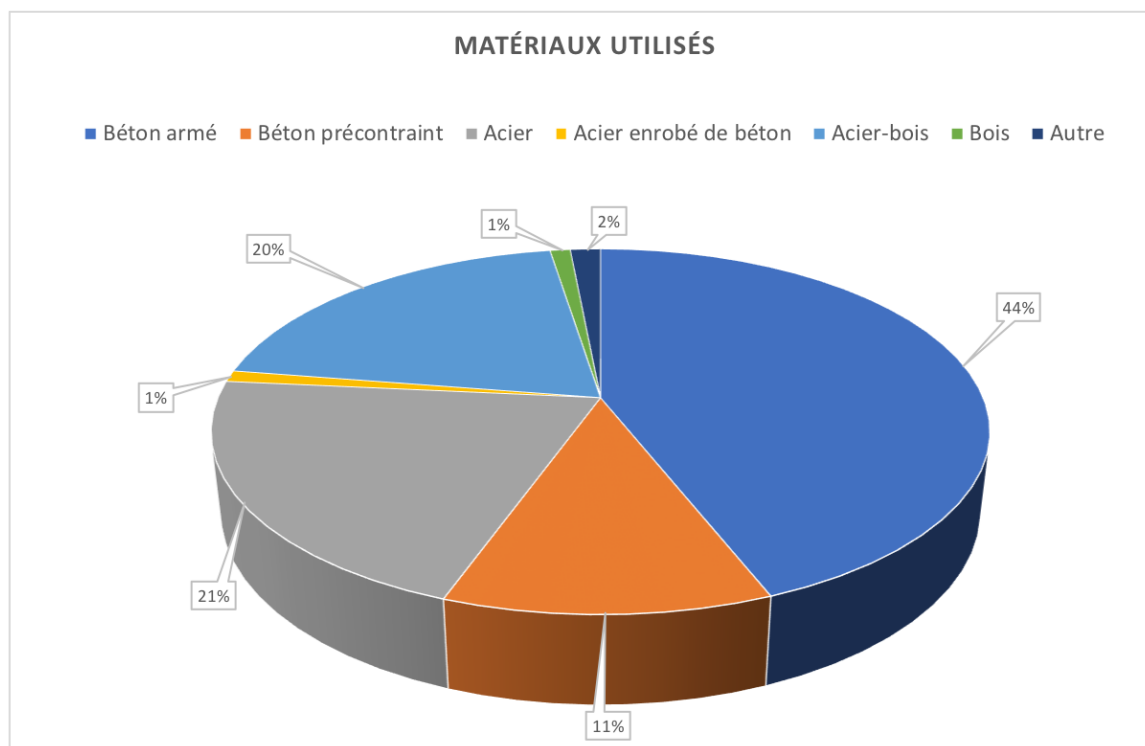


Figure 2.1 Répartition des matériaux utilisés dans la construction des structures

Par la suite, nous nous efforcerons de décrire plus en détail les structures en fonction de leur types via la variable *code_des_t* du type de structure² qui est présenté sous la forme d'un couple "Code - Catégorie de structure + matériau" (par exemple "44 - Pont à poutres en acier").

Les Directions Territoriales

Parmi les informations nous disposons dans cette base de données figure le rattachement à une Direction Territoriale (DT) particulière au travers des variables *dirct_terr* (Nom de la

2. Afin de faciliter la reprise de la base de données par le lecteur ou une personne tierce, nous conserverons le format de dénomination des variables comme il est présenté dans la base de données du MTQ

Direction Territoriale par exemple "Abitibi-Témiscamingue") et *dirct_te00* (Code associé à la Direction Territoriale par exemple 89 pour l'Outaouais). Elles sont représentées par le Tableau 2.3.

Tableau 2.3 Répartition des fréquences d'observation par direction territoriale

Direction Territoriale	Fréquence	Pourcentage (%)
Abitibi Témiscamingue	645	4,69
Estrie	1374	9,99
Outaouais	733	5,33
Région de Montréal	1916	13,93
Capitale Nationale	968	7,04
Chaudière-Appalaches	1487	10,81
Côte-Nord	538	3,91
Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine	598	4,35
Mauricie	545	3,96
Montréal	934	6,79
Laurentide-Lanaudière	1296	9,42
Bas Saint-Laurent	1072	7,79
Centre-du-Québec	697	5,07
Saguenay-Lac-St-Jean-Chibougamau	698	5,07
Concession 125 S.E.C	22	0,16
Nouvelle Autoroute 30 S.E.N.C	143	1,04
Transport maritime, aérien et ferroviaire	86	0,63
Exploitation aéroportuaire	2	0,01

On peut ainsi recenser initialement quelques 18 Directions Territoriales au travers du Québec dont 4 sur lesquelles nous allons nous attarder :

- Direction générale du transport maritime, aérien et ferroviaire ;
- Nouvelle Autoroute 30 S.E.N.C. ³ ;
- Direction générale de l'exploitation aéroportuaire ;
- Concession A25 S.E.C. ⁴

Ces directions territoriales particulières seront abandonnées car elles concernent des types très particuliers de projets gérés par le Ministère, notamment pour la Direction Générale du Transport maritime, aérien et ferroviaire ainsi que la Direction générale de l'exploitation aéroportuaire. D'autre part, peu d'observations sont réellement relevées pour la DT associée à la construction de l'autoroute A25 à Laval ou la nouvelle Autoroute 30. Ces DT sont des DT

3. Société en nom collectif.

4. Société en commandite.

de projets et seront abandonnées dès lors que les projets de construction seront effectivement terminés et leurs observations seront basculées dans les DT auxquelles elles appartiennent réellement géographiquement. Nous allons donc décider d'écarter ces observations de notre étude par la suite. Une carte des DT proposée par la Direction de la Géomatique du Ministère est présentée en Figure 2.2. Nous pouvons constater certaines différences et appariements avec le Tableau 2.3.

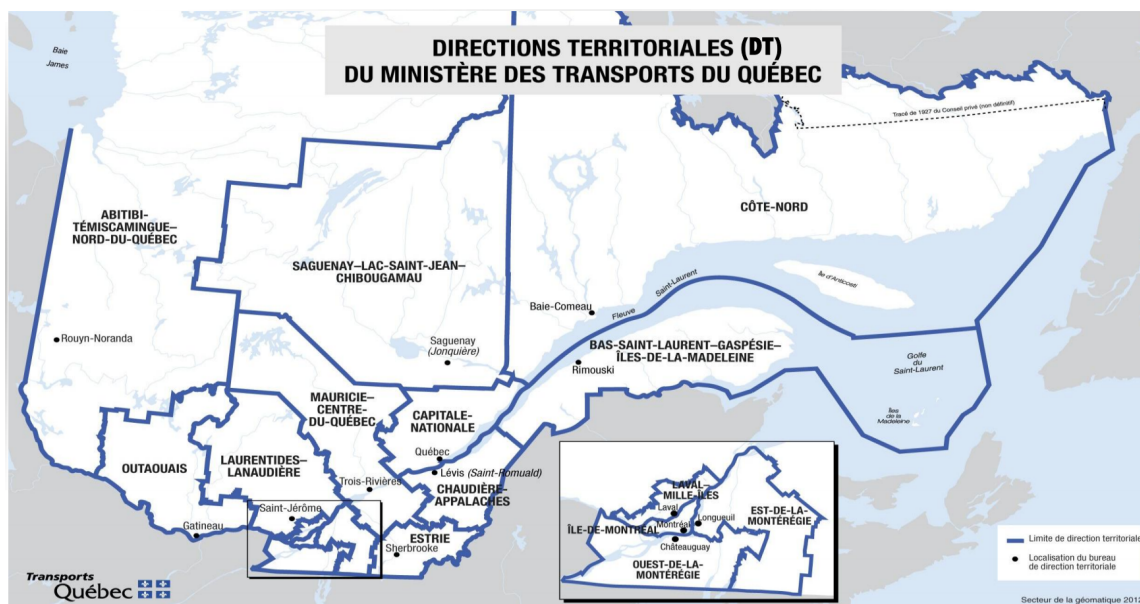


Figure 2.2 Carte des directions territoriales du Ministère des Transports du Québec

Ainsi, l'Ouest et l'Est-de-la-Montérégie sont présentés comme la Montérégie dans la base de données tandis que la Direction Mauricie-Centre-du-Québec est, elle, séparée en Mauricie d'une part et Centre du Québec d'autre part. Il en va de même pour le Bas-Saint-Laurent et la Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine. Un cas de séparation un peu plus délicat est celui de l'Abitibi-Témiscamingue-Nord-du-Québec ; nous retrouvons en effet l'Abitibi-Témiscamingue comme Direction Territoriale dans la base de données mais le Nord-du-Québec n'apparaît pas comme l'une d'entre elles. Il s'avère en réalité qu'une réorganisation des directions territoriales a eu lieu en février 2019 attribuant ainsi les structures précédemment associées à la direction territoriale "Nord-du-Québec" à la Direction Territoriale de l'Abitibi-Témiscamingue.

On constate donc que la DT qui recense le plus de structures est la Direction Générale de l'exploitation du réseau métropolitain, qui correspond en fait à la zone du Grand Montréal (13,93%). Viennent ensuite les DT de Chaudière-Appalaches (10,81%), de l'Estrie (9,99%), des Laurentides-Lanaudière (9,42%) et celle du Bas-Saint-Laurent (7,79%).

Les autres DT recensent à peu près le même nombre de structures ce qui correspond à environ 5% à chaque fois du nombre total de structures.

2.1.2 Détail des variables

La base de données brute est présentée selon les 35 variables répertoriées au Tableau 2.1. Nous allons, dans cette partie, nous efforcer de les présenter et de discuter de leur pertinence dans notre étude.

Présentation rapide des variables

Après un premier coup d’œil, il paraît évident que certaines variables seront indispensables pour notre étude. On peut particulièrement penser aux variables qui identifient de façon unique nos structures comme *ide_strct*, *num_dossr* ou *nom_strct* et qui vont nous permettre de les repérer aisément dans la base de données.

D’autres variables vont s’attarder sur des caractéristiques intéressantes de la structure et viennent nous en apporter quelques précisions comme *val_annee* qui nous permettra de déduire l’âge de la structure, *code_des_t* qui viendra nous apporter des précision sur le type exact de structure (sa catégorie, le matériau principal dans laquelle elle est construite et le code associé), *nbr_voie* qui vient nous donner le nombre de voies sous la structure et ainsi une idée du débit journalier auquel peut être confrontée la structure, les variables géographiques de localisation *geo_lattd* et *geo_longt* (latitude et longitude), *val_longr* et *val_largr* qui nous donnent une idée des dimensions de la structure et enfin *dirct_terr* qui nous précisent la Direction Territoriale à laquelle elle est rattachée.

Discussion sur les variables exploitables retenues

Variables liées à la localisation et à la Direction Territoriale : On peut déjà constater quelques redondances possibles. On peut par exemple en effet juger que l’appartenance à une Direction Territoriale particulière est un indicateur géographique suffisant pour notre étude et ainsi écarter les quatre variables de localisation précises. La pertinence de cette démarche peut être débattue en considérant que le climat a un impact non négligeable sur l’état des structures et donc par conséquent sur leur Indice de Condition Général (ICG) et sur leur probabilité d’être remplacée. Cette thématique des différences de zones climatiques au Québec et leur impact sur la condition des structures a été approchée par Marmoux (2016)

via une littérature consistante⁵ et ses résultats statistiques tendent à montrer que le climat n'a pas un rôle significatif sur la détérioration des structures. Cela semble être dû au fait que les décisionnaires publics sont bien conscients des problèmes liés au climat de leur zone locale et adaptent leur approche d'inspection et d'entretien en fonction. Néanmoins, on contrôlera pour la localisation de la structure via les variables de latitude et longitude.

De la même façon, s'attarder aux municipalités via les variables *muncp_strc* et *ide_muncp* sera considéré comme une granularité trop précise pour notre étude, les directions territoriales suffisant largement

Variables directement écartables : Certaines variables sont plus simplement inutiles à notre étude comme le statut inventaire *code_des_s* et son code associé *cod_type_s*, (toutes les structures restantes seront considérées comme des actifs terminés), le nom du centre de services *des_cs*, l'indicateur de route principale *nom_route*, les numéros de route *num_route*, de tronçon, de section *num_sectn*, de sous-route *num_sr*, les chaînages *val_chang* et *val_chan00* (corrélés aux dimensions de la structure), les codes liés aux responsables de la structure *cod_type_r* qui ne nous apportent aucune information d'importance, les codes liés aux murs *cod_type_e*, et celui lié au Sous ministériat *dirct_gen*.

Les variables *ind_strct* et *ind_strc00* liées à des indicateurs de déficience ou d'état semblent en premier abord être utiles à notre approche mais ne sont représentées que par des réponses "Oui/Non" sans plus de détail. Elles seront donc également abandonnées.

Variables à transformer : Certaines variables ne sont pas directement exploitables de la sorte et ne nous fournissent pas d'information traitable telle quelle. Il nous faudra créer des variables binaires d'appartenance à une catégorie (type DT, matériau ou catégorie de structure par exemple) ou créer des variables continues (comme l'âge à partir de l'année de construction par exemple).

2.2 La base de données des structures remplacées

La base de données des structures remplacées a été obtenue de la Direction de la Géomatique du MTQ. Ce chiffrer vise à recenser les structures qui, au fil des années, ont été détruites

5. En particulier en utilisant la classification de Litynski et en répartissant les structures par zones climatiques particulières.

puis remplacées. L'historique complet par structure n'existant malheureusement pas, cette démarche a été lancée par la Direction des Structures au cours des dernières années et vise à recenser de façon plus systématique les interventions sur les structures. La base ne débute qu'en 1990 date du plus vieux remplacement de structure recensé. Les interventions les moins récentes étant manquantes, la base demeurera non exhaustive et les données partielles. Elle a l'avantage de néanmoins présenter le type de la structure qui a été remplacée et le type de la nouvelle structure.

Ce document va être crucial dans notre étude parce qu'il nous permettra de créer une variable binaire reliée à la base de données générale du MTQ et exprimant le fait qu'une structure considérée remplace ou non une structure plus ancienne. On pourra également vérifier si la structure remplaçante a été construite dans le même type que la structure remplacée initialement.

2.2.1 Détails de la base de données

La base de données en elle même consiste en un chiffrier envoyé par la Direction de la Géomatique du MTQ et contenant 1656 observations recensées. Comme le montre la Figure 2.3, elle se décompose en deux parties : une première recensant les informations sur la structure actuelle, une autre sur la structure qui a été remplacée par cette structure actuellement en place. Pour chacune de ces structures sont recensées quatre variables :

- L'année de construction *val_annee* ;
- Le code associé au type de la structure *cod_type00* ;
- Le nom du type de la structure *code_des_t* ;
- Le numéro de dossier de la structure *num_dossr* ;

Ces variables vont par la suite être celles qui nous permettront d'associer cette base de données à celle du MTQ. On peut déjà constater que le format de la variable *code_des_t* n'est pas exactement le même que celui de la base de données du MTQ. En effet, cette variable dans la base de données précédente se présente sous la forme "44 - Pont à poutres en acier" et non seulement "Pont à poutres en acier" comme c'est le cas. Des modifications seront donc à effectuer pour pouvoir associer les deux bases correctement. C'est ce que nous verrons dans la partie suivante.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	STRUCTURE ACTUELLE				STRUCTURE REMPLACÉE			
2	val_annee_▼	cod_type00	code_des_t▼	num_dossr▼	cod_type00	code_des_t▼	val_annee_▼	num_dossr▼
3	2019	44	Pont à poutres en acier	17766W	34	Pont à dalle évidée en béton précont.	1965	13240W
4	2019	44	Pont à poutres en acier	18376	52	Pont à poutres en acier enr. de béton	1933	04338
5	2019	44	Pont à poutres en acier	190755	31	Pont à dalle pleine en béton armé	1971	13773S
6	2018	13	Ponceau rectang. en béton armé	18855	15	Ponceau circulaire en acier	1980	12125
7	2018	13	Ponceau rectang. en béton armé	19082	12	Ponceau portique en béton armé	1948	12504
8	2018	13	Ponceau rectang. en béton armé	19112	18	Ponceau arqué en acier	1985	09522
9	2018	13	Ponceau rectang. en béton armé	19158	18	Ponceau arqué en acier	1967	12606
10	2018	13	Ponceau rectang. en béton armé	19385	15	Ponceau circulaire en acier	1977	12777
11	2018	13	Ponceau rectang. en béton armé	19386	15	Ponceau circulaire en acier	1977	12778
12	2018	13	Ponceau rectang. en béton armé	19435	18	Ponceau arqué en acier	1972	10366
13	2018	13	Ponceau rectang. en béton armé	19436	18	Ponceau arqué en acier	1965	12518
14	2018	13	Ponceau rectang. en béton armé	19437	18	Ponceau arqué en acier	1975	16401
15	2018	13	Ponceau rectang. en béton armé	19491	13	Ponceau rectang. en béton armé	1968	16222
16	2018	13	Ponceau rectang. en béton armé	19492	13	Ponceau rectang. en béton armé	1948	16223
17	2018	13	Ponceau rectang. en béton armé	19570	15	Ponceau circulaire en acier	1974	12507
18	2018	13	Ponceau rectang. en béton armé	19591	15	Ponceau circulaire en acier	1965	10925
19	2018	18	Ponceau arqué en acier	18722	18	Ponceau arqué en acier	1960	12865
20	2018	19	Ponceau voûté en béton armé	17728	18	Ponceau arqué en acier	1965	12188
21	2018	31	Pont à dalle pleine en béton armé	19078	44	Pont à poutres en acier	1929	04665
22	2018	35	Portique en béton armé	15946	41	Pont à poutres en béton armé	1935	06995
23	2018	35	Portique en béton armé	17304	31	Pont à dalle pleine en béton armé	1960	09418
24	2018	35	Portique en béton armé	17310	31	Pont à dalle pleine en béton armé	1954	03170
25	2018	35	Portique en béton armé	17602	15	Ponceau circulaire en acier	1974	14102
26	2018	35	Portique en béton armé	17771	45	Pont acier-bois	1948	03094
27	2018	35	Portique en béton armé	18776	18	Ponceau arqué en acier	1970	16317

Figure 2.3 Format de la base de données des structures remplacées

2.2.2 Fusion avec la base de données du MTQ

Comme nous l'avons vu précédemment, des choix dans le nom et la structure des variables devront être effectués. L'élément commun des deux bases de données est la variable correspondant au numéro de dossier de la structure *num_dossr*. Ce numéro unique permettra de fusionner les deux bases de données en venant ajouter les nouvelles variables relatives à la structure remplacée.

Après quelques recherches à tâtons de numéros de dossier dans la base de données du MTQ, nous avons déterminé que seuls les numéros associés aux structures "actuelles" sont recensés dans la base de données du MTQ. Les numéros de dossiers des structures remplacées n'apparaissent pas car elles ne font simplement plus partie du parc de structures du Ministère. Ce sont donc les numéros de dossiers de la structure remplaçante que nous allons utiliser comme clé d'association pour faire fusionner les deux bases de données.

Avant cela nous allons néanmoins renommer les variables relatives aux structures remplacées afin qu'il n'y ait aucun quiproquo avec celles relatives aux structures remplaçantes comme le montre le Tableau 2.4.

Tableau 2.4 Nouvelles appellations des variables relatives aux structures remplacées

Ancienne variable	Nouvelle variable	Description
<i>cod_type00</i>	<i>cod_type_old_struct</i>	Code associé au type de la structure remplacée
<i>code_des_t</i>	<i>code_des_t_old_struct</i>	Nom du type de la structure remplacée
<i>val_annee</i>	<i>val_annee_old_struct</i>	Année de construction de la structure remplacée
<i>num_dossr</i>	<i>num_dossr_old_struct</i>	Numéro de dossier de la structure remplacée

Préalablement à la fusion, et en conformité avec la démarche menée pour la base de données du MTQ, nous allons retirer 20 observations relatives à des murs, amenant cette base de données à 1636 observations effectives. Aucune observation pour station de pompage ou tunnel n'a été recensée. C'est l'aide de la fonction *merge* du logiciel Stata que nous allons effectuer la fusion des deux bases de données en utilisant la variable *num_dossr* comme clé d'appariement.

Les résultats de cette commande sont donnés dans le tableau de la Figure 2.4 :

Result	# of obs.	
not matched	9,716	
from master	9,709	(<code>_merge==1</code>)
from using	7	(<code>_merge==2</code>)
matched	1,629	(<code>_merge==3</code>)

Figure 2.4 Résultats de l'appariement des deux bases de données du MTQ et des structures remplacées

On peut constater que sur les 1636 observations disponibles dans la base de données, 1629 ont eu un appariement réussi (`_merge == 3`). Ainsi, 7 observations n'ont pas été appariées depuis la base de données des structures remplacées (`_merge == 2`) ; elles ont simplement été greffées à la base de données fusionnée, cela signifie que les numéros de dossiers que l'on a essayé d'associer n'ont pas été trouvés dans la base de données des structures du MTQ.

2.3 Base de données relative à l'Indice de Condition Générale (ICG)

Cette base de données a été constituée initialement par Marmoux (2016), étudiant à la maîtrise en Génie Industriel en 2016 dans le cadre de son mémoire. Il a réussi, à l'aide d'un code en Visual Basics (VBA), à constituer une base de données qui recensait les structures dont l'Indice de Condition Générale (ICG) était récupérable depuis le site du MTQ à l'adresse suivante : <https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/projets-infrastructures/structures/Pages/inventaires-structures.aspx>.

Nous allons ainsi reprendre cette base de données afin de travailler dessus et de faire en sorte qu'elle soit utilisable via des variables communes avec les deux précédentes bases.

2.3.1 Présentation rapide de la base de données

La base de données finale présente 19 variables réparties en 9 catégories :

- La catégorie ouvrage recensant le type de pont, les matériaux utilisés et l'âge de la structure ;

- La catégorie obstacle franchi ;
- La catégorie localisation recensant la latitude, longitude et région administrative de la structure ;
- La catégorie relative aux dimensions : longueur, longueur totale, longueur du tablier, largeur hors tout, largeur carrossable, superficie, superficie du tablier, superficie totale, épaisseur du remblai, hauteur moyenne et ouverture totale ;
- La catégorie relative à la chaussée : classe de route, Débit Journalier Moyen Annuel (DJMA), le pourcentage de camions utilisant la structure et le nombre de voies ;
- Le type de climat ;
- Le Parti politique au pouvoir ;
- L'état de la structure via l'ICG.

Comme pour la base de données du MTQ que nous avons créé, les tunnels et les murs sont retirés de cette base ci. Cette base sera donc finalement composée de 4793 observations : 3991 pour les ponts et 802 pour les ponceaux.

2.3.2 Variables exploitables et modifications

Variables pertinentes : Pour notre étude, de nombreuses variables parmi les 19 ne nous sont pas utiles et peuvent être mises de côté. De façon immédiate, nous pouvons écarter la latitude et longitude (redondance avec la base MTQ) ainsi que la classe de route, le pourcentage de camions, le type de climat étant donné qu'elles ne sont pas disponibles pour la base de données du MTQ qui est la base principale qui contient le plus d'observations.

Nous disposons également de la longueur totale, la largeur carrossable ou le débit journalier moyen annuel. Ces variables n'étant disponible uniquement pour les observations provenant de cette base de donnée et pas de la base du MTQ, elles ne seront pas utilisées dans notre étude malgré le rôle que certaines d'entre elles peuvent jouer.

Le type de climat a déjà été discuté en partie 2.1.2 sur les régions administratives et sera écarté de l'étude.

Les variables conservées seront finalement celles qui permettront de faire le pont avec la base de données du MTQ et qui caractérisent physiquement les structures c'est-à-dire le type de pont, les matériaux utilisés, l'âge de la structure (qui sera donc mis à jour en prenant 2019 comme année de référence), la région administrative à laquelle elle appartient, sa longueur

totale, le nombre de voie qu'elle surplombe et le type d'obstacle qu'elle franchit ainsi que, bien évidemment, la variable d'état qu'est l'ICG dont le codage est donné par le Tableau 2.5.

Tableau 2.5 Codage de l'ICG

Valeur de l'ICG	Description
5	Structure ne nécessitant aucune intervention
4	Structure nécessitant des réparations
3	Structure nécessitant des travaux majeurs
2	Structure nécessitant un remplacement
1	Structure dont l'inspection est en cours

Remarque : La base de données ayant été constituée par Bruno Marmoux en 2016, les observations ne dépassent pas 2016.

Modifications à apporter : Comme pour la base de données des structures remplacées, l'affectation avec notre base du MTQ se fera via la variable du *num_dossr* commun aux deux bases. Il nous faudra être extrêmement attentif aux dénominations particulières de toutes les variables ; en effet, le nom de la variable relative au numéro de dossier dans la base de données ICG est décomposé en trois colonnes : *Num_Pont* pour les ponts, *Num_Ponceau* pour les ponceaux et *Num_Mur* pour les murs. On préférera ainsi créer deux onglets séparés relatifs respectivement aux ponts et aux ponceaux (étant donné que les murs ont été écartés de la base) que l'on associera l'un après l'autre à la base de données MTQ en ayant remplacé les noms des variables de numéro de dossiers simplement *num_dossr* à chaque fois dans chaque onglet. Les résultats de la fusion des bases de données sont donnés en Figure 2.5 ci-dessous.

Pour ce faire, il faut faire en sorte que les variables soient décrites exactement de la même façon et des modifications sont à réaliser.

- La variable relative au type de pont et au matériau utilisé, similaire à la *code_des_t* de la BDD du MTQ est ici décrite complètement en minuscule et sans type associé : par exemple "à dalle pleine en béton armé" contre "31 - Pont à dalle pleine en béton armé". Des modifications généralisées par recherche groupée régleront ce problème pour chacun des types. Un autre problème rencontré est celui des types présents dans la BDD ICG mais pas dans celle du MTQ ; ils sont néanmoins très peu nombreux (trois) et ne contiennent à chaque fois que très peu d'observations (moins de cinq) et nous

ferons le choix de les écarter.

- La méthode sera identique pour les DT définies par "Montréal" et non "Direction générale de l'exploitation du réseau métropolitain" par exemple. Des remplacements pour chaque direction territoriale sont donc à effectuer dans cette base de données. Quelques cas particuliers comme la séparation Laurentides et Lanaudière par exemple sont à traiter sous le nom "Direction générale de Laurentides-Lanaudière" ou encore l'affectation de "Direction générale de l'Abitibi-Témiscamingue" pour les structures recensées dans le Nord-du-Québec.
- Les noms généraux des variables sont également à modifier afin qu'elles coïncident avec celles du MTQ.

Result	# of obs.		Result	# of obs.
not matched	7,624		not matched	10,722
from master	7,489 (<i>_merge==1</i>)		from master	10,700 (<i>_merge==1</i>)
from using	135 (<i>_merge==2</i>)		from using	22 (<i>_merge==2</i>)
matched	3,856 (<i>_merge==3</i>)		matched	780 (<i>_merge==3</i>)

Figure 2.5 Résultats des appariements des ponts (a) puis des ponceaux (b) de la base de données ICG à la base de données du MTQ.

Commentaire : 3856 observations relatives aux ponts ont été correctement appareillées par leurs numéros de dossier (*_merge==3*), 135 de ces numéros de dossiers se trouvant dans la base de données ICG et non dans celle du MTQ, ces observations sont venues se concaténer à la base de données du MTQ (*_merge==2*) [a]. 780 ponceaux ont été appareillés correctement et 22 sont venus de la base de données ICG [b]. Toutes les données non appareillées sont des données initialement de la base du MTQ pour lesquelles on ne disposera pas de l'ICG.

2.4 Base de données finale épurée

Plusieurs constats sont à effectuer de cette base de données généralisée :

1. La base de données générale créée par l'assemblage des bases de données des structures remplacées et de l'ICG à celle du MTQ présente un peu moins d'une cinquantaine de variables utiles. On pourra générer à partir de ces variables, en fonction du résultat que

l'on voudra montrer, d'autres variables plus représentatives ou plus utiles pour l'étude. Par exemple, l'appartenance à une direction territoriale particulière par la création d'une variable binaire en fonction du code de la direction territoriale. On effectuera cette démarche particulièrement pour les différents types de structures ;

2. Il s'avère que toutes les structures de la base de données des structures remplacées ne présentaient pas un ICG après appariement. Nous avons donc fait en sorte de palier à ce problème en allant rechercher à la main l'ICG par numéro de dossier de chaque structure remplaçante provenant de la base de données des structures remplacées (un peu plus de 1000 environ) sur le site du MTQ rappelé en Section 2.3 ;
3. Bien que l'on ait fait fusionner les trois bases de données ensemble, la communication entre ces trois bases est limitée. En effet, comme le montre l'Annexe A, les deux informations d'état de la structure qui nous intéressent, à savoir l'ICG et le fait que la structure soit remplacée ou non, ne coïncident pas dans la base de données ; nous n'avons l'ICG que de la structure remplaçante, pas de la structure remplacée. Cela vient du fait que nous n'avons pas d'historique de l'évolution de l'ICG par structure. Il aurait été en effet particulièrement intéressant d'avoir l'ICG des structures qui ont été remplacées au moment où celles-ci ont été remplacées. Or, comme ces structures là ne figurent plus dans la base de données du MTQ, elles sont associées à la structure qui les a remplacées (pour laquelle il est possible que l'on ait l'ICG). Nous discuterons plus amplement des possibilités d'études dans le cas où ces données seraient disponibles au Chapitre 5 de Conclusion ;
4. Cette base de données simplement issue de la fusion contient pour l'instant 13574 observations avant toute démarche de simplification ou d'épuration mentionnée dans les sous-parties précédentes. Ces démarches et l'impact qu'elles ont sur le nombre d'observations sont décrites en Figure 2.6 ;
5. Dans cette base figurent encore des observations de structures en cours d'inspection ou d'analyse ($ICG = 1$), ces structures sont au nombre de 61 et seront retirées dans les analyses qui suivront afin de ne pas biaiser nos observations.

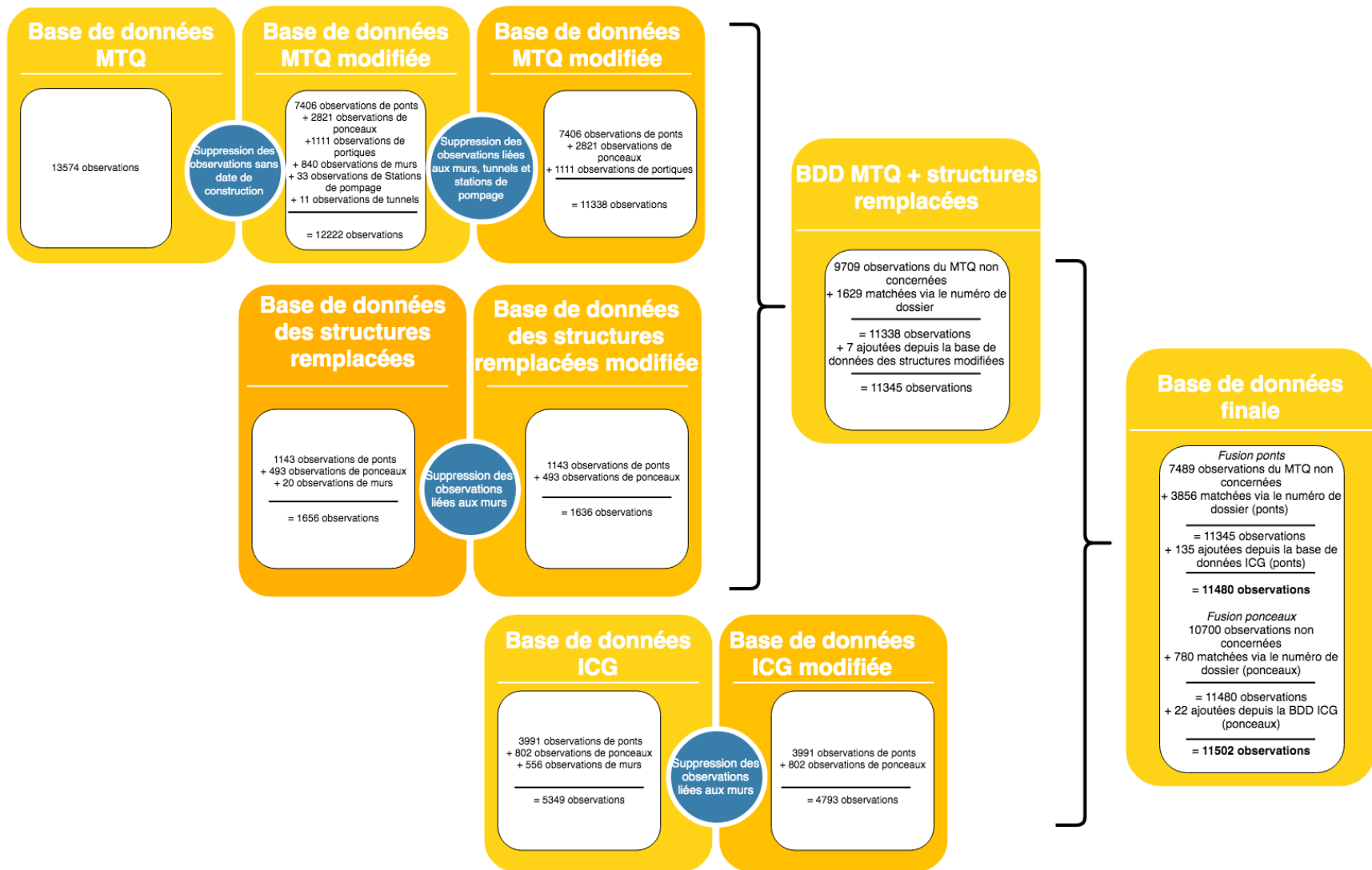


Figure 2.6 Processus de construction de la base de données finale à partir des trois bases du MTQ, des structures remplacées et de l'ICG.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE : MODÉLISATIONS STATISTIQUES ET ÉCONOMÉTRIQUES

3.1 Généralités

Nous allons aborder dans ce chapitre la démarche générale qui va structurer la présentation de nos résultats. Nous allons découper notre approche en trois grands axes :

- Une approche descriptive : principalement statistique, elle viendra décrire les liens entre les différentes variables de notre base de données afin de pouvoir tirer des possibles premières conclusions de surface et de permettre de poser les bases d’une analyse plus précise ;
- Une approche d’analyse : qui viendra évaluer l’influence de variables que l’on peut considérer comme explicatives sur notre réponse. Le but est de mettre en exergue certains facteurs explicatifs de l’ICG d’une part et la probabilité pour la structure d’être remplacée par un type autre que son type initial d’autre part ;
- Une approche causale : basée sur des modèles économétriques d’inférence causale qui nous permettront d’évaluer les effets d’être remplacée par un certain type particulier de structure (action que l’on considérera comme traitement) sur l’état de la structure, à savoir l’ICG.

Deux grands types de modèles peuvent donc être mis en avant : d’une part les modélisations dites explicatives qui vient tester des hypothèses causales effectuées ou annoncées, c’est à dire mettre en avant en quantifiant et estimant le lien d’une ou plusieurs variables $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ sur la variable d’intérêt y ; d’autre part les modélisations prédictives qui, à partir de données, existantes viennent essayer de prédire les valeurs de la variable d’intérêt y en fonction des valeurs disponibles ou passées de x .

Nous avons déjà discuté de la collecte et de la préparation des données dans le Chapitre 2. Dans ce chapitre, nous nous efforcerons de détailler les méthodes statistiques et économétriques qui nous permettront d’établir les liens entre les caractéristiques retenues de nos structures et leur état et probabilité de remplacement.

De façon pratique, le « Guide d’économétrie appliquée pour Stata » de Ouellet (2005) et le manuel d’aide de Stata (StataCorp, 2013) nous ont accompagnés dans la réalisation de nos démarches statistiques et économétriques sur le logiciel Stata.

3.2 Retour sur les fondements de l'analyse de régression

3.2.1 Objectifs généraux

L'objectif de l'analyse de régression est de réussir à expliquer et quantifier l'effet de variables indépendantes x sur la variable que l'on cherche à expliquer y ¹. Cette quantification se fait par la recherche d'une forme fonctionnelle f telle que :

$$y = f(x_1, \dots, x_k, \dots, x_n) + \epsilon \text{ avec } k \in \llbracket 1; n \rrbracket, n \in \mathbb{N}$$

Dans l'exemple très simple et classique à une variable indépendante, on peut par exemple considérer la forme linéaire pour expliquer y :

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \epsilon$$

Ce que l'on cherchera donc à estimer sont les termes β_0 et β_1 afin de trouver la forme fonctionnelle détaillée qui lie la variable dépendante à la variable d'intérêt. Le terme ϵ est l'erreur d'estimation qui prend en compte les erreurs de mesure mais également les variables que l'on a pu omettre dans notre analyse. Le principe de l'analyse de régression repose sur la minimisation de ce terme d'erreur ; on veut un modèle le plus proche de la réalité possible. Afin de minimiser ce terme, dans le cas des régressions linéaires, le principe général suivi est celui des moindres carrés ; on minimise ainsi le terme $(y - \beta_0 - \beta_1 x)^2$.

Le terme d'erreur suit également une loi normale de moyenne nulle, est de variance constante égal à $Var(\epsilon) = \frac{1}{n-2} \sum_i \epsilon_i^2$ et il n'y a, idéalement, pas de corrélation entre les différentes observations du terme d'erreur.

Le raisonnement suivi pour la situation donnée précédemment reste le même lorsque l'on peut reconnaître certaines formes fonctionnelles dites « classiques » ; par exemple une relation $\ln(y) = \beta_0 + \beta_1 x + \epsilon$ dite *log - lin* ou inverse $y = \beta_0 + \beta_1 + \frac{1}{x} + \epsilon$, etc.

1. Les notions et notations de cette section sont inspirées du cours « ENP7011 : Analyse statistique en administration publique » dispensé à l'ÉNAP par Bouchard St-Amant (2018) à l'Automne 2018 et notamment sur les estimateurs et les formules associées à la détermination d'une régression linéaire. Les notes de cours de German (2007) et notamment le Chapitre 2 « Linear Models for Continuous Data » ont également été utilisées comme complément.

3.2.2 Performance d'un modèle

Coefficient de détermination

L'un des coefficients statistiques les plus utilisés est le coefficient de détermination R^2 qui correspond au ratio entre la variance expliquée du modèle (ESS) et la variance totale du modèle (TSS). Ce coefficient permet donc d'expliquer un pourcentage de la variance de la variable dépendante et est donc une représentation d'un modèle plus performant lorsqu'il s'approche de 1. Néanmoins, il évolue avec le nombre de variables explicatives ; on peut donc rendre le R^2 arbitrairement plus élevé en ajoutant des variables, faussant ainsi la véritable part de la variance expliquée par le modèle. Pour mesurer de façon plus juste cette part, on préférera le $R^2_{ajusté}$ défini par :

$$R^2_{ajusté} = 1 - \frac{(1 - R^2)(n - 1)}{n - k - 2},$$

avec k , le nombre de coefficients estimés (incluant la constante)

Ce coefficient vient donc pénaliser l'ajout de variables supplémentaires contrairement au R^2 simple et est donc plus représentatif de la part explicative de la variance du modèle estimé. Néanmoins, c'est à l'analyste de juger de la valeur obtenue en fonction d'autres paramètres statistiques d'autres régressions, des résultats classiquement rencontrés dans la littérature étant donné que la formule reste arbitraire.

Les tests statistiques

De nombreux tests statistiques sont mis en place en fonction de la nature de la régression et consistent à identifier si la valeur spécifiée dans une hypothèse nulle H_0 est plausible du point de vue des estimés obtenus. Si l'on suppose que l'hypothèse nulle est vraie, on peut alors connaître la statistique t de Student définie par :

$$t = \frac{\beta_1^* - \beta_1}{\sqrt{\frac{var(\epsilon)}{(n-1)var(x)}}}$$

L'objectif étant de pouvoir rejeter cette hypothèse nulle H_0 , on peut définir un intervalle de confiance I_c déterminé par une probabilité ou seuil de rejet α que l'on fixera souvent

égale à 5%. Si $t \in I_c$, il sera plausible d'accepter l'hypothèse nulle ; sinon on pourra alors raisonnablement rejeter l'hypothèse nulle.

La statistique t est néanmoins peu commode et reste relativement abstraite. Une information utile peut être récupérée par un autre coefficient ; la *valeur - p* ou *p - value* qui nous donne plutôt la probabilité de conserver l'hypothèse nulle, c'est-à-dire :

$$p = \mathbb{P}(X \notin [-|t|, |t|]) = 1 - \mathbb{P}(X \in [-|t|, |t|])$$

La *p - value* nous donne donc une indication de s'il faut garder ou non l'hypothèse nulle directement en la comparant au seuil critique α . Par exemple, lorsque $p < \alpha = 0,05$, on peut se permettre de rejeter l'hypothèse nulle.

Retour sur les termes d'erreur

Comme mentionné dans les objectifs généraux, nous avons supposé que :

1. $\forall X, \mathbb{E}(\epsilon) = 0$ et $\mathbb{V}(\epsilon) = \sigma^2 = cste$ (pas d'hétéroscédasticité) ;
2. Aucun terme d'erreur ϵ_i n'est corrélé avec un autre ;
3. Les termes d'erreurs sont distribués selon la loi normale.

Ainsi, après avoir effectué nos estimations, nous devons vérifier que ces hypothèses sont bien vérifiées ; c'est l'objectif de l'analyse de résidus. Cette analyse peut se réaliser à l'aide d'un graphique de probabilité normal des ϵ_i ou via un test de normalité comme le test de Shapiro-Wilk. La normalité et l'indépendance des erreurs ne sont néanmoins pas nécessaire pour assurer la convergence dans le cas de la régression linéaire. Dans la pratique, ces hypothèses sont en effet très contraignantes et il n'est pas nécessaire de les vérifier parfaitement pour s'assurer de résultats statistiquement crédibles.

3.2.3 Sélection des variables

L'une des étapes clé est la sélection des variables ou comment faire en sorte de choisir des variables pertinentes et efficaces pour expliquer ma variable dépendante y . On peut, en général, rencontrer deux types de variables : des variables continues qui peuvent prendre toutes les valeurs existant sur un intervalle de réels ou des variables discrètes qui ne peuvent uniquement prendre qu'un nombre défini de valeurs réelles, le plus souvent entières.

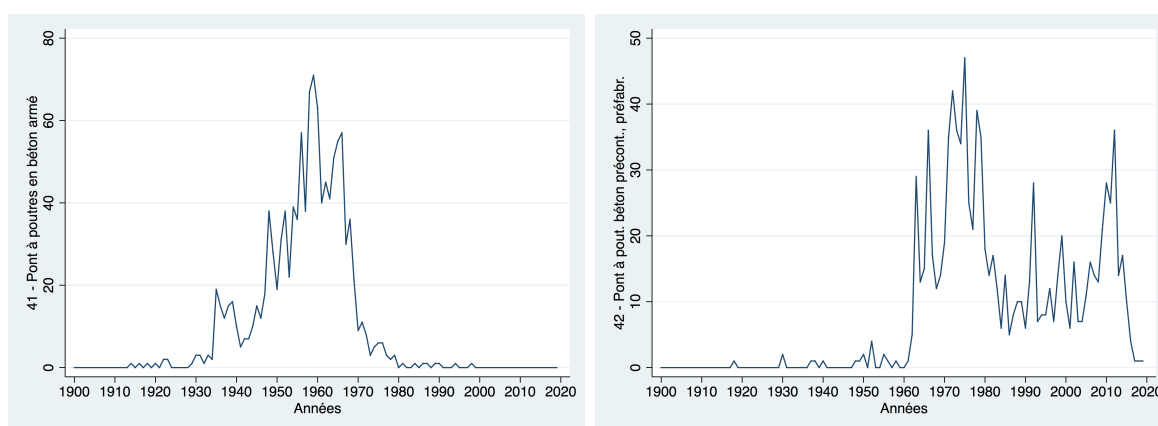
Par exemple, la variable *val_longr* qui donne la taille de la structure est une variable continue qui peut prendre toute valeur réelle en *mm* tandis qu’une variable *sexe* prenant la valeur 1 si l’individu est une femme et 0 si c’est un homme est une variable discrète et, plus précisément, dichotomique. Ce type de variable est particulièrement utile pour décrire une caractéristique sur laquelle on veut appuyer une étude. Dans notre cas par exemple, on peut créer la variable *pont_{acier-bois}* qui prendrait la valeur 1 si la structure considérée est un pont acier-bois et 0 si l’observation est de n’importe quel autre type.

Il faut donc essayer d’établir de façon détaillée quelles variables peuvent être considérées comme essentielles à notre étude ou lesquelles peuvent avoir un rôle particulier sur notre variable de sortie. Cette démarche peut se faire de plusieurs façons :

Par une approche historique ou narrative : L’idée globale est, en utilisant des décisions politiques lancées à des dates connues ou sur des périodes déterminées de pouvoir identifier des réponses particulières sur nos variables de sortie d’intérêt. Un cas célèbre est l’article de Ramey et Shapiro (1998) qui ont utilisé une approche narrative pour identifier les chocs de politiques fiscale/budgétaire aux États-Unis en ciblant trois grands épisodes d’investissements militaires : la Guerre de Corée (troisième trimestre de 1950), celle du Vietnam (premier trimestre de 1965) et la période Carter-Reagan (premier trimestre de 1980). Depuis, d’autres économistes se sont penchés sur cette approche historique et Ramey (2011) est venue compléter son étude en y ajoutant la période de la guerre d’Irak et les attentats post 11 septembre 2001.

Une approche narrative est également réalisable dans notre cas si l’on se tourne plus en détail vers l’histoire du Québec et que l’on en détermine des périodes clés comme celle qui suit la Grande Dépression de 1929, la « Grande Noirceur » qui correspond au second mandat de Maurice Duplessis en tant que premier ministre, la « Révolution Tranquille » et les grands investissements en construction ou plus tard celles des ralentissements économiques des chocs pétroliers de la fin des années 1970 et du début des années 1980 ou la période de récession des années 1990 avant celle de 2008. Comme nous l’avons vu dans le Chapitre 1, la part du politique et de ses décisions d’investissements est loin d’être négligeable sur le développement du secteur de la construction, on peut ainsi prendre les dates associées à ces décisions/périodes politiques afin d’expliquer certaines variables comme le nombre de structures construites au cours du temps. Ces constatations vont néanmoins être captées par la variable d’âge ou d’évolution des années *val_annee_*.

Par une approche graphique : C'est celle qui va être la plus utilisée dans notre étude étant donné le peu de variables continues dont nous disposons. Si l'on veut par exemple étudier l'impact du développement des constructions dans un type particulier sur le remplacement d'un autre comme c'est le cas pour les types de ponts à poutres en béton armé (3.1(a)) et en béton précontraint préfabriqué (3.1(b)), une analyse graphique est particulièrement utile. En effet, on peut constater que malgré la forte proportion et le fort développement de structures en béton armé construites à partir des années 1950, cette proportion vient à chuter drastiquement à partir du début des années 1960 au moment même où les ponts à poutres en béton précontraint préfabriqué, elles, explosent. Sachant que les ponts à poutres en béton armé viennent à disparaître totalement en 1998 et que près de 25% des structures qui les remplacent sont des ponts à poutres en béton précontraint préfabriqué, il n'est donc pas impensable de prendre en considération le type remplaçant et le moment où elle la remplace comme variables explicatives de notre modèle.



(a) Nombre de constructions de ponts à poutres en béton armé (b) Nombre de constructions de ponts à poutres en béton précontraint préfabriqué

Figure 3.1 Nombre de constructions recensées au fil du temps des types de ponts à poutres (a) en béton armé (b) en béton précontraint préfabriqué

Biais de variable omise

L'un des biais auquel l'analyste peut être confronté dans sa démarche est celui de ne pas sélectionner une variable pertinente à l'analyse et donc de ne pas l'inclure dans le modèle, que ce soit pour une problématique de collecte de données difficile (indisponibilité des données, problèmes de mesures, ...) ou, plus largement, dû à une mauvaise délimitation de l'étude, de la littérature et des facteurs influants. Cette omission crée des problèmes fondamentaux que

nous nous efforcerons d'expliquer.

En effet, ne pas intégrer une variable ayant un effet sur la variable de sortie y c'est, indirectement, faire capter cet effet sur les autres variables sélectionnées.

Ainsi, si ces variables sont écartées leur effet apparaît dans le terme d'erreur ϵ et elles sont donc corrélées avec celui-ci. Pire, si une variable x_1 de l'observation est corrélée avec une des variables écartées, le terme d'erreur n'est plus indépendant de la variable explicative et limiter l'analyse simplement à la variable x_1 revient à faire capter tous les effets de ces autres variables à la variable x_1 seule et ainsi biaiser le résultat et la valeur du coefficient β_1 qui sera surévalué.

Il faut donc pouvoir réussir à trouver un modèle qui prend en compte les variables explicatives de la manière la plus exhaustive possible sans corrélation entre variables.

Nous avons ainsi jusqu'alors discuté de certaines formes fonctionnelles que l'on peut considérer comme classiques. Néanmoins, c'était en considérant jusqu'alors le fait que notre variable dépendante y était continue. Pourtant, dans l'une de nos approche, c'est une variable discrète binaire définie par :

$$D = \begin{cases} 1 & \text{si l'observation est une structure remplacée par un autre type} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

Cela change notre manière d'aborder le problème et nous allons l'aborder sous une forme plutôt probabiliste. Ce qui nous intéresse désormais c'est d'estimer la probabilité qu'une structure soit remplacée par un type nouveau et cela, en fonction de ses caractéristiques X . De nouveaux modèles plus appropriés peuvent donc être utilisés et seront décrits dans la section suivante.

3.3 Les modèles de régression logistiques

Ces modèles² sont ainsi basés sur le codage (0,1) qui permet de définir la probabilité que l'événement défini par la variable d'intérêt survienne. Le modèle n'est alors plus linéaire mais l'on peut exprimer cette l'espérance de la variable d'intérêt y par :

2. Les notions et notations utilisées dans cette section sont inspirées du cours « ECO8086 - Application de modèles économiques » dispensé à l'UQAM à l'Automne 2018 par Stevanovic (2018). Les notes de cours de German (2007) et notamment le Chapitre 3 « Logit Models for Binary Data » ont également été utilisées en complément.

$$\mathbb{E}(y_i) = \mathbb{P}(y_i = 1).1 + \mathbb{P}(y_i = 0).0 = \mathbb{P}(y_i = 1)$$

Dans notre cas, l'espérance de y nous donne donc la probabilité qu'une structure soit remplacée ou non en fonction de ses m caractéristiques que l'on aura choisi de définir $X_i = (x_{i1}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{im})$. Comme nous l'avons mentionné, nous ne pouvons ainsi pas réellement utiliser directement les outils des modèles linéaires du type $y_i = \beta_i.X_i$ étant donné que l'on calcule des probabilités comprises entre 0 et 1 d'un côté et que l'on a des prédicteurs linéaires $\beta_i.X_i$ qui peuvent prendre n'importe quelle valeur réelle. Des transformations et restrictions sont ainsi nécessaires à mettre en place et elles vont être définies par les modèles suivants :

$$\mathbb{P}(y_i = 1|X_i) = \mathbb{P}(X_i.\beta + \epsilon_i \geq 0|X_i) = \mathbb{P}(X_i.\beta \leq -\epsilon_i|X_i) \text{ avec } \beta = (\beta_0, \dots, \beta_k, \dots, \beta_m)$$

Ce qui correspond en fait à l'écriture d'une fonction de répartition F en $F(X_i.\beta)$. Deux spécifications de cette fonction de répartition sont classiquement utilisées, celle du modèle logit et celle du modèle probit.

3.3.1 Les modèles logit et probit

Le modèle logit correspond à la spécification logistique de la fonction de répartition F , c'est à dire :

$$F(X_i.\beta) = \mathbb{P}(y_i = 1|X_i) = \delta(X_i.\beta) = \frac{e^{X_i.\beta}}{1 + e^{X_i.\beta}}$$

Le modèle probit lui correspond à la spécification normale ou gaussienne centrée réduite définie par la fonction de répartition ϕ

$$F(X_i.\beta) = \mathbb{P}(y_i = 1|X_i) = \Phi(X_i.\beta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{X_i.\beta} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz$$

La modélisation logit est généralement plus utilisée à cause de la simplicité de sa présentation mais une bonne définition des variables en amont et l'utilisation d'un logiciel statistique nous permet aisément d'utiliser les deux approches. Nous utiliserons Stata et Matlab pour mettre en oeuvre ces modèles.

Remarque : Par ailleurs, nous considérons dans notre cas une simple approche binomiale ; la variable dépendante peut prendre la valeur 0 ou 1 selon si l'évènement est réalisé ou pas.

Dans le cas du calcul de la probabilité qu'une structure soit remplacée en fonction de ses caractéristiques, cette méthode est pertinente mais elle peut être limitée dans le cas où notre variable dépendante reste discrète mais peut prendre plusieurs valeurs particulières. Dans le cas de l'ICG qui est notre variable d'état de la structure, on peut ainsi s'intéresser à la probabilité que l'ICG soit égal à une valeur k particulière $\mathbb{P}(y_i = k|X_i) = \mathbb{P}(ICG_i = k|X_i)$. Cette approche est dite multinomiale et est définie par la fonction de répartition logistique δ . Par soucis de concision dans cette méthodologie, nous ne détaillerons que les interprétations et critères de qualité de l'approche binomiale qui sont également utilisés pour l'approche multinomiale.

3.3.2 Interprétations

Après estimation du modèle, on obtient les valeurs des paramètres β . L'effet de la j -ième variable, aussi appelée prédicteur, sur la probabilité $\mathbb{P}(y_i = 1|X_i)$ dépend des coefficients β_j et de la valeur même de la probabilité. Ce qu'il nous faut donc considérer c'est l'effet marginal de x_{ij} sur la probabilité que $y_i = 1$, dans notre cas qu'une structure soit remplacée. Cette effet marginal peut être défini pour une variable x_{ij} continue par :

$$\frac{\partial F(X_i\beta)}{\partial x_{ij}} = \beta_j \cdot F(X_i\beta)(1 - F(X_i\beta))$$

Pour une variable indépendante qualitative, on va préférer un taux d'accroissement. C'est surtout le signe de ce rapport qui va nous intéresser pour interpréter les coefficients β_j afin d'en tirer l'effet de x_{ij} sur y_i . Ainsi :

- Si $\beta_j > 0$, x_{ij} a un effet positif sur la probabilité que $y_i = 1$ donc que la structure soit remplacée par un type nouveau ;
- À l'inverse, si $\beta_j < 0$, x_{ij} a un effet négatif sur la probabilité que la structure soit remplacée par un type nouveau.

Comme pour des modèles linéaires classiques, nous allons à présent parcourir les résultats qui nous permettent d'estimer les paramètres et de tester les hypothèses statistiques de ces modèles de régression logistiques.

3.3.3 Estimation et tests

Maximum de vraisemblance

Nous ne rentrerons pas dans le détail de la méthode de Maximum Vraisemblance mais en rappellerons les grandes lignes et notamment les fonctions associées et leur utilité. Dans la

pratique, cette méthode fournit des estimateurs avec de bonnes propriétés statistiques que nous pourrions tester par la suite. On définit la vraisemblance par :

$$L(\beta) = \prod_{i=1}^N F(X_i\beta)^{y_i} (1 - F(X_i\beta))^{1-y_i}$$

Dans la pratique, l'indicateur que l'on utilisera le plus sera le logarithme de la vraisemblance $\log(L(\beta))$ ou plus simplement $LL(\beta)$ définit par :

$$LL(\beta) = \sum_{i=1}^N y_i \cdot \log(F(X_i\beta)) + (1 - y_i) \cdot \log(1 - F(X_i\beta))$$

Les logiciels statistiques calculent ainsi la fonction $LL(\beta)$ et cherchent les coefficients $\beta_0, \dots, \beta_j, \dots, \beta_m$ qui la maximisent. Le logarithme de vraisemblance est surtout à l'origine de la création de nombreux autres d'indicateurs de qualité qui répondent à la même idée d'estimer la distance entre le modèle et la réalité. Parmi eux ;

- La déviance $D(\beta) = -2 \cdot LL(\beta)$;
- $AIC(\beta) = 2 \cdot p - D(\beta)$ qui prend en compte l'ordre p du modèle et permet de l'ajuster en fonction du modèle et permet ainsi de préciser un compromis entre robustesse et précision. ;
- Le pseudo- $R^2 = 1 - \frac{LL(\beta)}{LL(\beta_0)}$ où $LL(\beta_0)$ est le log de vraisemblance d'un modèle sans aucun prédicteur. Cet indicateur permet de comparer plusieurs modèles entre eux. Il existe de nombreux $pseudo - R^2$ définit autour de celui-ci, souvent en élevant le terme de ratio à une certaine puissance comme $2/n$ par exemple pour Maddala (1983).
- La statistique χ_P^2 de Pearson qui retourne la somme des différences carrées entre les valeurs observées et les valeurs prédites de y_i divisé par la variance estimée de y_i . Pour de grands échantillons cette statistique est équivalente à la déviance.

Test d'hypothèse

Le test classiquement utilisé est celui de Wald qui, teste l'hypothèse nulle $H_0 : \beta_j = 0$ en calculant la statistique z similaire à celle de Student décrite en Partie 3.2.2 à la nuance près que l'on pourra le calculer via le test du χ^2 sur les rapports de vraisemblance.

Ce test est réalisé par le logiciel Stata pendant nos estimations et reprend les démarches méthodologiques des tests statistiques classiques.

3.4 Méthodes d'identification économétrique d'effets causaux

3.4.1 Considérations statistiques et problématiques générales

L'objectif de cette section est de présenter les problématiques liées à l'estimation des effets causaux³. Comme on peut s'en douter, il est impossible d'évaluer les effets d'un traitement à la granularité d'un unique individu ou d'une observation, on aura donc plutôt tendance à se tourner vers l'estimation moyenne des effets causaux. Un cadre de pensée théorique et formel a été mis en place par Rosenbaum et Rubin (1983) et sont encore à la base de la l'inférence causale. En voici les bases principales, on notera :

- y_{1i} résultat de l'observation i si elle était exposée au traitement ;
- y_{0i} résultat de l'observation i si elle n'était pas exposée au traitement ;
- D_i la variable muette relative au traitement égale à 1 l'observation i est traitée et 0 sinon.

Ainsi pour chaque individu i , on peut observer :

$$y_i = y_{0i} + D_i \cdot (y_{1i} - y_{0i}) = \begin{cases} y_{1i} & \text{si l'observation a reçu le traitement} \\ y_{0i} & \text{sinon.} \end{cases}$$

En considérant que l'espérance $\mathbb{E}$ est un bon estimateur statistique pour la moyenne de l'échantillon, on pourra ainsi étudier :

- L'effet moyen du traitement (Average Treatment Effect en anglais) :

$$ATE = \mathbb{E}(y_{1i} - y_{0i}) = \mathbb{E}(y_{1i} | X_i, D_i = 1) - \mathbb{E}(y_{0i} | X_i, D_i = 0)$$

Cet estimateur reste un simple *test - t* entre les outcomes des observations du groupe test et celles du groupe de contrôle et peut être suffisant pour des expériences aléatoires que nous verrons plus loin mais ne prend pas en compte les biais liés à la constitution des groupes test et de contrôle lors de l'application de méthodes quasi-expérimentales.

3. Les notations et notions abordées dans cette section sont inspirées du MOOC « Introduction aux méthodes d'évaluation d'impact des politiques publiques - session 2 » dispensé par Behaghel *et al.* (2018) et dont l'attestation de suivi avec succès a été reçue au 7 décembre 2018. Les papiers de recherche de Caliendo et Kopeining (2005) ont été utilisés pour établir pas à pas la démarche d'implémentation de la méthode de score de propensity et pour une bonne définition des hypothèses.

• L'effet moyen du traitement sur la population traitée (Average Treatment Effect on the Treated) :

$$ATE_T = \mathbb{E}(y_{1i} - y_{0i} | D_i = 1) = \mathbb{E}(y_{1i} | X_i, D_i = 1) - \underbrace{\mathbb{E}(y_{0i} | X_i, D_i = 1)}_{\text{non observé}}$$

L'une des problématiques délicate à résoudre de cette approche formelle est le dernier terme de l'ATE_T, $\mathbb{E}(y_{0i} | X_i, D_i = 1)$, qui correspond à la moyenne de l'outcome des personnes traitées si elle n'avaient pas été traitées. Ce terme n'est évidemment pas observable et doit donc être estimé. Les méthodes que nous allons présenter par la suite tentent de palier à cette difficulté.

L'une des problématiques la plus délicate à gérer pour l'analyste est celle de la nature des données. Les méthodes statistiques, en effet, sont particulièrement efficaces lorsqu'elles sont appliquées à des données choisies aléatoirement. Afin de comprendre pleinement les résultats statistiques de nos analyse de régression et qui peuvent prendre en compte de facteurs que l'on observe pas ou essayer de contrôler pour ces facteurs inobservables, on peut mettre en place des méthodes expérimentales ou quasi-expérimentales. Ce sont ces méthodes que nous allons tenter d'expliquer dans cette section.

3.4.2 L'expérimentation randomisée

L'expérimentation aléatoire ou randomisée se tient en constituant deux groupes sélectionnés de manière totalement aléatoire dans un échantillon d'individus : un groupe test sur lequel on va introduire un traitement, faire intervenir un programme, appliquer une politique particulière et un groupe de contrôle sur lequel on ne fera aucune intervention. En considérant un nombre suffisamment grand pour l'échantillon, les groupes seront donc à peu près équivalents dans leur composition initiale (*i.e* les caractéristiques des individus seront réparties de façon similaire dans les deux groupes) et pourront être comparés sans biais de sélection particulier.

En reprenant les notations de la section précédente, on peut ainsi se limiter à l'étude de l'ATE car :

$$\begin{aligned} ATE_T &= \mathbb{E}(y_{1i} | D_i = 1) - \underbrace{\mathbb{E}(y_{0i} | D_i = 1)}_{\text{pas de biais de sélection}} \\ &= \mathbb{E}(y_{1i} | D_i = 1) - \mathbb{E}(y_{0i} | D_i = 0) \\ ATE_T &= ATE \end{aligned}$$

En effet, les résultats probables des traités ou des observations du groupe de contrôle deviennent

totalement aléatoire au traitement étant donné que leur affectation est aléatoire. Autrement dit, l'observation non observable ne pose aucun soucis car :

$$\begin{cases} \mathbb{E}(y_{0i}|D_i = 0) = \mathbb{E}(y_{0i}|D_i = 1) = \mathbb{E}(y_{0i}) \\ \mathbb{E}(y_{1i}|D_i = 0) = \mathbb{E}(y_{1i}|D_i = 1) = \mathbb{E}(y_{1i}) \end{cases}$$

NB : Les caractéristiques étant idéalement les mêmes dans les groupes test et de contrôle (affectation aléatoire), elles n'interviennent pas dans l'expression.

Ce cas idéal où nos deux groupes seraient comparables en tout point permet donc de réellement évaluer l'impact d'un traitement ou d'une intervention particulière sur le groupe expérimental. Pour que cette méthode soit applicable, elle nécessite des contextes très particuliers et est difficilement applicable dans une étude *ex post*. Elle requiert en effet une constitution du projet en amont et est très employée dans la recherche médicale par exemple où le traitement peut être représenté plus directement par un vaccin ou un médicament particulier par exemple.

Dans le cas des évaluations *ex ante*, les données sont souvent simplement des observations comme c'est le cas dans notre étude. L'assignation aléatoire est alors impossible et il nous faut ainsi trouver d'autres méthodes de constitution de nos groupes d'étude. Ce sont ces problématiques que les méthodes quasi-expérimentales tenteront de résoudre.

3.4.3 Les méthodes quasi-expérimentales

Les méthodes quasi-expérimentales permettent de tester des hypothèses de lien de causalité ; la nuance avec les expériences aléatoires réside dans le fait que la répartition des participants dans le groupe expérimental ou le groupe de contrôle est décidée par les participants (dans le cas de la participation à un programme par exemple) ou par des administrateurs, des décideurs publics. On veut dans notre cas essayer de mettre en exergue une relation de causalité entre le remplacement d'une structure par un type nouveau (une innovation) et la valeur de l'ICG. Nous allons donc nous efforcer de décrire les fondations des méthodes quasi-expérimentales et leur application à notre étude.

L'objectif de la méthode quasi-expérimentale est de palier les difficultés dans les affectations d'observations dans les groupes de test et de contrôle. Elle permet ainsi d'identifier un groupe test qui est le plus proche possible du groupe de contrôle au niveau des caractéristiques des observations affectées. L'objectif est, comme pour les méthodes aléatoires, de réussir à prouver

que le traitement est à l'origine des différences que l'on pourra observer entre les groupes de contrôle et le groupe test. L'expression de l' ATE est alors :

$$\begin{aligned} ATE &= \mathbb{E}(y_{1i} - y_{0i} | X, D_i = 1) \\ &= \mathbb{E}(y_{1i} | X, D_i = 1) - \mathbb{E}(y_{0i} | X, D_i = 0) \end{aligned}$$

Nous allons donner par la suite les définitions théoriques de trois catégories de méthodes d'estimation d'effets de traitement :

- L'estimation par ajustement régressif basé sur un modèle pour la variable de sortie, dans notre cas l'ICG ;
- L'estimation par pondération de probabilités inversées basée sur un modèle pour l'assignement du traitement ;
- L'appariement par score de propension.

3.4.4 Estimation par ajustement régressif (RA)

L'estimation de l'effet du traitement par ajustement régressif utilise les moyennes de la variable d'intérêt y par un modèle de régression. Nous allons donc dans le Chapitre 4 estimer un modèle de régression de l'ICG et estimer les moyennes prédites d'ICG pour chacun des deux groupes test et de contrôle. L'ATE est simplement calculable directement via la différence des moyennes de ces deux groupes. L'ATE lui, est la moyenne des prédictions d'ICG parmi le groupe de traités.

3.4.5 Estimation par pondération inverse (IPW)

L'estimation par pondération inverse utilise le score de propension pour pondérer les moyennes estimées de la variable d'intérêt.

De façon plus explicite, on va ainsi estimer un modèle logistique de régression pour l'affectation au traitement, autrement dit on va choisir un vecteur de covariables X_{tr} tel que l'on peut calculer la probabilité de se voir affecter le traitement.

Nous allons ensuite estimer le score de propension défini par Rosenbaum et Rubin (1983) comme la probabilité de recevoir le traitement D étant donné le vecteur X_{tr} de caractéristiques $p_i = \mathbb{P}(D_i = 1 | X_{tr})$.

Nous allons ensuite pondérer les valeurs des moyennes d'ICG estimées par les poids :

$$w_i = \frac{D_i}{p_i} + \frac{(1 - D_i)}{(1 - p_i)}$$

où D_i est la valeur du traitement et prend la valeur 1 pour une observation traitée et 0 sinon et p_i est la probabilité calculée que $D_i = 1$ donc que l'observation i reçoive le traitement. Cette probabilité est le score de propension de i et dépend de son vecteur de covariables X_{tr} .

Ainsi, chaque poids est l'inverse de la probabilité que l'observation reçoive le traitement ; plus une observation est susceptible de le recevoir, plus son poids tendra vers 1. Pour ce modèle d'estimation d'effets, aucun modèle pour la variable de sortie y n'est précisé.

3.4.6 L'estimation doublement robuste (IPWRA)

Cette méthode d'estimation combine les deux précédentes méthodes en considérant les deux modèles : celui de la variable d'intérêt y_i et celui d'affectation au traitement D_i . Deux vecteurs de covariables sont donc considérés $X_{outcome}$ pour l'ICG et X_{tr} pour le traitement. Ce modèle utilise la méthode d'estimation par pondération inverse pour venir corriger les coefficients estimés par la régression de la variable d'intérêt pour lesquels on n'a pas d'observation. Cette méthode est donc doublement robuste car il faut simplement que l'un des deux modèles soit correctement spécifié pour que la correction soit robuste.

3.4.7 Appariement par score de propension

L'appariement par score de propension est particulièrement bienvenu lorsque les caractéristiques observables sont nombreuses ou croisées. Il est en effet très délicat de constituer un groupe test dont les observations présentent exactement les mêmes caractéristiques que le groupe de contrôle, dans notre cas le même âge, région administrative, nombre de voies, etc. La comparaison de l'évolution de deux structures identiques en tout point à l'exception d'une variable (ici le type que l'on veut étudier) est donc très compliquée à mettre en oeuvre et bien qu'elle ne soit pas impossible, elle reste très rare.

L'idée de l'appariement par score de propension afin de palier à cette impossibilité de constituer des groupes tests et de contrôle identiques est donc de trouver pour chaque observation du groupe test une observation du groupe de contrôle non plus en fonction de leurs caractéristiques directement observables mais de leur score de propension. Ce score est la probabilité de recevoir le traitement sous contrainte de ses caractéristiques X . On associe ainsi des observations dans les deux groupes qui sont comparables entre elles et on compare la moyenne des différences

des valeurs des variables qui nous intéressent. Notre estimateur ATE devient alors :

$$\begin{aligned} ATE &= \mathbb{E}(y_{1i} - y_{0i} | p(X_i), D_i = 1) \\ &= \mathbb{E}(y_{1i} | p(X_i), D_i = 1) - \underbrace{\mathbb{E}(y_{0i} | p(X_i), D_i = 0)}_{\text{observable}} \end{aligned}$$

Cette approche est particulièrement intéressante dans notre cas et pertinente statistiquement puisque nous avons une base de données relativement conséquente qui nous permet de garantir la représentativité de nos résultats.

Le score de propension $p_X = \mathbb{P}(D = 1 | X)$ étant la probabilité de recevoir le traitement, il sera calculé par l'aide des modèles de régression binaires Logit ou Probit développés en 3.3.1.

Plusieurs méthodes d'appariement par score de propension existent et nous allons en présenter deux classiques : l'appariement par plus proches voisins et la pondération de Kernel tous deux représentés en Figure 3.2.

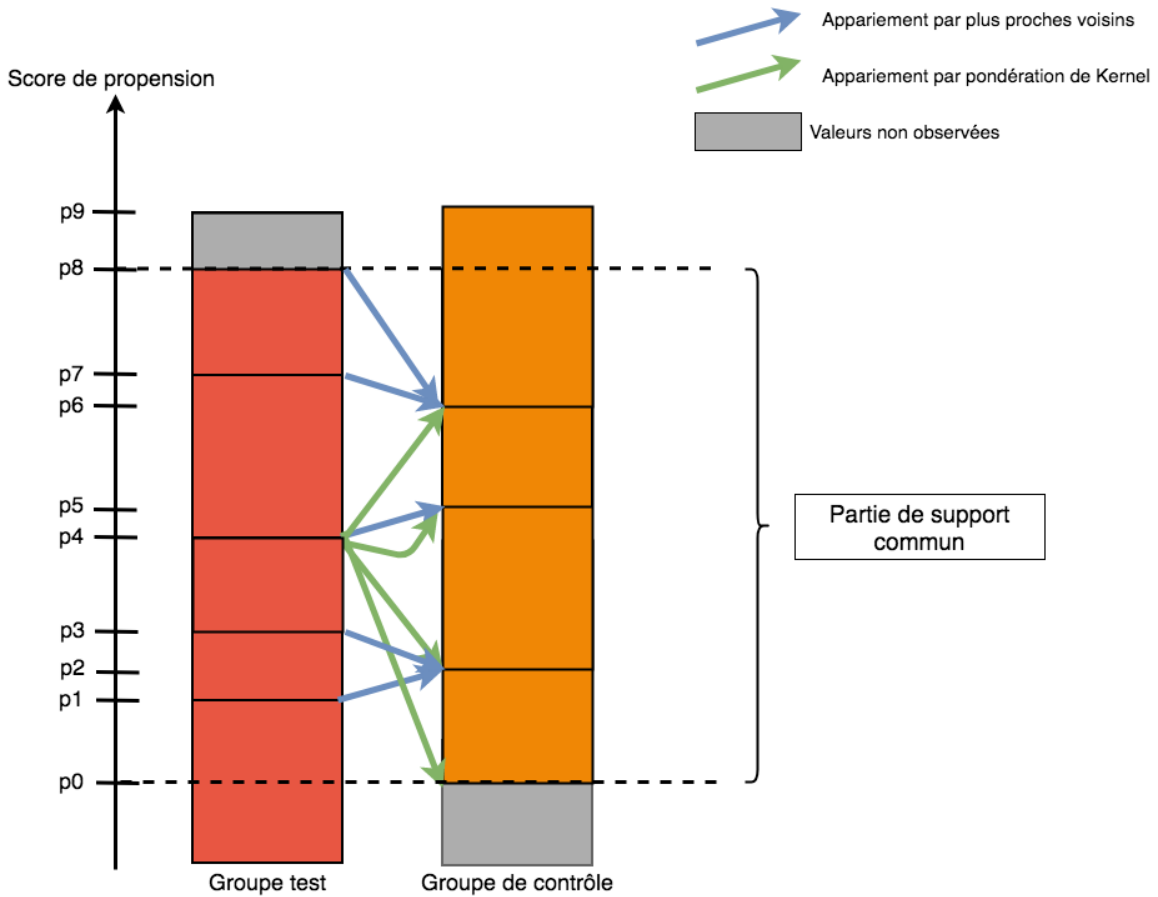


Figure 3.2 Représentation des méthodes d'appariement de Kernel et par plus proches voisins

L'appariement par plus proches voisins : Pour chaque observation i du groupe test, on choisit l'observation j ayant le score de propension le plus proche. La relation contrôlant cette démarche est donc $\min\|p_i - p_j\|$; on minimise en effet la distance entre les deux scores de propension. Dans la pratique, sur des échantillons conséquents, il est intéressant de considérer non pas le plus proche voisin mais les n plus proches voisins (souvent $n = 3$ ou 5) afin de pouvoir étudier la moyenne de leurs résultats. Ainsi par exemple si l'on se tourne vers la Figure 3.2, chaque observation du groupe test (*i.e* p_1, p_3, p_4, p_7 et p_8) est associée à l'observation la plus proche du groupe de contrôle (respectivement à p_2, p_2, p_5, p_7 et p_7).

L'appariement de Kernel : Pour chaque observation i du groupe test, on apparie plusieurs observations j du groupe de contrôle en imposant des poids inversement proportionnels à la distance entre la valeur i traitée et les observations j . La pondération est définie par la relation :

$$w(i, j) = \frac{K\left(\frac{p_j - p_i}{h}\right)}{\sum_{j=1}^{n_0} K\left(\frac{p_j - p_i}{h}\right)}$$

où K est la fonction de Kernel et h un paramètre de taille de bande. Nous avons représenté la démarche pour une observation (celle avec la valeur p_4 de score de propension) sur la Figure 3.2 ; on peut ainsi se représenter que les poids associés à chaque observation j diminuent avec la distance avec l'observation i . Ainsi $w(p_4, p_5) > w(p_4, p_6) > w(p_4, p_2) > w(p_4, p_0)$ dans notre cas. Cette opération est répétée pour toutes les observations i .

D'autres méthodes d'appariement peuvent être utilisées comme celle du rayon (*radius matching* en anglais) qui apparie les différentes observations i et j dans un rayon spécifié par la relation $\|p_i - p_j\| \leq r$ ou par stratification qui compare les résultats à l'intérieur de blocs particuliers de scores de propension mais nous nous limiterons aux deux premières détaillées ci-dessus.

Hypothèses importantes pour toutes les méthodes d'estimation :

1. Seules les valeurs qui figurent dans la partie de support commun sont utilisées pour réaliser les appariements. Même si cela nous force à rejeter un pourcentage d'observations (possiblement conséquent) du groupe test et du groupe de contrôle, cette considération est absolument nécessaire si l'on veut écarter les valeurs trop élevées ou trop faibles et qui risqueraient de fausser l'estimation que l'on aurait par la suite.
2. Il faut que les covariables vérifient la propriété de balancement, c'est à dire qu'il ne

faut pas qu'il y ait de différence statistiquement significative entre le groupe test et le groupe de contrôle. Cette propriété peut être testée après estimation des scores de propension et doit être testée après l'appariement également pour vérifier que dans les deux cas les deux groupes et ainsi les observations qu'ils contiennent soient réellement comparables entre eux.

L'un des inconvénients majeur de l'appariement par score de propension est lié au fait même que l'appariement se fasse à partir du vecteur X de caractéristiques observées seulement. Si la probabilité de recevoir le traitement est influencée grandement par des caractéristiques non observables, les estimations seront biaisées et les raisonnements également. La précision de notre étude et le nombre de caractéristiques définies par un grand nombre de variables fait en sorte que l'on peut écarter.

D'autre part, comme on l'a mentionné précédemment, l'appariement se fait sous la condition de support commun qui peut, si elle est trop faible, retirer un grand nombre d'observations de l'étude et ainsi réduire l'impact de l'approche qui repose sur un grand nombre d'observations. Il faudra donc bien considérer le nombre d'observations retenues après le respect de la condition de support commun.

Toutes ces étapes statistiques seront effectuées par l'intermédiaire du logiciel Stata et toutes les caractéristiques de nos régressions et de nos méthodes d'appariement seront rappelées de façon exhaustive à chaque fois que cette démarche sera employée au Chapitre 4.

CHAPITRE 4 RÉSULTATS

4.1 Introduction

4.1.1 Rappel de la démarche

Comme nous l'avons exposé au Chapitre 3, nous allons :

1. Effectuer une analyse descriptive des données d'abord du réseau québécois dans son ensemble puis des types remplacés ;
2. Mettre en place un modèle de régression linéaire pour l'ICG (que l'on considère comme continu) et isoler les variables de caractéristiques des structures qui ont un apport significatif ;
3. Définir un vecteur de covariables pour le traitement via un modèle de régression logistique ;
4. Isoler des couples de types remplacés/remplaçants à l'aide de statistiques descriptives et d'approches graphiques sur les types remplacés ;
5. Mettre en place des approches causales afin d'estimer les effets de traitements de remplacement de structures par d'autres considérées nouvelles ou plus "innovantes" que nous définirons à chaque fois.

Compte tenu du nombre important de données et de variables catégoriques (notamment liées aux types de structures), nous ne présenterons pas tous les résultats liés aux approches causales car elles seront basées sur un faible nombre de type de structure à la fois. Représenter toutes les combinaisons possibles deviendrait trop lourd pour l'usage de ce mémoire qui ne vise qu'à présenter les possibilités d'approches économétriques pour essayer de caractériser les décisions de constructions sur l'état des structures.

4.1.2 Quelques résultats généraux

Catégories de structures

La répartition générale donnée en Figure 4.1 vient préciser les chiffres annoncés au Chapitre 2 en se limitant maintenant aux observations retenues à l'issue de la démarche de construction de la base de données finale. Sans surprise, les structures ayant le plus de poids dans la base de données sont les ponts (environ deux tiers), suivi des ponceaux (environ un quart) et des

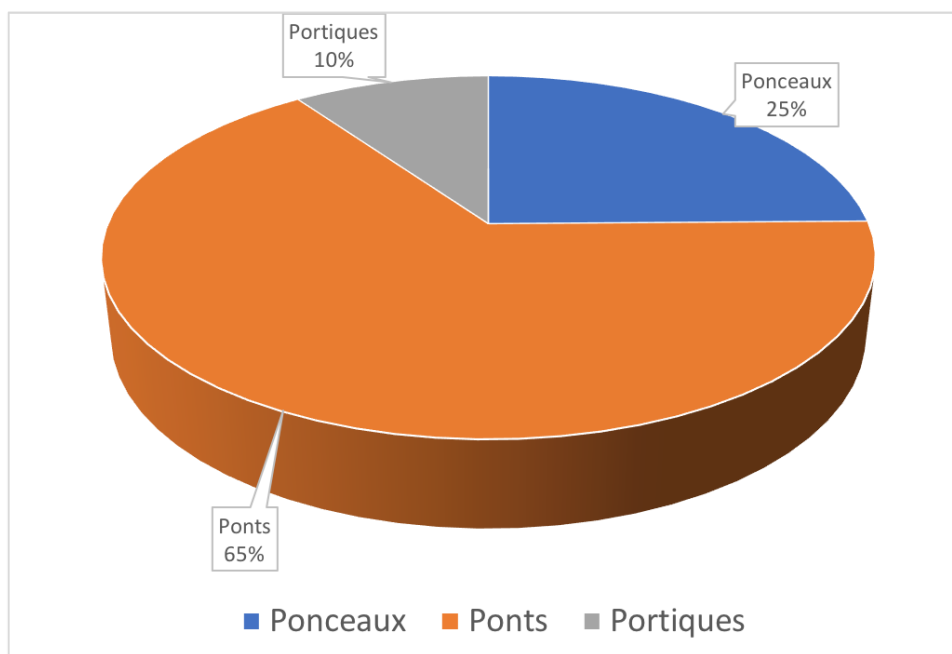


Figure 4.1 Répartition des catégories de structures

portiques (un dixième). Nous allons dans la prochaine section essayer de préciser les genres et les matériaux dans lesquels ces structures sont construites, discuter de leur localisation géographique et des disponibilités de leurs ICG et des remplacements.

Directions Territoriales

Comme discuté au Chapitre 2, les régions administratives recensant le plus d'observations sont les régions de Montréal, la Direction Territoriale des Laurentides-Lanaudière, de Chaudière-Appalaches et de l'Estrie.

Remarques :

1. Lors de l'appariement des bases de données, 7 structures ont été ajoutées à la base de données générale depuis la base de données des structures remplacées et n'ont donc pas d'indication sur leur région administrative. Ce chiffre n'étant pas très élevé, elles ne seront pas considérées lors des travaux sur les régions administratives mais seront prises en compte lors de ceux sur les types de structures que nous avons bien (pour la structure remplacée et la remplaçante).
2. La région de Montréal est très représentée dans le nombre de constructions général recensé mais la quantité de données disponibles sur l'ICG diffère grandement.

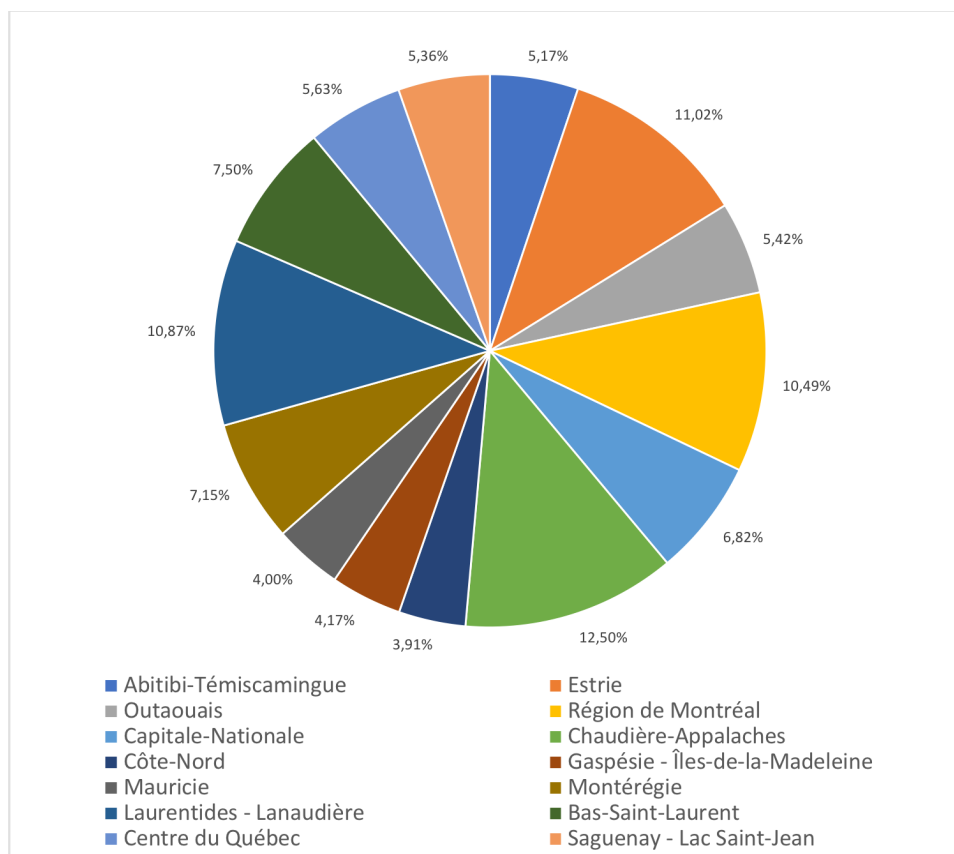


Figure 4.2 Répartition des observations par direction territoriale

Tableau 4.1 Moyenne de l'ICG par direction territoriale

Direction Territoriale	Moyenne	σ
Abitibi Témiscamingue	4,401	0,923
Estrie	4,463	0,812
Outaouais	4,853	0,467
Région de Montréal	4,401	0,943
Capitale Nationale	4,647	0,743
Chaudière-Appalaches	4,652	0,748
Côte-Nord	4,514	0,839
Gaspésie	4,564	0,906
Mauricie	4,656	0,734
Montérégie	4,475	0,906
Laurentide-Lanaudières	4,616	0,769
Bas Saint-Laurent	4,668	0,754
Centre-du-Québec	4,31	1,14
Saguenay	4,712	0,577

Un test de Kruskal-Wallis nous donne une p_{value} de 0,01 et donc montre bien que les différences de moyennes des ICG entre les directions territoriales sont significatives.

4.1.3 Matériaux

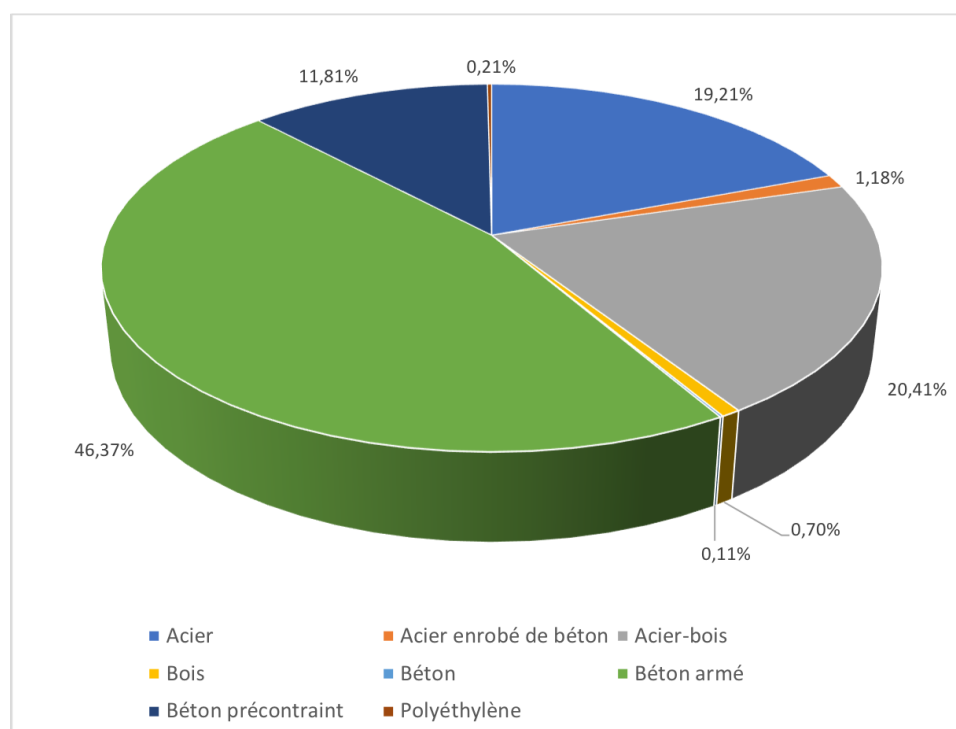


Figure 4.3 Répartition des structures selon leur matériau de construction

Les structures en béton armé représentent près de la moitié des structures recensées dans notre base de données, suivies par les ponts acier-bois (20%) et de près par les structures en acier (19%) puis par celles en béton précontraint ($\approx 10\%$).

Il est important de noter que les innovations qui sont perçues dans chacun de ces matériaux au fil du temps ne sont pas indiqués d'une façon particulière. Ainsi, les bétons fibrés par exemple qui commencent à émerger au début des années 1970 ne sont pas renseignés comme une sous-catégorie de matériau et les structures construites dans ce matériau particulier seront simplement placés dans un type particulier déjà existant de structure. Il est donc délicat de faire une étude réellement poussée de l'évolution de l'emploi des matériaux innovants comme c'est le cas pour les passerelles Isabey-Darnley et Barr par exemple.

Sans surprise, le béton armé, matériau principal des grandes constructions du XX^{ème} siècle compose donc presque la moitié du parc de structures du réseau québécois. Nous allons donc nous intéresser à la valeur moyenne de l'ICG pour chacun de ces matériaux.

Tableau 4.2 Moyenne de l'ICG par matériau de construction utilisé

Matériau	Moyenne	σ
Acier	4,589	0,814
Acier enrobé de béton	3,429	1,2
Acier-bois	4,70	0,744
Bois	4,4	0,883
Béton	-	-
Béton armé	4,516	0,904
Béton précontraint	4,688	0,619
Polyéthylène	4,75	0,5

Le Tableau 4.2 nous donne les valeurs moyennes des ICG en fonction du matériau utilisé pour la construction. Le polyéthylène semble ainsi être le matériau pour lequel les structures sont dans le meilleur état étant donné que son ICG moyen est le plus élevé. Néanmoins, seules 4 observations ont été utilisées pour calculer cette moyenne, rendant ainsi ce résultat peu représentatif d'une réalité statistique.

La valeur relativement élevée de l'ICG moyen des ponts à poutres en acier-bois peut surprendre lorsque l'on a en tête le climat particulièrement difficile et variant au Québec et l'impact qu'il peut avoir sur ce genre de structures. En étudiant de plus près la répartition de l'âge comme le montre la Figure 4.4, on constate que plus la structure est âgée, plus son ICG a tendance à diminuer¹. Ce résultat n'a rien de surprenant, plus une structure vieillit, plus elle a tendance à s'abîmer. Ce qu'il est intéressant de noter sont les quelques structures (27) qui ont un $ICG \geq 4$ mais qui ont également plus de 50 ans. On peut légitimement supposer que ces structures là ont fait l'objet de rénovations récentes qui leur ont permis de présenter un ICG aussi élevé malgré leur âge.

Le béton précontraint est le troisième matériau avec l'ICG moyen le plus élevé, devant l'acier et le béton armé rendant compte de la particularité de durabilité par rapport à ces deux autres matériaux. Viennent enfin les structures en bois et en acier enrobé de béton qui, sans surprise ici non plus, présentent un ICG moyen particulièrement faible.

Un test de Kruskal-Wallis nous apprend que l'on peut rejeter l'hypothèse nulle correspondant à l'égalité de toutes les valeurs moyennes à un seuil de 1%.

1. On rappelle ici que malgré le fait que la Figure 4.4 présente des valeurs d'ICG égales à 1, ces observations seront exclues de toutes les régressions futures car elles sont relatives à des structures en cours d'inspection.

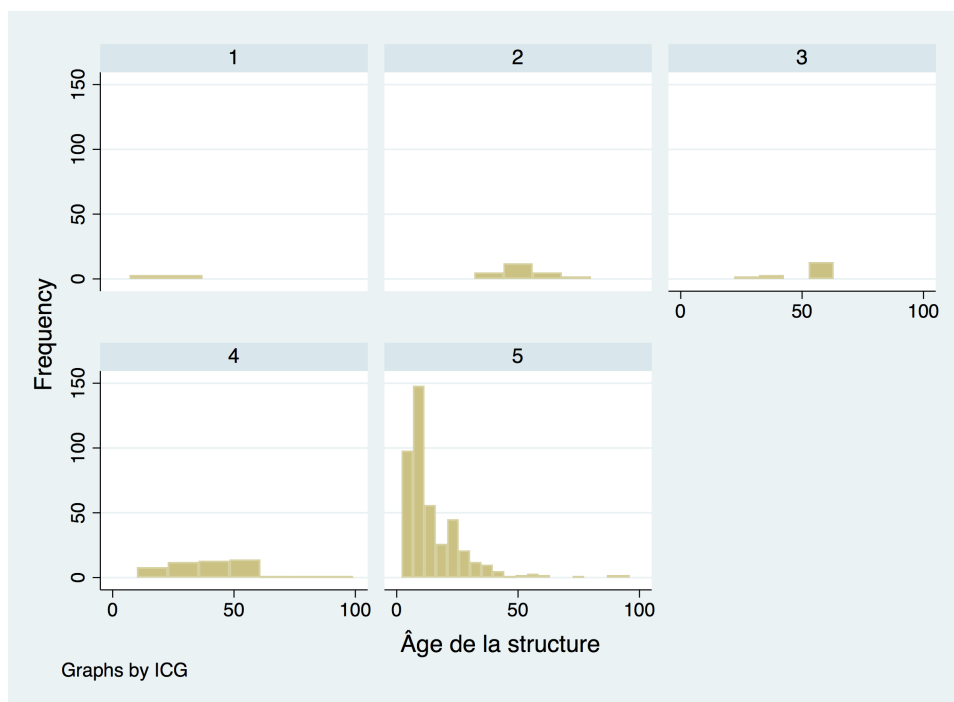


Figure 4.4 Distribution de l'âge des structures en acier-bois par valeur d'ICG

À propos du nombre de constructions

Comme le montre la figure 4.5, le nombre de constructions par an connaît une première augmentation notable au début du siècle dernier et qui reste environ constante jusqu'au début des années 1950, date à laquelle la pente du nombre total cumulé de constructions augmente considérablement, pour augmenter encore plus à partir des années 1960 (Révolution Tranquille) jusqu'en 1980. À partir de 1980, on constate, une baisse notable du nombre de constructions annuel qui vient à stagner jusqu'au début des années 2000. Un regain de constructions s'installe jusque 2010 environ pour enfin stagner.

Discutées aux Chapitres 1 et 3, ces variations de modifications du nombre de constructions peuvent être expliquées en grande partie par les grandes périodes politiques du Québec qui ont vu de nombreuses augmentations d'investissements dans les infrastructures, notamment à la période de l'Exposition Universelle (1967) ou des Jeux Olympiques de Montréal (1976). Ces financements et l'impulsion de l'état de manière plus large dans la sphère de la construction seront captés par la variable de temps *val_annee_* ou de l'âge de la structure directement découlée de cette dernière.

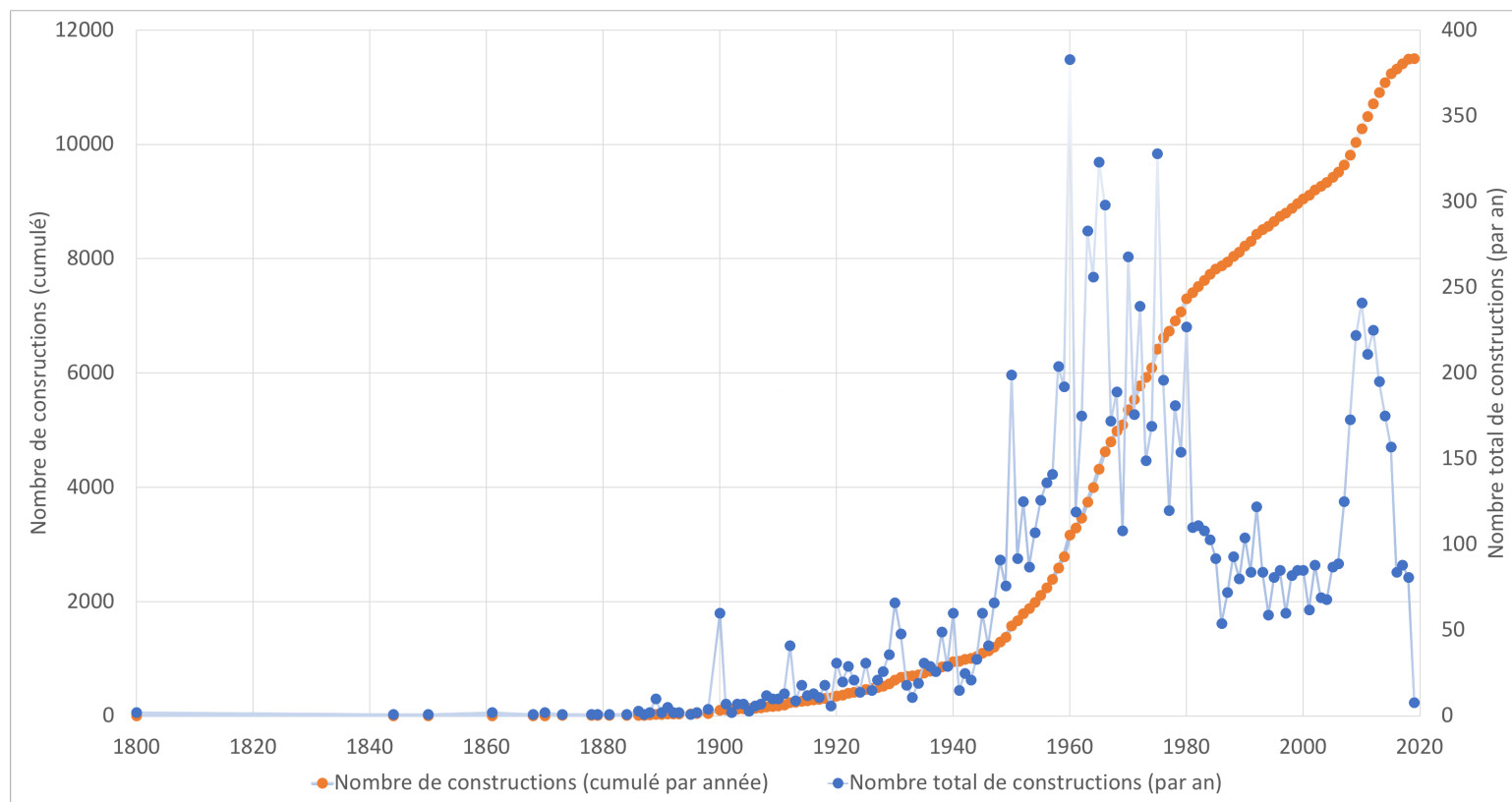


Figure 4.5 Évolution du nombre de constructions par an brut, et cumulé

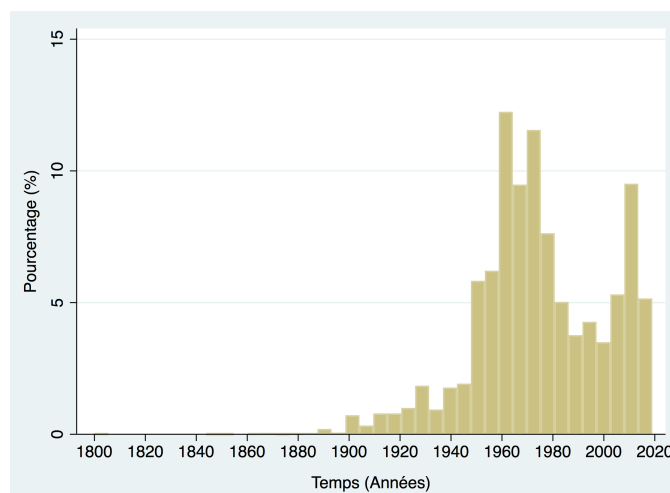


Figure 4.6 Répartition en % du nombre total d'observations au fil du temps

Il est également pertinent de noter que les constructions précédant le début du siècle dernier sont au nombre de 48 et représentent ainsi 0,04% de la base de données comme le montre la Figure 4.6. Plutôt que d'apporter des précisions sur nos résultats statistiques, ces données viendront augmenter inutilement les écarts-types et donner des résultats moins représentatifs de la réalité statistique. Ces observations peuvent donc être écartées et la base de données commencera ainsi à 1900, date d'un premier pic de constructions recensé.

Apparition et disparition de types de structures

Il va être primordial par la suite d'étudier les apparitions et disparitions de certains types de structures afin de pouvoir isoler des couples d'études précis "Type remplacé/Type remplaçant" et, pour se faire, l'approche graphique sera particulièrement utile en nous permettant de refléter l'évolution de ces types.

C'est ainsi qu'en regardant d'abord de façon très macro l'évolution de quelques types au cours du temps comme en Figure 4.7, on s'aperçoit assez rapidement de l'apparition ou la disparition de certains. Cette approche peut être plus intuitive afin de repérer les types qui disparaissent et ceux qui prennent de l'ampleur dans une zone de temps similaire. Si l'on s'intéresse par exemple au type 52 des ponts à poutres en acier enrobés de béton, on constate que les constructions sont réparties sur une période relativement brève qui va du début des années 1920 jusqu'à peu près au milieu des années 1930. Or dans la foulée, les ponts à poutres en béton armé (type 41) vont se développer et prendre de l'ampleur à partir de 1945. Y a-t-il un lien de causalité entre l'apparition ou le développement des ponts à poutres en béton armé

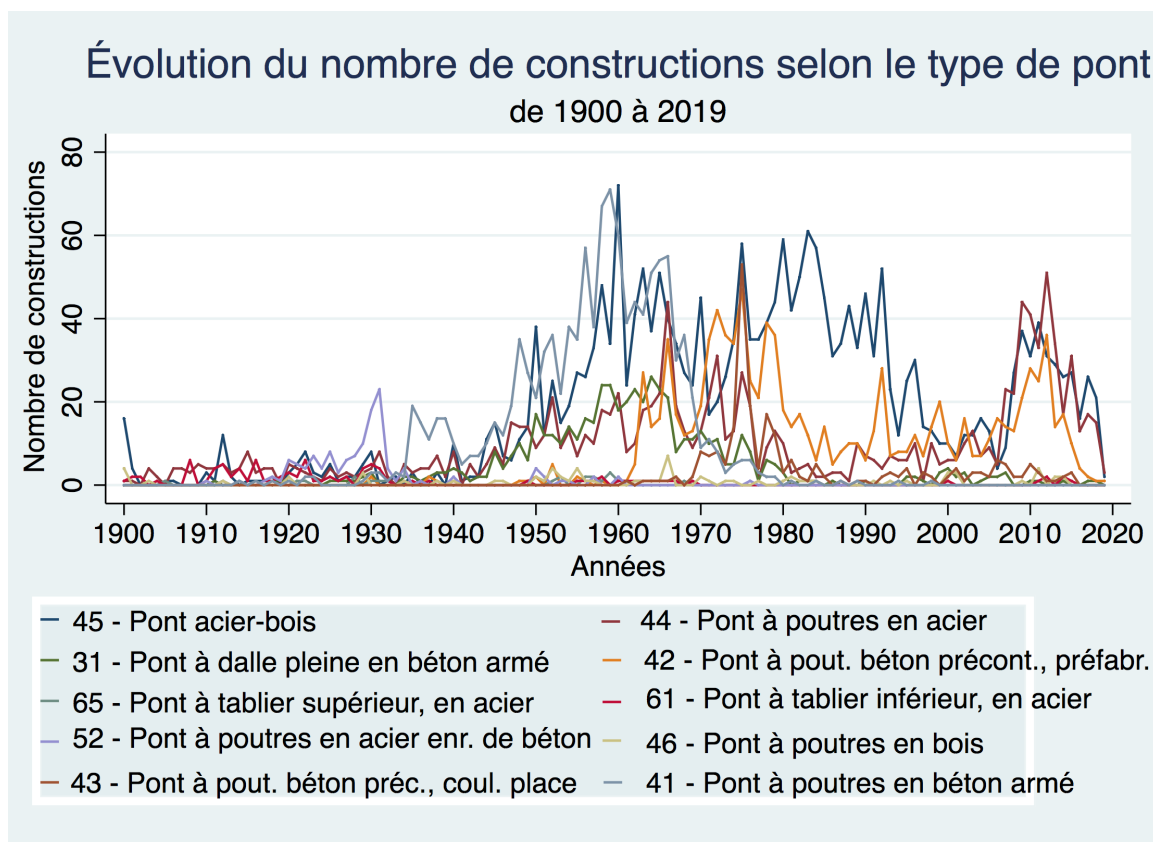


Figure 4.7 Évolution du nombre de constructions selon le type de pont

et la disparition des ponts à poutres en acier enrobés de béton ? Pour le savoir il va falloir définir correctement la façon dont on caractérise un type disparu en fonction de la date de la dernière construction recensée dans ce type mais également étudier pour chacun de ces types par quels types ils ont été remplacés. Cette information nous sera donc donnée au travers des 1636 structures de la base de données des structures remplacées et fera tout l'objet de la section 4.5.

4.2 Statistiques descriptives du réseau québécois

Ce mémoire faisant suite à Marmoux (2016) les mêmes catégorisations et appellations de genres de constructions et de matériaux utilisés ont été utilisées afin de créer une cohérence entre nos travaux. Il est néanmoins possible que d'autres catégorisations plus pragmatiques ou réalistes existent.

4.2.1 Ponceaux

Les genres de ponceaux

La catégorisation des types de ponceaux est représentée dans le Tableau 4.3 ainsi que les proportions que chacune représente.

Tableau 4.3 Catégorisation des ponceaux

Code du type	Catégorie associé	Nombre d'observations	Pourcentage associé (%)
13	Rectangulaire	1567	55,23
c 21			
14	Circulaire	389	13,64
15			
16			
19	Voûté	368	12,89
20			
18	Arqué	316	11,48
12	Portique	146	5,16
17	Elliptique	30	1,06
11	À dalle	16	0,56

Ainsi, les ponceaux rectangulaires représentent plus de la moitié des ponceaux recensés au total et sont quasiment tous en béton armé (3 structures seulement en bois). Les ponceaux circulaires et voûtés sont ensuite les plus recensés avec notamment les types "15 - Ponceau circulaire en acier" et "19 - Ponceau voûté en béton armé" qui représentent respectivement 88 et 77% de leurs catégories.

Les quatre dernières catégories de structures étant représentées par un seul type à chaque fois, on peut directement les associer avec un unique matériau de construction utilisé : ainsi les ponceaux arqués et les ponceaux elliptiques seront construits uniquement en acier tandis que les ponceaux portiques et à dalle ne seront construits qu'en béton armé.

Les ponceaux arqués sont la dernière structure la plus recensée dans la base de données représentant avec les ponceaux rectangulaires, circulaires et voûtés presque 95% des ponceaux.

Nous allons à présent nous attarder sur l'effet de la catégorie de ponceaux sur la moyenne de l'ICG. Ces résultats sont présentés au Tableau 4.4 et un test de Kruskal-Wallis confirme la significativité des différences entre ces moyennes. On constate rapidement que le nombre de ponceaux pour lesquels on a une information sur l'ICG est réduit à 959 sur les 2832 ponceaux totaux (soit plus d'un tiers). Nous avons également représenté en Figure 4.8 la distribution des

valeurs moyennes d'ICG qui vient confirmer les résultats du Tableau 4.4. Ainsi, la moyenne de l'ICG (en vert sur la Figure) est très importante et très resserrée (Écarts types en rouge sur la Figure) lorsqu'ils sont rectangulaires et voûtés et beaucoup moins lorsqu'ils sont circulaires, arqués ou elliptique.

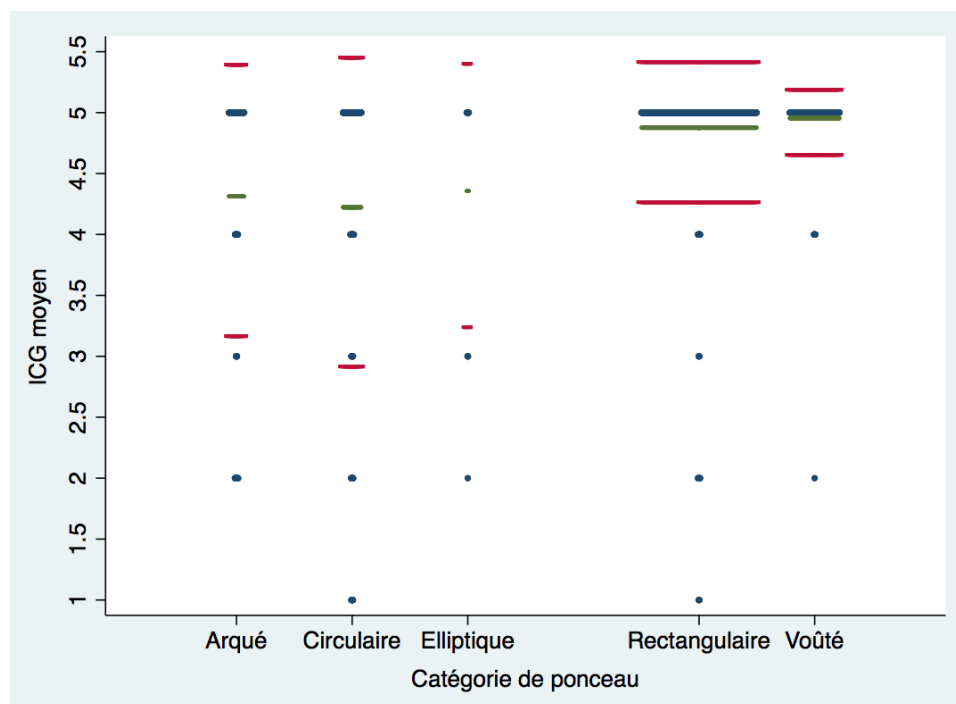


Figure 4.8 $\overline{ICG}$ en fonction du genre de ponton.

Le nombre d'observations dont on dispose avec l'ICG pour chacune de ces catégories joue évidemment beaucoup mais on peut légitimement s'intéresser aux matériaux utilisés. En effet, comme nous l'avons mentionné précédemment, les pontons rectangulaires et voûtés sont à grande majorité en béton armé (Types 13 et 19) et sont ceux avec l'ICG moyen le plus élevé tandis que les pontons circulaires, arqués et elliptiques sont en grande majorité en acier et sont ceux avec l'ICG moyen le plus faible (Types 15, 18 et 17).

Tableau 4.4 Moyenne de l'ICG par catégorie de ponceau

Catégorie de ponceau	n	$\overline{ICG} (\sigma)$
Rectangulaire	513	4,906 (0,467)
Circulaire	113	4,451 (0,963)
Voûté	220	4,955 (0,266)
Arqué	99	4,313 (1,113)
Portique	0	-
Elliptique	14	4,357 (1,082)
À dalle	0	-
Tous types confondus	959	4,795 (0,661)

Les matériaux utilisés

Comme le montre la Figure 4.9, environ les trois-quarts des ponceaux construits le sont en béton armé contre un quart en acier. La distribution de l'ICG moyen est donné au Tableau 4.5. Aucune observation d'ICG n'a pu être recensée pour les ponceaux en bois mais qui ne représentent de toute façon que 3 observations au total. Pour les ponceaux en polyéthylène, le peu d'observations rend les résultats très peu intéressants.

En revanche en ce qui concerne le béton armé, on constate que la moyenne de l'ICG se rapproche bien plus de celles des ponceaux rectangulaires et voûtés comme nous l'avions précédemment évoqué. La moyenne de l'ICG des ponceaux en acier elle se rapproche de celles des ponceaux circulaires, arqués ou elliptiques. Un test de Mann-Whitney pour ces deux matériaux nous donne une p_{value} nulle, indiquant bien que la différence entre ces deux moyennes d'ICG est significative. Il est intéressant de noter que les observations pour le béton armé sont toutes présentes dans un intervalle de confiance à 95% plus faible que celui de l'acier ou du polyéthylène venant donner plus de crédibilité à la moyenne de l'ICG pour les ponceaux en béton armé.

Les catégories de ponceaux sont ici très corrélées aux matériaux dans lesquels ils sont associés car l'élément de liaison entre les deux définitions de variables est bien le type de la structure.

Tableau 4.5 Moyenne de l'ICG par matériau de construction de ponceau

Matériau du ponceau	n	$\overline{ICG} (\sigma)$	[95% I.C]
Béton armé	693	4,926 (0,408)	[4,866 ; 4,941]
Acier	262	4,447 (0,996)	[4,208 ; 4,481]
Polyéthylène	4	4,75 (0,5)	[3,954 ; 5,546]
Bois	0	-	-

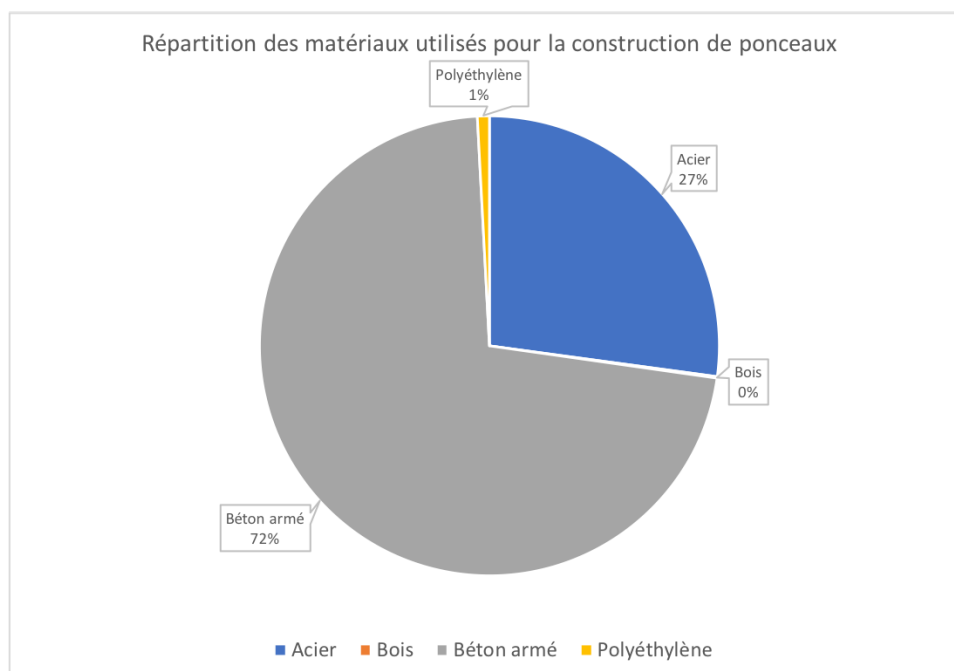


Figure 4.9 Répartition des matériaux de ponceaux

Directions territoriales

Nous pouvons comparer les moyennes des ICG des ponceaux par direction territoriales avec la moyenne de l'ICG par direction territoriale représentée par le Tableau 4.1. Elles sont globalement élevées comprises entre 4,65 et 4,96 et avec un écart-type plus faible, condensant ainsi un plus grand nombre d'observations à un ICG égal à 5. L'ICG moyen relatif aux ponceaux est déjà relativement élevé ; égal à 4,795 (0,661). Il ne semble donc pas y avoir de variation significative de l'ICG si ce n'est pour l'Abitibi, Côte-Nord et le Centre-du-Québec qui sont particulièrement faibles. À l'inverse les ponceaux semblent être en particulièrement bon état en Estrie, Capitale-Nationale, dans la région de Montréal, au Saguenay et atteint un maximum pour l'Outaouais ($ICG > 4,8$).

Néanmoins, le test de Kruskal-Wallis nous indique que ces différences de moyennes d'ICG entre les différentes directions territoriales ne sont pas significatives ($p_{value} = 0,4233$). On ne peut ainsi pas rejeter l'hypothèse nulle qui suppose les groupes de directions territoriales égaux.

Tableau 4.6 Moyenne de l'ICG des pontons par direction territoriale

Direction Territoriale	n	$\overline{ICG} (\sigma)$
Abitibi - Témiscamingue	42	4,667 (0,816)
Estrée	96	4,885 (0,456)
Outaouais	75	4,96 (0,197)
Région de Montréal	55	4,891 (0,567)
Capitale-Nationale	58	4,862 (0,544)
Chaudière-Appalaches	107	4,813 (0,631)
Côte-Nord	88	4,659 (0,869)
Gaspésie - Île-de-la-Madeleine	60	4,683 (0,833)
Mauricie	38	4,737 (0,724)
Montérégie	51	4,725 (0,827)
Laurentides-Lanaudière	83	4,726 (0,827)
Bas-Saint-Laurent	82	4,780 (0,685)
Centre-du-Québec	51	4,667 (0,931)
Saguenay-Lac Saint-Jean-Chibougamau	68	4,882 (0,474)

Âge

Plus de 60% des pontons sont âgés de moins de cinquante ans et environ 80% moins de soixante. C'est à dire qu'une grande partie des pontons a été construite à partir des années 1960 et 1970. La grande part de pontons âgée de moins de trente ans correspond au regain de construction observé au début des années 2000 et au second pic de 2010.

Sans surprise, la Figure 4.10(b) nous montre l'ICG moyen des pontons qui diminue globalement au fil du temps. Stagnant pendant les trente premières années très proche de 5, l'état des structure finit par se dégrader progressivement de façon quasi linéaire par la suite. La tendance est logarithmique comme vient le confirmer le Tableau 4.7 de résultat de régression statistique². Les matériaux eux ne semblent apporter que peu de pouvoir explicatif au modèle lorsqu'ils sont ajoutés ensemble et leurs coefficients ne sont pas significatifs (contrôle pour le polyéthylène). Il est intéressant de noter que les coefficients sont exactement les mêmes et ont la même statistique t. Les signes sont cohérents : l'acier vient globalement faire diminuer l'ICG moyen pour les pontons, le béton armé semblant bien faire augmenter l'ICG moyen. On le retire dans le Modèle 4 mais on retirer l'acier revient au même résultat étant donné que les coefficients et les t-stats sont les mêmes. Tous les coefficients deviennent significatifs mais on ne gagne que très peu d'information grâce aux variables de matériaux ; l'âge et son logarithme semblent expliquer en grande partie l'évolution de l'ICG moyen.

2. Rappel : Les structures ayant un ICG égal à 1 ont bien été exclues des régressions.

Remarque : Il peut paraître inhabituel de considérer l'âge et son logarithme ensemble comme transformation plutôt que l'un et l'autre séparément, cette démarche vient de l'observation graphique de l'ICG donnée en Figure 4.10(b) couplée d'une analyse statistique. Nous avons représenté trois formes fonctionnelles de l'âge : en vert l'ICG en fonction de l'âge de façon linéaire, en rouge l'ICG en fonction du logarithme de l'âge et en orange l'ICG en fonction de l'âge et du logarithme de l'âge. En effet, comme le Modèle 1 l'indique (courbe verte), l'âge explique une grande partie de la variance de l'ICG, le logarithme seul (rouge) l'explique beaucoup moins. Cela est dû au fait que son coefficient estimé est négatif, ne permettant pas de capter les observations non linéaires pour les structures âgées de moins de 20 ans environ. Dans le cas de l'association des deux (Modèle 2 et courbe orange), le coefficient négatif est celui de l'âge, prenant en compte ainsi la décroissance de l'ICG tandis que la positivité du coefficient associé au logarithme de l'âge permet maintenant de capter les quelques observations des structures de moins de 20 ans.

Le test a également été mené pour la transformation plus classique $ICG = f(\hat{age}, \hat{age}^2)$ mais le R_{aj}^2 est plus faible que pour le logarithme. Ce choix de façon générale n'influera pas de façon significative les résultats des études par la suite et n'est présenté que pour remarque et constatation.

Certaines observations pourtant très âgées sont en très bon état et ne nécessitent pas d'intervention ; on peut supposer que pour leur cas, des rénovations ont été entreprises récemment sans démolition de la structure. Elle n'a donc pas été remplacée mais a juste vu son ICG remonter à 5 après la rénovation tout en restant sous le même numéro de dossier. L'historique n'étant pas disponible, nous ne pouvons qu'en faire la supposition.

Tableau 4.7 Résultats des régressions sur l'ICG moyen des ponceaux. (t_{stat}) Significativités : $*p < 0.10$, $**p < 0.05$, $***p < 0.01$

Variable	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 3	Modèle 4
age	-0,012*** (-88,24)	-0,03*** (-76,88)	-0,029*** (-75,00)	-0,03*** (-75,06)
log(age)	-	0,39*** (36,38)	0,394*** (35,43)	0,39*** (39,51)
Béton armé	-	-	0,01 (0,24)	-
Acier	-	-	-0,01 (-0,24)	-0,02** (-2,17)
R_{aj}^2	73,39%	81,88%	81,90%	81,91 %

Synthèse partielle

L'objectif de cette analyse descriptive est d'avoir un regard global sur l'état des structures du réseau québécois. De façon générale, l'âge de la structure est la variable qui semble avoir le

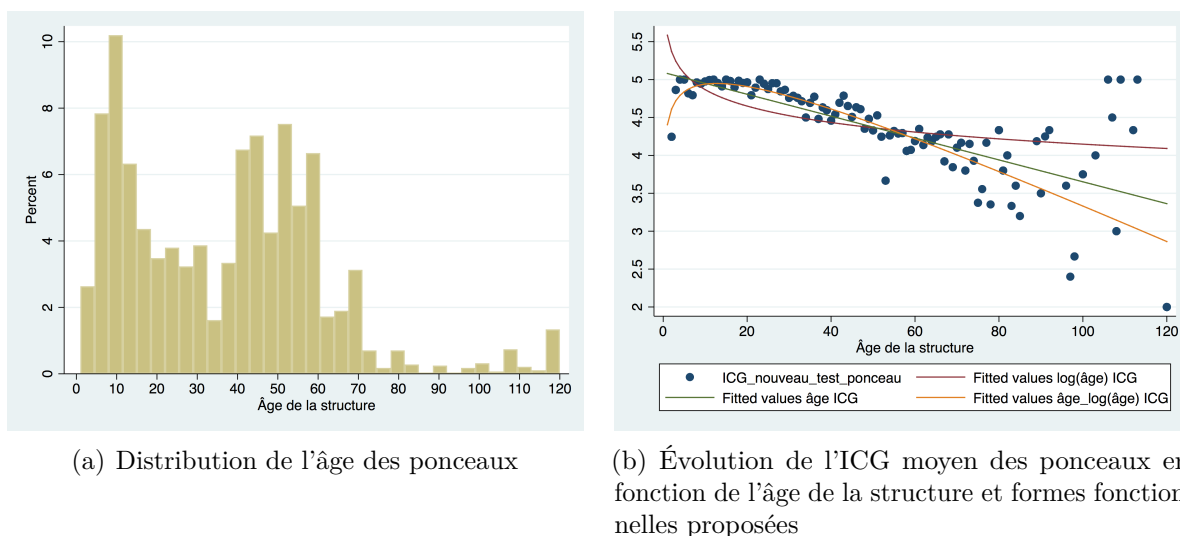


Figure 4.10 Distribution de l'âge des ponceaux (a) et de l'ICG moyen en fonction de l'âge des ponceaux (b).

plus grand pouvoir explicatif sur l'état des ponceaux. On peut néanmoins isoler des différences notables et significatives dans la moyenne de l'ICG selon la catégorie de ponceau et par son matériau même s'il y a de fortes corrélations comme le montre le Tableau 4.8 due à la construction même des groupes de variables.

Nous avons pris le temps de bien détailler cette section sur les ponceaux afin de donner un exemple de description mais nous avons décidé de regrouper les résultats concernant les ponts et portiques en Annexes B et C afin de ne pas surcharger ce chapitre de résultats. Les démarches y sont similaires.

Tableau 4.8 Matrice de corrélation des différentes variables explicatives de l'ICG moyen pour les ponceaux.

	Rect.	Circ.	Voûté	Arqué	Ellipt.	Béton armé	Acier	Polyéth.
Rect.	1,00							
Circ.	-0,08	1,00						
Voûté	-0,07	-0,03	1,00					
Arqué	-0,07	-0,03	-0,03	1,00				
Ellipt.	-0,02	-0,02	-0,01	-0,01	1,00			
Béton armé	0,85	-0,05	0,29	-0,08	-0,02	1,00		
Acier	-0,11	0,61	0,11	0,62	0,19	-0,13	1,00	
Polyéth.	-0,02	0,24	-0,01	-0,01	0,00	-0,02	-0,01	1,00

4.3 Expliquer l'ICG : quel modèle ?

4.3.1 les variables quantitatives

La base de données du MTQ offre peu de variables quantitatives continues, elles correspondent en réalité aux caractéristiques techniques de la structure :

- Son âge (age) créé à partir de l'année de construction de la structure (val_annee) ;
- Le nombre de voies que la structure surplombe (nbr_{voie}) ;
- Les coordonnées géographiques de la structure, sa longitude et sa latitude (geo_{lattd} et geo_{longt}) ;
- Ses dimensions : sa longueur de tablier val_{longr} et sa largeur hors-tout val_{largr} .

Ces données sont disponibles pour (presque) toutes les structures. De la base de données de Bruno Marmoux se sont ajoutées des variables parfois plus précises comme la longueur totale, la largeur carrossable ou le débit journalier moyen annuel. Ces variables n'étant disponibles uniquement pour les observations provenant de cette base de données, nous ne les utiliserons pas dans notre étude malgré le rôle que certaines d'entre elles peuvent jouer. Néanmoins, il est à noter que ces variables sont fortement corrélées avec celles du MTQ présentées ci-dessus :

1. La longueur totale qui n'est que la somme de la longueur de tablier val_{longr} et des longueurs d'accès au pont. La longueur de tablier est néanmoins celle qui supporte la charge du trafic ;
2. La longueur carrossable et la largeur hors-tout val_{largr} ;
3. Le Débit Journalier Moyen Annuel et la largeur hors-tout val_{largr} étant donné que plus une structure est large, c'est qu'elle surplombe une route qui a plus de voies et donc un débit de véhicules utilisant ces voies plus important. Le DJMA est donc également corrélé au nombre de voies nbr_{voie} mais la largeur hors-tout de la structure l'est également.

Nous allons ainsi effectuer une régression de l'ICG sur les caractéristiques techniques des structures et étudier leur impact sur l'ICG à travers différents modèles dont les estimations sont recensées dans le tableau ci-dessous.

Modèles 1 et 2 Dans ces modèles nous avons décidé de limiter notre approche à une régression simplement linéaire de l'ICG en fonction de l'âge. Comme nous l'avons vu dans l'exemple

Tableau 4.9 Résultats des régressions sur l'ICG (t_{stat}) Niveaux de significativités : 1%(* * *), 5%(**) et 10%(*).

Variable	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 3	Modèle 4
age	-0.01412*** (-22.61)	-0.01309*** (-31.93)	-0.02045*** (-10.76)	-0.01916*** (-16.39)
log(age)	-	-	0.21456*** (3.53)	0.17075*** (5.55)
nbr_{voie}	0.01385 (1.11)	-	0.01095 (0.87)	-
geo_{lattd}	-0.00344 (-0.36)	-0.00633 (-0.85)	-0.00584 (-0.62)	-0.00949 (-1.27)
geo_{longt}	0.00037 (0.08)	-0.00171 (-0.49)	0.00141 (0.31)	-0.00093 (-0.27)
val_{longr}	-8.10e-07*** (-6.94)	-7.33e-07*** (-7.42)	-8.30e-07*** (-7.12)	-7.70e-07*** (-7.81)
val_{largr}	2.41e-06* (1.89)	1.73e-06** (2.15)	2.17e-06* (1.70)	1.41e-06* (1.75)
R_{aj}^2	12.37%	17.58%	12.61%	18.03%

sur les ponceaux, il est à noter que l'on peut légitimement proposer une forme fonctionnelle logarithmique en fonction de l'âge de la structure. Cette démarche fait l'objet des modèles 3 et 4.

Nous avons ainsi dans le premier modèle proposé fait intervenir l'âge, le nombre de voies, la latitude, la longitude, la longueur du tablier et la largeur hors-tout.

L'âge a bien un effet négatif sur la valeur de l'ICG, de faible amplitude par rapport à d'autres coefficients comme celui de la latitude mais significatif à un seuil α de 1%.

La longueur du tablier a un effet négatif sur la valeur de l'ICG rendant compte de la tendance des grandes structures comme les ponts à s'abîmer davantage que les autres. Cet effet est significatif mais reste extrêmement faible.

La largeur hors-tout a, elle, avec le nombre de voies, un effet positif sur la valeur de l'ICG. Comme nous l'avons mentionné précédemment, ces variables sont représentatives du débit de voitures qui utilise la structure, ce résultat semble contredire le fait qu'une structure ayant un débit plus élevé de véhicules a tendance à être usée plus rapidement. Une explication possible est qu'une voie très fréquentée est également très contrôlée et plus inspectée et donc potentiellement plus souvent rénovée. Une étude de la fréquence d'inspection ou de

l'historique de rénovations de la structure pourrait infirmer ou non cette hypothèse. Seul la largeur hors-tout a un effet significatif même s'il est particulièrement faible.

Les variables liées à l'emplacement géographiques nous apprennent que seule la latitude a un effet négatif sur l'ICG. En effet, plus on se déplace vers le Nord, plus les structures sont dans un mauvais état ce qui semble logique étant donné que les conditions climatiques sont plus rudes lorsque l'on se déplace vers le Nord. L'effet de la longitude lui, n'a pas une amplitude très importante non plus mais est positif laissant supposer que plus on se déplace vers l'Ouest, plus les structures sont en bon état. Aucun des deux effets n'est significatif.

On décide dans le second modèle de retirer la variable liée au nombre de voies. En effet, même si ce n'est pas celle avec la p_{value} la plus élevée, c'est celle qui a l'effet négatif le plus important sur le R_{aj}^2 et donc sur l'effet explicatif du modèle. Lorsque l'on retire cette variable on constate une augmentation de 5% du R_{aj}^2 . Il est intéressant de noter également que l'effet lié à la longitude change de signe et devient négatif, inversant l'interprétation précédente selon laquelle plus on se déplace vers l'Ouest, plus l'ICG augmente. Les effets des variables géographiques ne sont toujours pas significatives et restent proches de zéro mais l'effet lié à la longitude reste négatif. Nous allons conserver ces variables parce qu'elles présentent un intérêt d'interprétation physique et de compréhension de l'évolution de l'ICG.

Modèles 3 et 4 À la vue de la Figure 4.11, nous pouvons supposer qu'une relation logarithmique existe entre l'ICG et l'âge de la structure, nous avons donc décidé de l'inclure dans les modèles 3 et 4 afin de voir si un pouvoir explicatif existe réellement.

On constate à la vue des résultats qu'il existe effectivement et qu'il est significatif mais également relativement élevé. Cela laisse supposer qu'il réussit à capter une plus grande part de la variance que les modèles 1 et 2. Comme pour le modèle 1, le nombre de voies est la variable qui a l'effet négatif le plus important sur le pouvoir explicatif du modèle et est donc retiré de l'analyse. Les coefficients gardent tous les mêmes signes que pour les modèles, respectivement, 1 et 2 et sont significatifs pour l'âge, son logarithme, la longueur et la largeur.

4.3.2 Le cas des matériaux et de la catégorie de structure

Nous allons maintenant présenter dans le Tableau D.1 les estimations des coefficients de la régression générale faisant intervenir les catégories, les matériaux et la direction territoriale

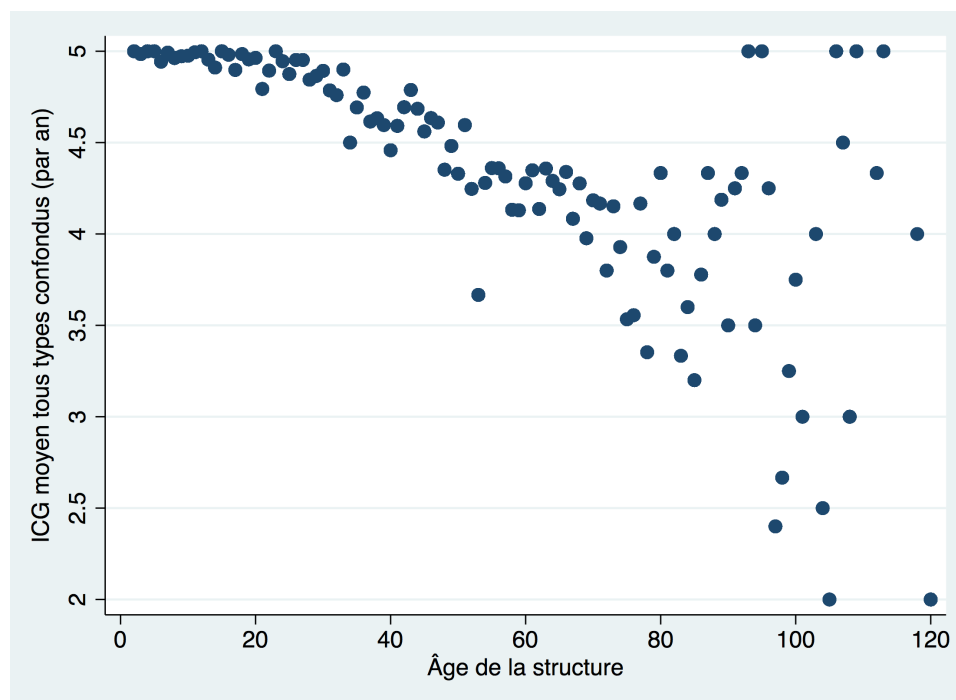


Figure 4.11 Évolution de l'ICG moyen en fonction de l'âge des structures

des structures ainsi que le fait que la structure observée soit une structure remplaçante ou pas. Le R^2_{aj} monte à 21,62% lorsque l'on ajoute donc le matériau de construction, sa catégorie de structure et la direction territoriale à laquelle elle appartient.

Remarque : Pour les variables muettes, nous avons choisi comme référence :

- "En arc" pour les ponts
- "Acier enrobé de béton" pour le matériau
- "Bas Saint-Laurent" pour la Direction Territoriale
- "Arqué" pour les ponceaux

4.3.3 Le vecteur de covariables

Dans le modèle général, nous faisons intervenir les variables catégoriques associées au matériau et à la catégorie de la structure ainsi qu'à son appartenance à une région territoriale. Notre traitement étant basé sur le remplacement d'un type de structure par une autre, les variables liées au matériau et à la catégorie de la structure peuvent être affectées par ce traitement en changeant du tout au tout. Ces variables ne peuvent donc pas être utilisées pour conditionner le traitement car contrôler pour ces deux types de variables entraînerait une colinéarité avec le traitement lui-même. (Wooldridge, 2005).

Le modèle 4 est le modèle avec la plus grande valeur explicative, nous utiliserons ces variables de caractéristiques de la structure observée pour conditionner le traitement. Notre vecteur X de variables se résumera donc aux variables du modèle 4.

4.3.4 Test de robustesse pour l'interprétation des variables géographiques

Outre l'interprétation liée au climat, on peut supposer que l'état des infrastructures se dégrade lorsque l'on s'éloigne des grands centres d'entretien nationaux, en particulier celui de la région de Montréal. On peut donc légitimement se demander si nos résultats sont toujours robustes à l'exclusion de la région de Montréal. Le Tableau 4.10 nous donne les résultats de ce test de robustesse. On constate que les coefficients associés aux variables géographiques sont d'amplitude similaire, ont gardé les mêmes signes et l'estimation associée à la latitude est devenu significatif à 5%. Ce résultat vient donc corroborer l'interprétation selon laquelle plus on se dirige vers le Nord plus les conditions climatiques sont rudes et impactent l'état des structures.

On néanmois également faire le raisonnement inverse selon lequel, Montréal étant la région la plus fréquentée par les véhicules voit ses structures endommagées par le débit journalier plus violemment que sur le reste du territoire québécois, expliquant ainsi les résultats du Tableau 4.10.

Tableau 4.10 Résultats du test de robustesse à l'exclusion de la région de Montréal des régressions sur l'ICG (t_{stat}) Niveaux de significativités : 1%(* * *), 5%(**) et 10%(*).

Variable	Modèle 4
age	-0.0192373*** (-16.13)
log(age)	0.1752723*** (5.61)
geo_{lattd}	-.0162112** (-2.14)
geo_{longt}	-0.0012142 (-0.36)
val_{longr}	-3.95e-07*** (-2.98)
val_{largr}	2.44e-06** (2.47)
R_{aj}^2	17.81%

4.4 Caaractérisation des traitements

4.4.1 Rappel de la démarche

L'objectif général est d'essayer d'étudier les effets sur l'état de la structure de remplacer une structure d'un type i par un autre type j considéré comme nouveau ou "innovant" contre la remplacer par une structure du même type $j = i$.

Nous allons donc tout d'abord effectuer une analyse descriptive des caractéristiques des types remplacés et de leurs remplaçants et essayer de déterminer des couples "type remplacé/type remplaçant".

Comme mentionné dans le Chapitre 3, la démarche économétrique est de définir une variable muette qui correspondra à l'affectation au traitement. Nos affectations ne sont donc pas aléatoires et répondent à la méthode d'une démarche quasi-expérimentale. Dans notre situation donc, on va utiliser la notion de traitement pour caractériser les situations suivantes :

$$D = \begin{cases} 1 & \text{si la structure est remplacée par un type nouveau} \\ 0 & \text{si elle est remplacée par le même type.} \end{cases} \quad (4.1)$$

Notre groupe de contrôle sera donc constitué des structures qui ne sont remplacées que par des structures du même type tandis que le groupe test sera constitué des structures remplaçantes d'un certain type considéré comme innovant.

On calculera ainsi l'Average Treatment Effect (ATE) et l'Average Treatment Effect on the Treated (ATET) pour chacun des traitements avancés en contrôlant à chaque fois pour les caractéristiques X des observations. On essaiera ainsi de vérifier si nos hypothèses de remplacement dans un type innovant sur l'état des structures est vérifié ou non et on essaiera d'expliquer les résultats.

Dans certaines situations, la qualité des données pourra poser problème et il se peut que nous ne soyons pas apte d'observer des valeurs d'ICG sur la plage de temps de la base de données des structures remplacées, c'est-à-dire de 1990 à 2019. Dans ce cas, le traitement que nous avons proposé ci-dessus ne pourra pas être efficace vu qu'aucune valeur d'ICG ne pourra être recueillie pour le groupe de contrôle ou le groupe test. Il faut ainsi essayer de contourner ce problème.

L'une des solutions que nous proposons est de nous référer aux statistiques descriptives des couples "type remplacé/type remplaçant" et d'essayer d'extrapoler un possible remplacement antérieur à la période 1990-2019. On ne considérerait alors plus l'effet de remplacer dans un type plutôt qu'un autre mais simplement de construire dans un type plutôt qu'un autre sur l'état des structures. Cette démarche, bien que plus faible dans sa formalisation, nous permettrait alors de tout de même souligner un effet sur l'ICG de construire dans des matériaux que l'on aura considéré comme nouveaux ou "innovants" par rapport à construire dans des types qui peuvent être de moins en moins utilisés par exemple. Le traitement devient alors :

$$D = \begin{cases} 1 & \text{si la structure est construite dans un type nouveau innovant} \\ 0 & \text{si elle est construite par un type disparaissant ou de moins en moins utilisé.} \end{cases} \quad (4.2)$$

Nous pourrions prévoir, à la vue des données disponibles, lequel de ces traitements sera employable ou pas. Une troisième et dernière approche sera la méthode d'appariement par score de propension dont les considérations théoriques ont été rappelées au Chapitre 3. Ici,

au lieu d'apparier directement sur le traitement, nous allons apparier sur la probabilité pour l'observation de recevoir le traitement. Le traitement sera donc le même que pour le premier décrit ci-dessus mais l'appariement des observations des groupes de contrôle et test se fera sur la base de ce score de propension $p = \mathbb{P}(D_j = 1|X)$ qui n'est autre que la probabilité pour l'observation i de recevoir le traitement lorsque l'on contrôle pour ses caractéristiques.

La crédibilité de la constitution de nos groupes se fera donc sur cette méthode et on pourra estimer les ATE et ATET.

4.4.2 Comment caractériser le remplacement par un autre type ?

Nous allons considérer la situation du traitement général donné en Équation 4.1.

Afin de mettre en place nos méthodes économétriques d'estimation d'effet de traitement, nous allons calculer les scores de propensions liés à ce traitement, c'est-à-dire les probabilités que l'observation considérée i soit remplacée par un autre type $j \neq i$.

Pour calculer ces probabilités, nous allons donc utiliser un modèle logistique de régression. Il nous faut donc déterminer des variables indépendantes qui ont un effet sur le fait que la structure soit remplacée par un autre type ou non. Ce travail de sélection de variable est important car il va nous permettre de créer un vecteur de covariables qui serviront de prédicteurs à l'assignement du traitement et va être à la base du calcul des scores de propensions, scores que nous utiliserons par la suite pour mettre en place notre méthode d'appariement et évaluer l'effet de ce traitement sur l'ICG. Nous allons ainsi examiner les associations bivariées entre le traitement et des variables indépendantes d'intérêt en utilisant des régressions logistiques.

4.4.3 Analyse bivariée

Le Tableau E.1 représente les relations bivariées entre les différentes variables des structures remplacées et la probabilité pour ces structures d'être remplacées par un type autre que leur type initial. Nous avons calculé ces coefficients par l'intermédiaire des modèles Probit et Logit.

Caractéristiques de la structure Le Tableau E.1 montre que plus la structure est ancienne, plus elle a de chance d'être remplacée par un autre type que le sien (coefficient positif significatif). Plus la structure est longue et large, plus elle augmente sa chance d'être remplacée par un autre type de manière significative malgré une amplitude relativement faible.

Localisation géographique Les coefficients étant négatifs et significatifs pour la latitude et la longitude, plus on se dirige vers le Nord et l'Est du Québec, plus les structures remplacées

ont de chance de garder leur type.

Catégorie de structure Lorsqu'un pont est remplacé, il a une chance significative d'être remplacé par un pont du même type. À l'inverse, les ponceaux ont une chance significative de recevoir le traitement, *i.e* d'être remplacé par un autre type de structure. Les portiques également mais pas de façon significative.

Matériau de construction Lorsqu'une structure est construite en béton armé et qu'elle est remplacée, elle augmente significativement sa chance d'être remplacée par une structure d'un autre type (n'importe quel autre type). Cela ne veut néanmoins pas dire qu'elle changera de matériau ; en effet, étant donné que le type est l'association d'une catégorie et d'un matériau, la structure i peut être remplacée par un type j en béton armé mais d'une autre catégorie. Ce résultat est le même pour l'acier même si l'amplitude des coefficients est deux fois moindre. À l'inverse, lorsqu'une structure est construite en couple acier-bois, elle a une chance significative d'être remplacée par une structure du même type. Cela est principalement dû au fait qu'il n'existe qu'un type lié au couple acier-bois, le type « 45 - Pont acier bois ». Ce type représente à lui seul presque un tiers des structures remplacées et le fait que ces structures aient une chance significative d'être remplacées par une même structure peut donner une indication sur son utilité dans le réseau québécois.

Les structures construites en béton précontraint ont également plus de chance d'être remplacées par une structure du même type mais ce résultat n'est pas significatif.

Direction Territoriale L'appartenance à une direction territoriale particulière semble jouer un rôle significatif sur le fait que la structure soit remplacée ou non par une structure d'un autre type. Ainsi, que la structure soit construite dans la région de Montréal, en Centre-Québec, en Côte-Nord, en Capitale-Nationale, en Montérégie et en Estrie augmente significativement la probabilité qu'elle soit remplacée par un type différent. Ce résultat est le même pour la Mauricie mais n'est pas significatif.

À l'inverse, être construite en Gaspésie, dans le Bas-Saint-Laurent, en Chaudière-Appalaches, dans le Saguenay ou en Laurentides-Lanaudière, augmente significativement la chance qu'une structure soit remplacée par une structure du même type. Ce résultat est le même pour l'Abitibi-Témiscamingue mais n'est pas significatif.

4.4.4 Analyse multivariée

Le Tableau E.2 en Annexe E nous donne les résultats de la régression logistique multivariée lorsque tous les facteurs présentés précédemment sont considérés.

Caractéristiques de la structure L'âge reste une covariable significative et son signe ne change pas ; ainsi plus une structure est âgée, plus elle a de chance d'être remplacée par une structure d'un type différent à l'inverse de la longueur (coefficient négatif non significatif).

Localisation géographique Dans ce cas, le coefficient de régression pour la latitude change de signe ; plus on se déplace vers le Nord, plus on augmente significativement sa chance d'être remplacé par son type initial (de façon non significative).

Catégorie de structure Ici, comme précédemment, être un pont a un effet positif non significatif sur la probabilité d'être remplacé par un type nouveau. À l'inverse, être initialement un ponceau réduit cette probabilité de façon significative contrairement à l'analyse bivariée.

Matériau de construction Le fait d'être une structure en béton armé a un effet positif (non significatif) sur la probabilité de voir son type changer lors du remplacement. À l'inverse, les structures en acier et les types 45-Ponts acier-bois ont un effet négatif (significatif et de grande amplitude pour ce dernier) sur le remplacement par un nouveau type.

Direction territoriale Ici, un certain nombre de coefficients ont vu leur signe changer : celui de la Gaspésie, Chaudière-Appalaches, Mauricie, Capitale Nationale et l'Outaouais. Le seul effet qui reste néanmoins significatif et de forte amplitude est celui de la direction de l'Estrie.

4.4.5 Détermination des covariables

Pour le cas de traitement général donné à l'Équation 4.1, nous allons pouvoir sélectionner les variables qui créeront notre vecteur de covariables pour le calcul des scores de propension. Ces scores de propension seront calculés uniquement via ces variables au travers d'une régression logistique comme nous venons de le faire. L'analyse bivariée nous permet d'apprécier les relations directes entre affectation au traitement et certaines variables indépendante et ainsi de se faire une idée sur l'évolution de la probabilité de remplacement lorsque l'on modifie certaines variables (continues notamment).

Néanmoins, l'analyse multivariée est celle qui a le plus de poids et celle que l'on doit considérer

dans la détermination du vecteur de covariables étant donné que toutes les variables sont prises en compte en même temps ; ce qui est réellement le cas pour les structures puisqu'elles ces variables correspondent à leurs caractéristiques. Ainsi, à la vue des résultats de la régression logistique multivariée, notre vecteur de covariables comportera donc toutes les variables significatives du Tableau E.2 à savoir : l'âge de la structure, le contrôle pour sa catégorie de ponceau, pour le matériau acier/bois ainsi que la variable muette d'appartenance à l'Estrie. Nous ajouterons aussi les caractéristiques géographiques et de dimension de la structure : les variables liées à la latitude et longitude ainsi que celles liées à la longueur et la largeur. Ces variables ont le mérite d'être continues et également d'être conservées dans le modèle pour l'ICG. Elles nous permettront de faire des commentaires plus larges et de présenter des interprétations lors des estimations d'effets aux sections suivantes. Nous reviendrons sur ce vecteur plus précisément lors du contrôle de balancement des scores de propension.

4.5 Détermination des types pour l'étude

4.5.1 Caractérisation des types disparus

Il est ainsi intéressant de considérer les dates de première et de dernière construction relevées pour un type particulier. Étant donné que nous avons restreint notre étude en retirant les observations de 1800 à 1899, les valeurs présentées dans le Tableau 4.11 de dates de premières construction relevées ne sont pas bonnes pour certains types. Ainsi, les types 12 et 13 apparaissent en 1800, le 44 en 1844, le 19 en 1850, les 67 et 45 en 1861, le 65 en 1879, le 61 en 1887, le 46 en 1889, le 63 en 1890, le 62 en 1891 et le 85 en 1898.

Il est donc délicat de définir l'apparition d'un type de structure par son apparition dans la base de données, l'étude graphique prend alors tout son sens parce que l'on va plutôt s'intéresser à son utilisation par la suite. Par exemple, le type "74 - Pont à tablier intermédiaire, acier" apparaît en 1933 et l'on ne va construire que 3 fois jusqu'en 1967 date de la dernière construction en ce type recensé. Statistiquement, ces types ne vont pas nous apporter beaucoup d'information. La fréquence d'observations va donc jouer un rôle très important dans la décision de sélection d'un type pour étude afin que l'on puisse tirer des conclusions pertinentes de nos analyses statistiques.

On va, par ailleurs, pouvoir caractériser la disparition d'un type en fonction de l'année de construction de sa dernière observation ; nous avons ainsi coloré les cellules des types pour lesquels aucune observation n'a été recensée depuis 2000, soit depuis près de 20 ans et allons pouvoir considérer que ce type s'est éteint. Nous allons ainsi croiser ces types considérés comme disparus avec les informations de la base de données des structures remplacées pour voir par quoi ces structures seront remplacées.

Remarque : Tous les types remplacés ne sont pas forcément disparus. Ainsi on pourra considérer de façon exhaustive que les types suivants ne sont plus utilisés :

- 11 - Ponceau à dalle en béton armé depuis 1970 ;
- 21 - Ponceau rectangulaire en bois depuis 1970 ;
- 33 - Pont à dalle évidée en béton armé depuis 1978 ;
- 34 - Pont à dalle évidée en acier précontraint depuis 1979 ;
- 38 - Pont à béquilles, béton armé depuis 1978 ;
- 41 - Pont à poutres en béton armé depuis 1998 ;
- 50 - Pont à béquilles béton depuis 1978 ;
- 52 - Ponts à poutres en acier enrobé de béton depuis 1976 ;
- 56 - Pont à poutres-caissons en béton armé depuis 1978 ;

- 57 - Pont à poutres-caissons en béton précontraint depuis 1984.
- 65 - Pont à tablier supérieur, en acier depuis 1968 ;
- 66 - Pont en bois depuis 1939 ;
- 67 - Pont couvert depuis 1954 ;
- 71 - Pont à tablier inférieur en béton armé depuis 1932 ;
- 74 - Pont à tablier intermédiaire, acier depuis 1967 ;
- 75 - Pont à tablier supérieur, béton armé depuis 1967 ;
- 76 - Pont à tablier supérieur en acier depuis 1972 ;
- 81 - Pont suspendu depuis 1970.

Néanmoins, parmi ces types disparus, seuls les types 52, 41, 38 et 33 présentent un nombre d'observations supérieur à 100. Statistiquement, ces types seront donc les plus intéressants à étudier (en particulier le type 41).

Tableau 4.11 Dates de première et de dernière construction d'un type de structure

Type des structures	Année d'apparition	Fréquence	Dernière construction recensée
11 - Ponceau à dalle en béton armé	1900	16	1970
12 - Ponceau portique en béton armé	1900	146	2015
13 - Ponceau rectang. en béton armé	1900	1540	2018
14 - Ponceau circul. en béton armé	1907	24	2013
15 - Ponceau circulaire en acier	1900	338	2019
16 - Ponceau circ. polyéthylène	1968	24	2019
17 - Ponceau elliptique en acier	1960	30	2010
18 - Ponceau arqué en acier	1948	314	2018
19 - Ponceau voûté en béton armé	1900	281	2018
20 - Ponceau voûté en acier	1900	83	2017
21 - Ponceau rectangulaire en bois	1950	3	1970
31 - Pont à dalle pleine en béton armé	1905	521	2018
32 - Pont à dalle pleine en béton précont.	1940	43	2017
33 - Pont à dalle évidée en béton armé	1952	148	1978
34 - Pont à dalle évidée en béton pré..	1963	15	1979
35 - Portique en béton armé	1919	712	2018
36 - Port. béton armé, ss remblai	1900	376	2017
37 - Portique en béton précontraint	1970	7	2012
38 - Pont à béquilles, béton armé	1945	131	1978
39 - Pont à béquil., béton précont.	1965	8	2008
41 - Pont à poutres en béton armé	1904	1146	1998
42 - Pont à pout. béton précont., pré..	1918	939	2019
43 - Pont à pout. béton préc., coul. ..	1959	231	2015
44 - Pont à poutres en acier	1900	1147	2019
45 - Pont acier-bois	1900	2310	2019
46 - Pont à poutres en bois	1900	70	2014
47 - Portique en béton	1926	20	1978
50 - Pont à béquilles en béton	1937	31	1978
51 - Pont à béquilles, en acier	1963	9	2010

Tableau 4.11 Dates de première et de dernière construction d'un type de structure (suite et fin).

Type des structures	Année d'apparition	Fréquence	Dernière construction recensée
52 - Pont à poutres en acier enr. de ..	1910	134	1976
56 - Pont à poutres-caissons en béton..	1944	54	1978
57 - Pont à pout.-cais. en béton préc..	1963	43	1984
58 - Pont à poutres-caissons en acier	1958	41	2013
61 - Pont à tablier inférieur, en acier	1900	89	2015
62 - Pont à tablier interméd., en acier	1969	2	2016
63 - Pont de type Pony-Warren, en acier	1909	33	2017
64 - Pont de type Bailey, en acier	1955	13	2007
65 - Pont à tablier supérieur, en acier	1905	26	1968
66 - Pont en bois	1939	1	1939
67 - Pont couvert	1903	72	1954
71 - Pont à tablier infér., béton armé	1932	1	1932
72 - Pont à tablier inférieur, en acier	1935	12	2016
73 - Pont à tablier interm., béton armé	1964	2	2011
74 - Pont à tablier intermédiaire, acier	1933	3	1967
75 - Pont à tablier supér., béton armé	1918	45	1967
76 - Pont à tablier supérieur, en acier	1950	2	1972
77 - Pont à tablier supérieur, en bois	2013	1	2013
81 - Pont suspendu	1917	6	1970
82 - Pont à haubans	1964	6	2016
85 - Pont mobile	1904	15	2011

4.5.2 Quels types pour l'étude ?

Le Tableau F.1 nous donne les types de structures qui ont été remplacées depuis 1990, date à laquelle la base de données des structures remplacées présente la première structure remplaçante. Une fois encore, la répartition est très inégale et peu de types présentent plus d'une centaine d'observations. Nous allons isoler les trois qui présentent la plus grande fréquence d'observation et nous intéresser aux types par lesquels ils ont été remplacés. Ces types sont :

- 18 - Ponceau arqué en acier ;
- 41 - Pont à poutres en béton armé ;
- 45 - Pont acier-bois.

Il est intéressant de noter que parmi ces types remplacés isolés, seul les ponts à poutres en béton armé (type 41) sont considérés comme disparus selon notre définition du paragraphe précédent. Cela souligne le défaut de cette base de données de ne pas contenir l'historique des remplacements de structures. Ainsi le Tableau 4.11 ne présente que les structures encore "actives" au Québec mais n'inclut pas les démolitions, remplacements, rénovations et autres manoeuvres. Ainsi, si l'on prend l'exemple du type 33 - Pont à dalle pleine en béton armé par exemple dans lequel on ne construit plus depuis 1978, on recense seulement 12 remplacements de ce type depuis 1990 ce qui peut expliquer qu'il reste encore plus d'une centaine d'observations de ce type. Étant donné qu'il a disparu depuis 1978, on peut doré et déjà conclure qu'aucun pont à dalle évidée en béton précontraint n'a été remplacé par un autre pont à dalle évidée en béton précontraint. Tout cela nous amène à étudier par quoi ces structures ont été remplacées.

4.5.3 Structures remplaçantes

Nous allons donc maintenant nous focaliser sur les structures qui remplacent nos quatre types d'étude.

18 - Ponceaux arqués en acier Les ponceaux arqués en acier sont remplacés par neuf types différents. Néanmoins, plus de 80% des remplacements sont faits dans seulement trois types : une majorité est remplacée par des ponceaux rectangulaires en béton armé (Type 13 de loin le plus représenté des types de ponceaux), 16% par des ponceaux voûtés en béton armé (Type 19) et environ 9% par des portiques en béton armé (Type 35).

Il est à noter que la base de données générale du MTQ recense 314 observations de ponceaux arqués en acier. On peut donc considérer que les 163 structures dans ce type qui ont été remplacées recensées peuvent être considérées comme un nombre d'observations relativement conséquent.

Tableau 4.12 Répartition des types de structures remplaçant le type 18 de ponceaux arqués en acier.

Types de structures remplaçantes	Fréquence	Pourcentage (%)
13 - Ponceau rectang. en béton armé	89	54,60
15 - Ponceau circulaire en acier	3	1,84
17 - Ponceau elliptique en acier	1	0,61
18 - Ponceau arqué en acier	11	6,75
19 - Ponceau voûté en béton armé	27	16,56
20 - Ponceau voûté en acier	4	2,45
35 - Portique en béton armé	13	7,98
36 - Portique en béton armé, sous remblai	8	4,91
45 - Pont acier-bois	7	4,29
Total	163	100,00

Il est également intéressant de noter que le Type 18 est un type encore utilisé aujourd'hui et que sur les 58 constructions relevées depuis 1990, 11 sont en fait des remplacements de structures du même type.

On pourra ainsi établir un groupe de contrôle basé sur ces observations de structures remplacées par le même type et un groupe test qui prendra les observations des structures remplacées par un type considéré comme "nouveau". Le traitement prendra alors la forme :

$$D = \begin{cases} 1 & \text{si la structure est remplacée par un type nouveau} \\ 0 & \text{si elle est remplacée par le même type.} \end{cases}$$

L'étude de l'impact sur l'ICG ici se fait donc bien sur le remplacement de la structure par un certain type par rapport au type ancien. On est dans le même cas de comparaison que celui des passerelles Barr et Isabey-Darnley.

Remarque : Comme nous l'avons mentionné précédemment, la terminologie de structures "nouvelles" ou "innovantes" n'est pas à considérer comme une innovation de rupture à un temps t qui viendrait bousculer les méthodes de construction. Dans ce cas par exemple, le Type 13 - Ponceau rectangulaire en béton armé est utilisé depuis bien plus longtemps que le Type 18 (Tableau 4.11). Seul le Type 19 - Ponceau voûté en béton armé apparaît en 1965 et est postérieur à la première construction recensée de ponceau arqué en acier.

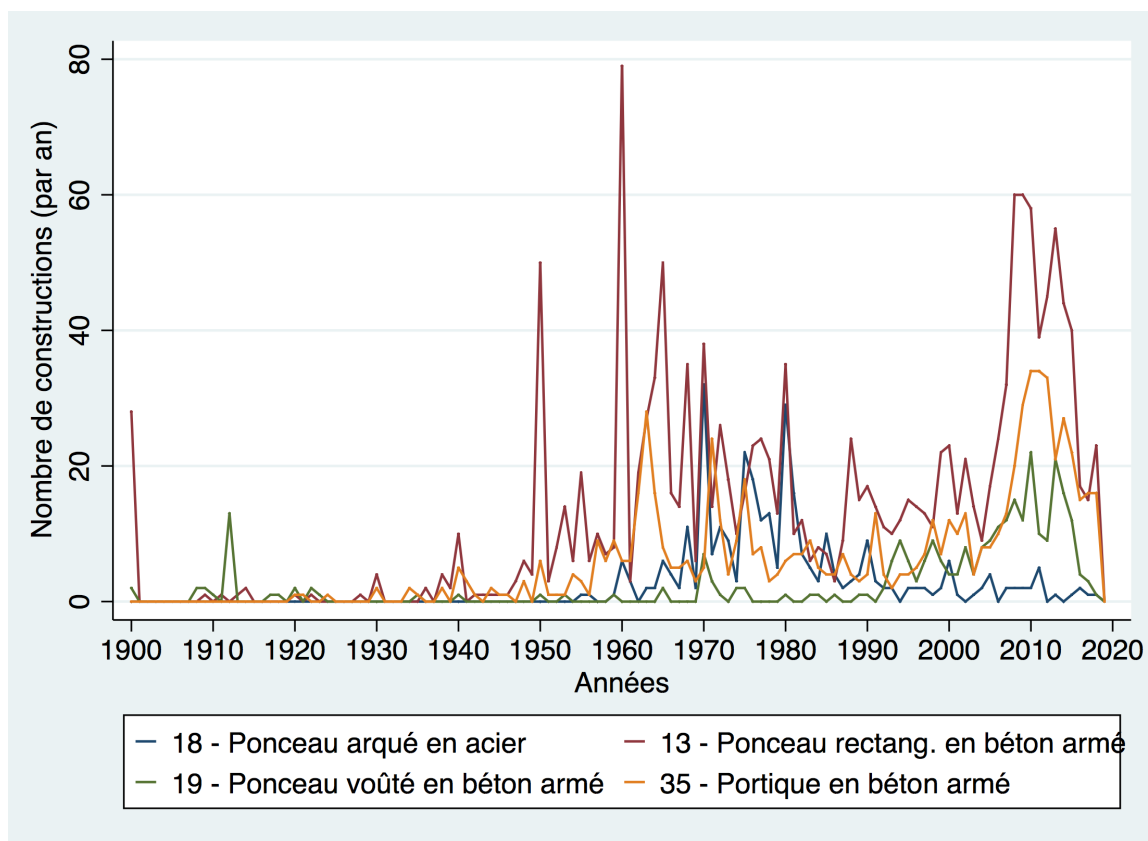


Figure 4.12 Évolution du nombre de constructions par an des ponceaux arqués en acier et de ses trois principales types de structures remplaçantes

Un constat intéressant est le fait que plus de 50% des ponceaux arqués en acier remplacés avaient initialement été construits entre 1970 et 1980 (avec notamment 17% en 1970, 7% en

1971, 9% en 1975 et 13,5% en 1980). Depuis les années 1980, le nombre de constructions de ponceaux arqués en acier diminue de manière très conséquente et ne dépasse pas les cinq observations par an depuis le début des années 1990.

41 - Ponts à poutres en béton armé Comme le montre le Tableau 4.13, trois types principaux remplacent les ponts à poutres en béton armé : les portiques en béton armé (Type 35), les ponts à poutres en béton précontraint préfabriqué (Type 55) et les ponts à poutres en acier (Type 44) qui, à eux trois, représentent environ 85% des remplacements des ponts à poutres en béton armé.

Tableau 4.13 Répartition des types de structures remplaçant le type 41 de ponts à poutres en béton armé.

Types de structures remplaçantes	Fréquence	Pourcentage (%)
13 - Ponceau rectang. en béton armé	8	3,60
19 - Ponceau voûté en béton armé	8	3,60
20 - Ponceau voûté en acier	1	0,45
31 - Pont à dalle pleine en béton armé	5	2,25
32 - Pont à dalle pleine en béton précontraint	2	0,9
35 - Portique en béton armé	63	28,38
36 - Portique en béton armé, sous remblai	4	1,8
42 - Pont à poutres en béton précontraint, préfabriqué	55	24,77
44 - Pont à poutres en acier	70	31,53
45 - Pont acier-bois	6	2,7
Total	222	100,00

Les ponts à poutres en béton armé sont parmi les types de structures les plus présents dans la base de données globale malgré le fait que l'on ne construise plus dans ce type depuis 1998 et que l'on remplace fortement par trois autres types. On commence à apprécier la chute du nombre de constructions recensées par an à partir de la fin des années 1960. Dans le même temps, le nombre de ponts à poutres en béton précontraint préfabriqué (Type 42) augmente considérablement. Les ponts à poutres en acier (Type 44) et les portiques en béton armé (Type 35) suivent la même tendance générale que les autres courbes bien qu'au début des années 2000, les ponts à poutres en acier sont construits de façon plus importante que les ponts à poutres en béton précontraint préfabriqué.

On ne peut, malheureusement, pas tirer de conclusion sur la période des années 1960-1970 juste avec des statistiques descriptives étant donné que l'on a uniquement les remplacements

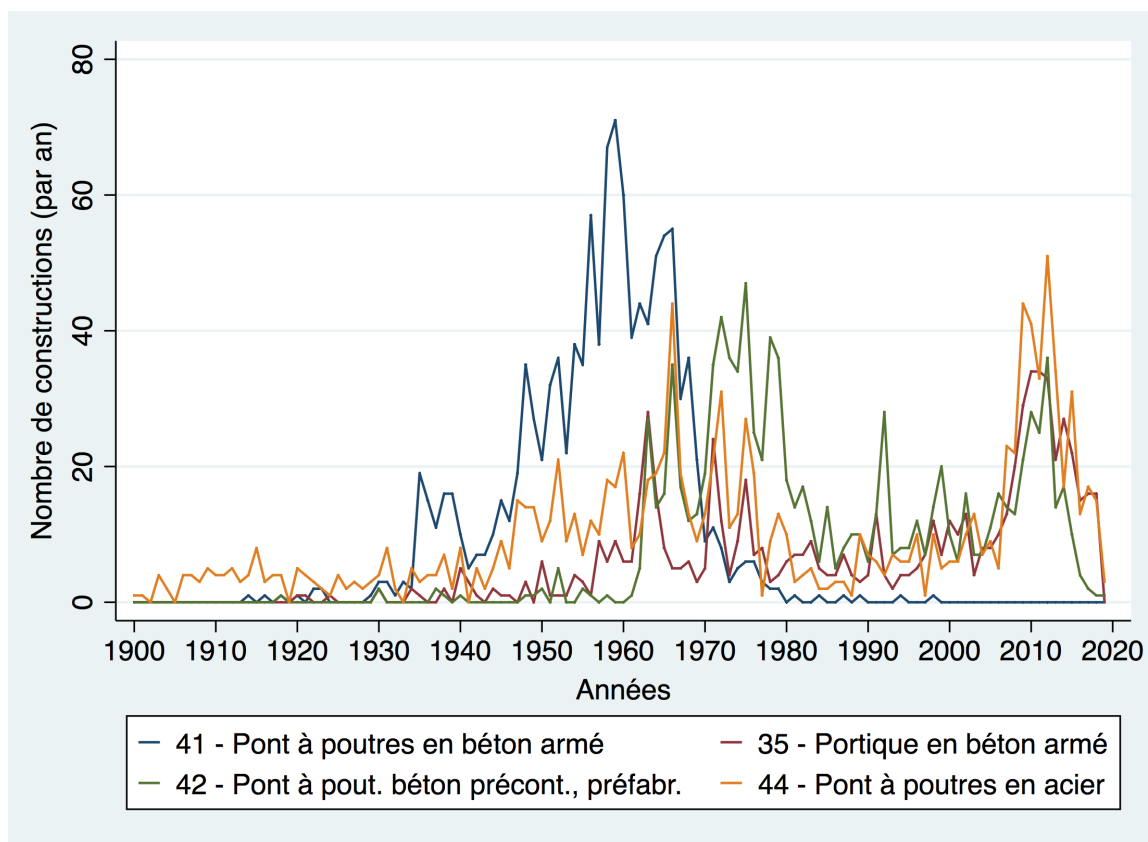


Figure 4.13 Évolution du nombre de constructions par an des ponts à poutres en béton armé et de ses trois principales types de structures remplaçantes

des ponts à poutres en béton armé de 1990 à nos jours.

Outre essayer d'évaluer le lien de causalité qui peut exister entre l'apparition d'un type et la disparition d'un autre, nous voulons essayer d'évaluer l'effet de construire dans un type considéré comme "innovant" ou de remplacement sur l'ICG par rapport à l'effet de remplacer la structure par un même type.

Le cas des ponts à poutres en béton armé est un cas qui ne permet pas de mettre en place cette démarche car, comme le montre le Tableau 4.13, dans la base de données que nous avons, aucun remplacement dans le même type n'a été relevé. Il est cependant possible d'effectuer une démarche similaire dans laquelle le traitement consistera à s'attarder sur une plage de temps particulière ; typiquement la période 1960-1975 et créer une variable dichotomique de traitement D qui capterait l'innovation de la façon suivante :

$$D = \begin{cases} 1 & \text{si l'observation est une structure de type innovant 42} \\ 0 & \text{si elle est de type 41.} \end{cases}$$

Notre groupe de contrôle serait donc simplement toutes les constructions de ponts à poutres en béton armé recensées sur cette période, tandis que notre groupe test contiendrait les constructions recensées dans la méthode considérée comme "innovante" (*i.e* les ponts à poutres en béton précontraint, préfabriqués (Type42), les portiques en béton armé (Type 35) ou les ponts à poutres en acier (Type 44)). La méthode serait employé pour chaque type, c'est-à-dire qu'il y aura un groupe test pour chaque type innovant.

On pourra de cette façon estimer l'effet d'être construit dans un certain type plus innovant plutôt qu'un autre plus "conventionnel" sur l'Indicateur de Condition Général, l'ICG.

45 - Ponts acier-bois Le cas des ponts acier-bois tend vers l'un de nos extrêmes pour lequel la proportion de structure remplaçante du même type que la structure remplacée est très importante. Ici, c'est en effet 62% des ponts acier-bois remplacés qui sont remplacés par des ponts acier-bois. Nous n'aurons ici aucune difficulté à établir notre groupe de contrôle vu la proportion d'observations recensées dans ce type.

Pour l'établissement du groupe test en revanche, il n'y a que deux types qui se dénotent en terme de fréquence : les portiques en béton armé (Type 35) avec environ 15% des structures remplacées et les ponceaux rectangulaires en béton armé (Type 13) environ 8%.

Comme le rappelle le Tableau 4.11, ces trois types font partie des types les plus employés dans la construction et représentent à eux seuls presque 40% du total des observations de la base de données. On pourra ainsi, contrairement au type 41 - Pont à poutres en béton armé, créer notre groupe de contrôle directement sur le fait que la structure soit remplacée par un pont en acier-bois (cas $D = 0$, pas de traitement) et un groupe test sur le fait que la structure soit remplacée par un portique en béton armé ou un ponceau rectangulaire en béton armé (cas $D = 1$).

Tableau 4.14 Répartition des types de structures remplaçant le type 45 de ponts acier-bois.

Types de structures remplaçantes	Fréquence	Pourcentage (%)
13 - Ponceau rectang. en béton armé	41	7,79
15 - Ponceau circulaire en acier	4	0,76
16 - Ponceau circulaire en polyéthylène	2	0,38
18 - Ponceau arqué en acier	2	0,38
19 - Ponceau voûté en béton armé	20	3,8
20 - Ponceau voûté en acier	10	1,9
31 - Pont à dalle pleine en béton armé	5	0,95
35 - Portique en béton armé	77	14,64
36 - Portique en béton armé, sous remblai	7	1,33
42 - Pont à poutres en béton précontraint, préfabriqué	10	1,9
44 - Pont à poutres en acier	19	3,61
45 - Pont acier-bois	326	61,98
46 - Pont à poutres en bois	2	0,38
63 - Pont de type Pony-Warren	1	0,19
Total	526	100,00

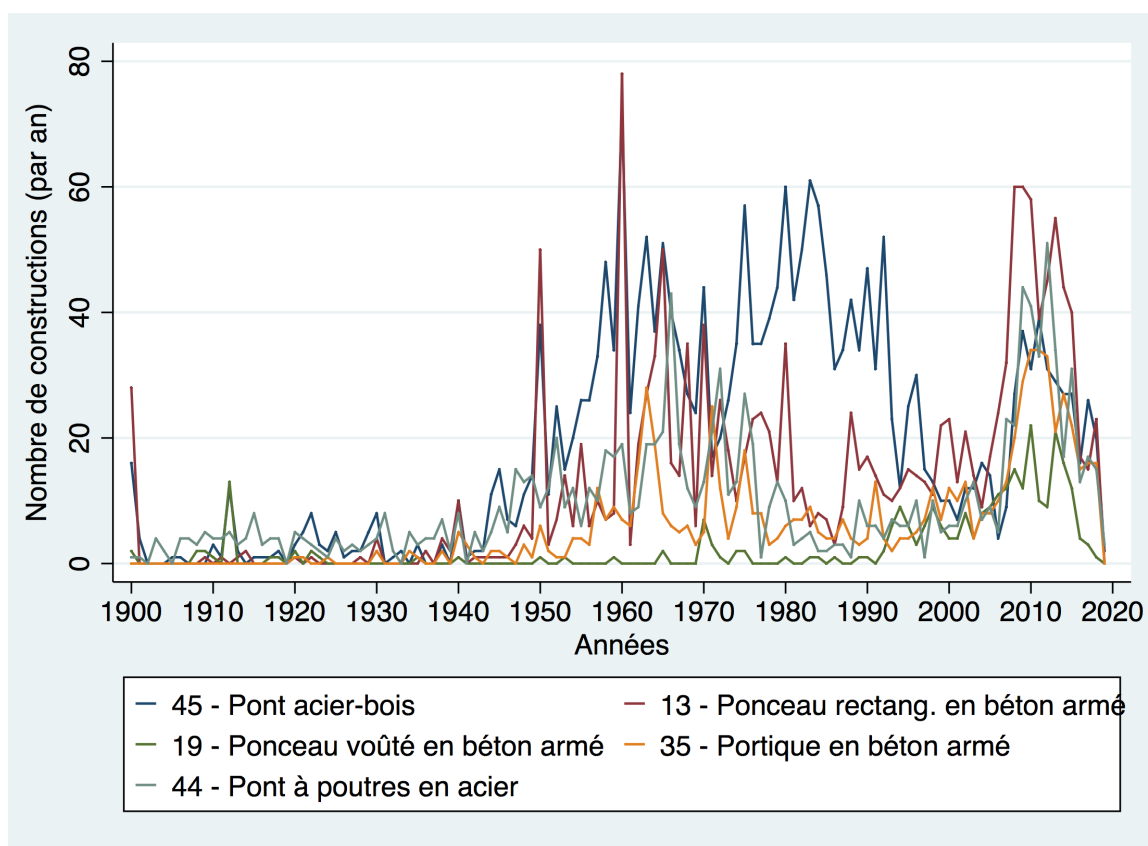


Figure 4.14 Évolution du nombre de construction de ponts acier-bois et des types qui les remplacent.

4.6 Effet du traitement : remplacer par un type "innovant"

Nous allons dans cette section essayer d'estimer les effets sur la condition générale de remplacer une structure construite dans un type particulier par une structure d'un autre type "innovant" ou nouveau, plutôt que par une structure du même type. Nous allons commencer par le cas général puis passer aux types isolés dans la section précédente, à savoir :

- Les ponceaux arqués en acier (Type 18) ;
- Les ponts acier-bois (Type 45).

Nous allons à chaque fois établir pour chacun des types deux groupes régis par traitement défini de la façon suivante :

$$D_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{si } i \neq j, \\ 0 & \text{si } i = j. \end{cases}$$

avec i le type de la structure remplacée et j le type de la structure remplaçante.

Les ponts à poutres en béton armé (Type 41) sont des structures dans lesquelles on ne construit plus depuis 1998 et sur la période 1990-1998, aucune construction de ce type n'a servi à en remplacer une plus ancienne. Nous ne pourrons donc pas mettre en place cette démarche mais étudierons ce cas dans la section suivante.

4.6.1 Cas général

Pour le cas général décrit en Équation 4.1, nous avons isolé un vecteur de covariables $X_{tr.} = [\text{âge}, \text{longr}, \text{largr}, \text{latitude}, \text{longitude}, \text{ponceau}, \text{acier} - \text{bois}, \text{estrie}]$ qui décrivent l'affectation au traitement. Ces variables vont donc être utilisées pour calculer la probabilité de recevoir le traitement, ici d'être une structure remplacée par une structure d'un type autre que le sien.

Nous allons estimer les effets de ce traitement sur l'ICG en utilisant les données observationnelles au travers de deux techniques d'estimation :

- Par ajustement régressif sur la variable dépendante, ici l'ICG (RA) ;
- Pondération par les probabilités inversées (IPW) ;
- Pondération par les probabilités inversées avec ajustement par régression (IPWRA).

La dernière méthode d'estimation a l'avantage d'être une technique doublement robuste : comme nous l'avons mentionné au Chapitre 3, référencer correctement l'affectation au traite-

ment ou le modèle de la variable dépendante devrait suffire à avoir un résultat robuste.

Il est délicat de spécifier correctement le modèle relatif au traitement et il est nécessaire d'évaluer le balancement entre les deux groupes traités et de contrôle. Ce sont ces problématiques que nous allons étudier dans le cas général et qui nous seront utiles pour la méthode d'appariement par score de propension par la suite.

Contrôle du balancement

Comme nous l'avons mentionné au Chapitre 3 - Méthodologie, l'un des intérêts de la méthode IPW est qu'elle permet d'utiliser le plus d'observations possible contrairement aux méthodes d'appariement.

Nous avons déjà étudié l'effet de covariables sur le traitement en 5.4, cette méthode va donc calculer les scores de propension en contrôlant pour ces covariables grâce à un logit :

$$p_k = \mathbb{P}(D_k = 1|X_k) = \frac{e^{\beta \cdot X_k}}{1 + e^{\beta \cdot X_k}}$$

On calcule par la suite les poids associés via la formule :

$$w_k = \frac{D_k}{p_k} + \frac{(1 - D_k)}{(1 - p_k)}$$

où D_k est égal à 1 si l'observation est dans le groupe de traitement, 0 sinon et p_k est la valeur du score de propension de l'observation k .

On va ainsi vérifier que la propriété de balancement est bien vérifiée en appliquant les poids calculés aux scores de propension et en étudiant graphiquement la densité estimée des probabilités prédites qu'une structure remplacée par son type soit remplacée par son type et la densité estimée des probabilités prédites qu'une structure remplacée par un autre type soit remplacée par une structure de son type. Ces graphiques sont représentés en Figure 4.15.

On constate ainsi que lorsque l'on considère le vecteur de covariables X complet (significatives ou non) du Tableau E.2 (Figure 4.15(a)) comme lorsque l'on considère simplement les variables significatives (Figure 4.15(b)), les densités de probabilités des prédites qu'une structure du groupe de traitement (*i.e* remplacée par un autre type) soit remplacée par une structure du même type ont la plus grande part de leur masse proche de 0. La densité estimée des probabilités prédites qu'une structure du groupe de contrôle (*i.e* soit remplacée par une

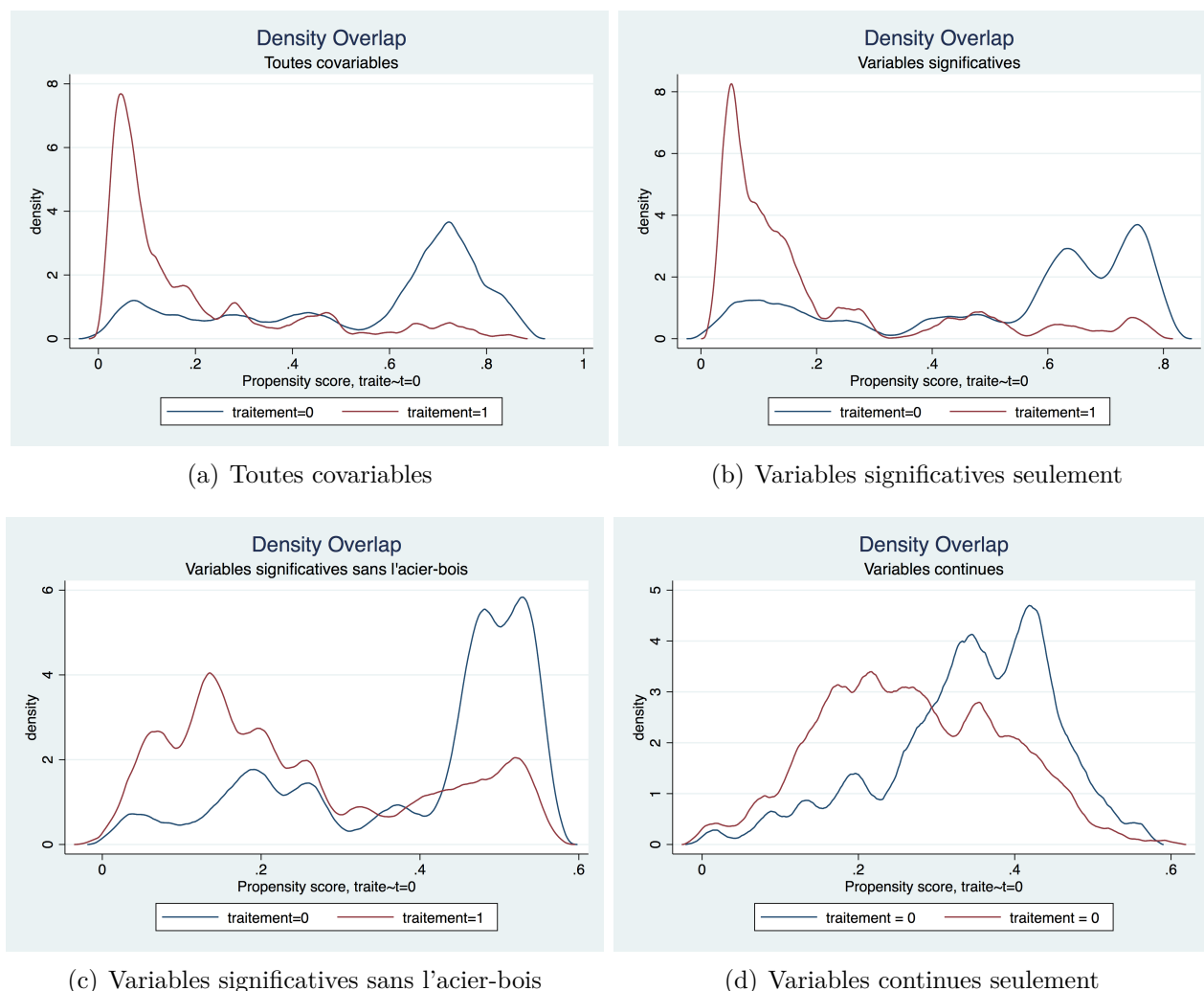


Figure 4.15 Densité estimée des probabilités prédites qu'une structure remplacée par un même type le soit réellement et qu'une structure remplacée par un nouveau type soit remplacée par son type initial en contrôlant pour toutes les covariables (a), les covariables significatives (b), les covariables significatives sauf l'acier-bois (c) et les covariables continues seulement (d)

structure du même type) soit effectivement remplacée par une structure du même type n'a pas toute sa masse véritablement autour de 1 mais une grande partie entre 0.6 et 0.8.

Comment interpréter cela ? Cette représentation graphique laisse supposer qu'un individu du groupe de traitement a très peu de chance d'être effectivement remplacé par une structure du même type lorsque l'on contrôle uniquement pour ces covariables. Nous avons vu que la proportion de types "45-Ponts acier-bois" dans notre échantillon de structures remplacées avait un poids non négligeable et, on peut se demander si lorsque l'on évite de contrôler pour

ce type en particulier, les autres caractéristiques ne peuvent pas capter plus efficacement les effets de cette variable afin d'avoir un balancement plus crédible.

C'est cette démarche qui est menée à la Figure 4.15(c). On constate effectivement que les densités de probabilités sont plus faibles pour le groupe de traitement et plus étalées sur l'intervalle $[0;0.2]$. On observe par contre une augmentation de la densité de probabilité du groupe de contrôle sur l'intervalle $[0.4;0.6]$. La propriété de balancement semble déjà plus vérifiée dans ce cas.

La dernière représentation donnée en Figure 4.15(d) nous donne les évolutions des densités estimées des probabilités lorsque seules les variables continues et qui ne changeront pas après l'effet du traitement sont considérées à savoir $X = [\text{âge}, \text{longueur}, \text{largeur}, \text{latitude}, \text{longitude}]$. Ces variables sont également des covariables de la variable dépendante, l'ICG. On constate à présent que les tendances sont beaucoup plus similaires que dans les précédentes situations et avec des écarts de densité plus faibles que précédemment.

Ainsi, les représentations graphiques des deux premiers vecteurs de covariables pour le traitement montrent des densités de probabilités qui ne suivent pas réellement les mêmes tendances et ne laissent donc pas supposer une propriété de balancement vérifiée. Nous retiendrons comme vecteur de covariables $\mathbf{X}^*$ les variables continues rappelées au paragraphe précédent et allons donc pouvoir procéder aux estimations des effets du traitement général sur l'ICG. Il est bon de noter qu'il est préférable de choisir des variables qui ont, dans l'idéal, un effet sur le traitement mais également sur la variable dépendante. Inclure une variable qui a un impact sur la variable dépendante, sur *l'outcome*, a tendance à réduire les biais parce qu'implicitement, il y a une probabilité non négligeable qu'une variable ayant un impact sur la variable dépendante en ait également un sur le traitement. Dans l'idéal, il faudrait ajouter le plus de variables ayant un effet sur *l'outcome* lorsque l'on est en mesure de grandes bases de données avec, notamment, un grand nombre de variables continues. Ce n'est pas notre cas ici et ajouter des variables en trop grand nombre avec le risque qu'elle n'ait pas un effet réellement appréciable sur *l'outcome* risque de biaiser nos estimations de l'effet du traitement. Il faut également éviter d'utiliser comme covariables des variables qui risquent de changer avec le traitement ce qui n'est pas notre cas ici.

Estimations des effets

Les résultats des différentes approches sont donnés par le Tableau 4.15. On peut constater que, dans notre cas, la méthode d'estimation de l'effet du traitement n'a pas d'impact sur le

signe de l'estimation. Le coefficient estimé est positif pour toutes les méthodes laissant alors exprimer le fait que remplacer une structure par une structure d'un autre type aurait un effet positif sur l'ICG et donc sur l'état des structures par rapport au fait de remplacer la structure par une structure du même type. Aucun des trois résultats n'est cependant statistiquement significatif, pour l'ATE comme pour l'ATET.

Il est donc à ce stade difficile de trancher sur une interprétation particulière de l'effet de remplacer une structure par une autre d'un type différent.

Tableau 4.15 Résultat des estimations des effets sur l'ICG de remplacer dans un type nouveau plutôt que dans le même type.

	Ajust. Régr.	IPW	IPWRA
ATE	.0049658	.1558843	.1030616
Rbst.Std. Err	.0075393	.3096759	.134442
$P > z $	0.510	0.615	0.443
$Pmeans_0$	4.979418	4.829073	4.881982
$Pmeans_1$	4.984384	4.984957	4.985044
ATET	.0030764	.1979652	.1104459
Rbst.Std. Err	.0072572	.3749694	.1208447
$P > z $	0.672	0.598	0.361
$Pmeans_0$	4.981509	4.786621	4.87414

Le tableau donne les estimations des effets sur l'ICG de remplacer une structure dans un nouveau type plutôt que dans le même type sur la période 1990-2019. Les covariables du modèle de la variable dépendante (l'ICG) contrôlent pour l'âge de la structure, sa longueur ainsi que les données géographiques de la structure. Celles du modèle d'attribution correspondent au vecteur $\mathbf{X}^*$ de variables significatives précisé précédemment.

Il y a 429 observations dans le groupe de contrôle ($D = 0$), 1026 dans le groupe test ($D = 1$).

Nous comparerons ainsi nos résultats avec la méthode d'appariement par score de propension qui elle associe les observations des groupes de contrôle et de traitement sur le score de propension calculé.

Appariement par score de propension

Afin de palier à cette problématique de constitution des groupes, l'une des approches est donc d'utiliser la méthode d'appariement par score de propension qui utilise comme base la probabilité p de recevoir le traitement pour constituer les groupes et mener l'étude.

Comme nous l'avons vu précédemment, le choix des covariables est une étape délicate de la démarche d'appariement par score de propension.

En effet, ce sont à partir de ces covariables que le score de propension va être calculé, il faut

que ces variables permettent un balancement du score de propension. Augmenter le nombre de variables indépendantes liées à *l'outcome*, ici l'ICG a tendance à diminuer le biais. Néanmoins, dans notre cas, l'ICG est défini par peu de variables continues et comme nous l'avons déjà expliqué, concaténer des variables uniquement liées à l'ICG et non pas au traitement lui-même peut biaiser les estimations des effets du traitement indirectement, via le score de propension lui-même.

Nous allons donc reprendre le même vecteur de variables continues $\mathbf{X}^*$ spécifiée à cette section pour l'étude de l'appariement par score de propension. Avant appariement, les distributions des scores de propensions étaient donc donnés par la Figure 4.15(d).

Le balancement est atteint et nous allons à présent procéder à l'appariement en comparant trois méthodes différentes :

- Du plus proche voisin ;
- Des trois plus proches voisins ;
- de Kernel.

Nous allons tester l'égalité des moyennes entre groupe de traitement et groupe de contrôle une fois appariés afin de choisir la méthode d'appariement la plus appropriée. Les résultats sont présentés au Tableau 4.16.

Ce qu'il faut comprendre de ce tableau c'est qu'on ne veut pas de différence significative entre les deux groupes de contrôle et de traitement. Dans le cas de l'appariement par score de propension via la méthode du plus proche voisin, on constate que pour la variable relative à la latitude, les moyennes du groupe de contrôle et groupe test sont significativement différentes à un seuil de contrôle de 90%. On essaie alors d'apparier non plus à un plus proche voisin mais trois et étudions la significativité.

À présent, la différence entre groupe test et groupe de contrôle pour la latitude n'est plus significative, toutes les moyennes de chaque variable ne sont donc pas statistiquement différentes entre le groupe de contrôle et le groupe test. On peut donc apparier par score de propension via la méthode des trois plus proches voisins.

La même étude de significativité est menée pour la méthode de Kernel et on peut ainsi constater qu'aucune différence n'est significative pour aucune covariable non plus, nous allons ainsi pouvoir apparier par score de propension via la méthode de Kernel. La pondération donnée à l'observation de la structure non traitée j a donc un effet global positif sur l'appariement.

Tableau 4.16 Tableau des différences moyennes des variables par groupe et par méthode d'appariement.

Variable	<u>NN match</u>		<u>NN (3) match</u>		<u>Kernel</u>	
	Traités	Contrôle	Traités	Contrôle	Traités	Contrôle
Âge	11.179	11.381	11.179	11.183	11.179	11.055
t	-0.73		-0.27		0.46	
$P > t $	0.467		0.798		0.647	
Longueur (m)	30.236	29.850	30.236	29.679	30.236	28.754
t	0.28		0.41		1.10	
$P > t $	0.779		0.680		0.270	
Largeur (m)	10.701	10.481	10.701	10.669	10.701	10.325
t	0.65		0.16		1.12	
$P > t $	0.516		0.879		0.262	
Latitude	46.616	46.513	46.616	46.54	46.616	46.534
t	1.85		1.35		1.48	
$P > t $	0.065		0.178		0.139	
Longitude	-71.638	-71.761	-71.638	-71.794	-71.638	-71.829
t	0.99		1.27		1.52	
$P > t $	0.322		0.206		0.127	

Nous vérifions le balancement des scores de propension après appariement en les représentant en Figure 4.16.

On constate ainsi qu'ils sont appariés de façon plutôt convenable mais que quelques observations ont été exclues parce qu'elles ne faisaient pas partie du support commun. Ces observations sont au nombre de 12 et viennent toutes du groupe test. Sur les 1038 observations de ce groupe originellement, seulement 1026 vont donc réellement être considérées. Les observations du groupe de contrôle sont, elles, au nombre de 429. Les résultats de l'effet sur l'ICG de l'appariement par score de propension par les méthodes de trois plus proches voisins et par méthode de Kernel, eux, sont donnés par le Tableau 4.17.

On peut ainsi constater que la différence estimée par les deux méthodes est positive suggérant que remplacer une structure par un autre type a un effet positif sur l'ICG et donc l'état de la structure rejoignant alors les résultats trouvés par les méthodes d'estimation au Tableau 4.15. Néanmoins, la valeur estimée est plus faible pour la méthode de Kernel et aucune des deux estimations n'est statistiquement significative.

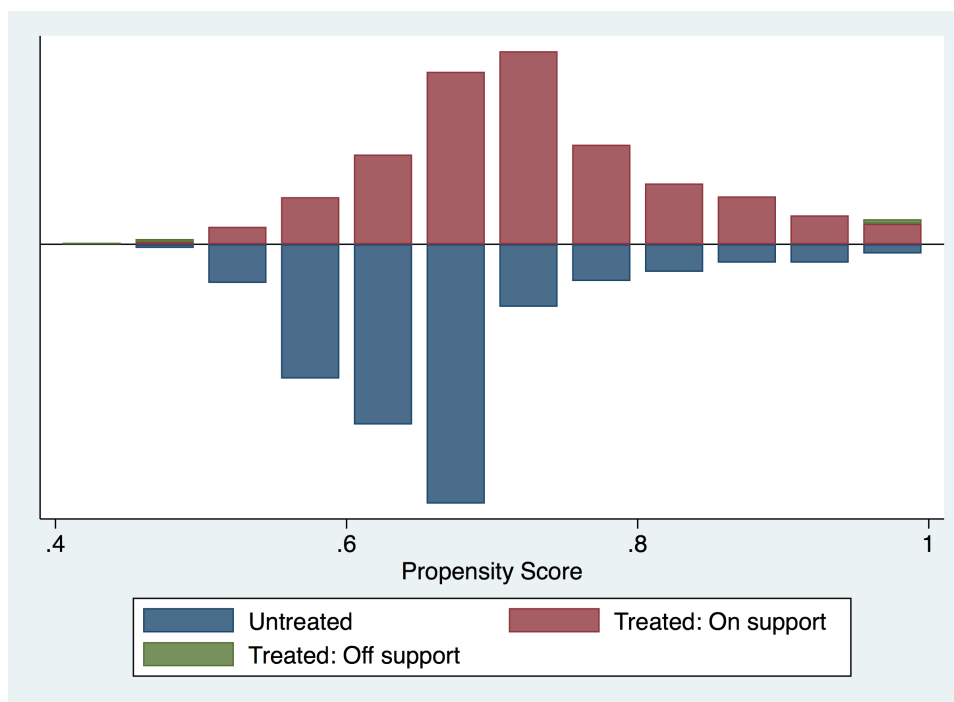


Figure 4.16 Histogramme de répartition des scores de propension après appariement.

Tableau 4.17 Résultat des estimation des effets de remplacer une structure par une structure d'un autre type sur l'ICG en fonction de la méthode d'appariement par score de propension.
t-stat

Méthode	Diff.	Rbs.Std.Err
NN(3)	0.00877 (1.02)	0.01179
Kernel	0.00191 (1.24)	0.01028

Remarque : Dans le cas général, nous avons pu estimer un modèle pour l'affectation au traitement. Ce n'est pas le cas pour les quatre autres types de notre étude. En effet, l'affectation au traitement est trop délicate à modéliser correctement et nous utiliserons ainsi uniquement la méthode d'estimation par ajustement régressif étant donné que nous avons déterminé des covariables pour l'estimation de la variable dépendante, l'ICG, qui elle ne change pas.

4.6.2 Type 18 - Ponceaux arqués en acier

Le cas des ponceaux arqués en acier est un cas extrême et un peu particulier pour lequel le groupe de contrôle, constitué des ponceaux arqués en acier qui remplacent un ponceau arqué en acier, doit contenir 11 observations. Néanmoins, l'ICG n'est pas renseigné pour toutes ces observations et c'est ainsi que nous ne constituons un groupe de contrôle que de 7 observations, toutes à un ICG égal à 5. L'étude de l'effet du remplacement d'un ponceau arqué en acier par un type différent s'annonce donc peu aboutissante car si on observe un effet sur l'état des structures, il sera probablement toujours négatif étant donné que le groupe de contrôle est constitué uniquement de structures en très bon état ne nécessitant aucune réparation.

En étudiant la dispersion de l'ICG parmi les types de structures remplaçantes, on constate que :

- Sur les 88 observations du type 13 - Ponceau rectangulaire en béton armé que nous avons, seules 61 ont une valeur d'ICG disponible et elle est égale à 5 pour tous ;
- Les 27 observations du type 19 - Ponceau voûté en béton armé ont toutes un ICG égal à 5 ;
- Les 14 observations du type 35 - Portique en béton armé ont toutes un ICG égal à 5.

On ne pourra donc pas conclure sur l'effet de remplacer les ponceaux arqués en acier par ces type-ci qui représentent à eux trois environ 80% des ponceaux arqués en acier remplacés depuis 1990.

Pour palier à cette impossibilité, il aurait fallu restreindre notre objectif à essayer d'estimer l'effet de construire dans un type plutôt qu'un autre sur une période particulière en faisant des hypothèses sur les possibles remplacements. Néanmoins, comme le montre la Figure 4.12, le nombre de constructions de ponceaux arqués en acier commence réellement à augmenter au début des années 1960, pour atteindre deux pics, l'un en 1970, l'autre en 1980, date à partir de laquelle il va diminuer jusqu'à être dépassé par les trois types ci-dessus à partir du début des années 1990. On peut donc supposer que les remplacements commencent uniquement à ce moment là, période pour laquelle nous avons néanmoins les données de remplacement.

Nous allons tout de même simplifier l'étude dans la section suivante en créant un groupe de contrôle qui prend toutes les structures construites de ponceaux arqués en acier et plusieurs groupes tests qui prendront les structures construites dans les trois types remplaçants. Nous n'étudierons ainsi pas l'effet de remplacer dans un type nouveau plutôt qu'ancien mais l'effet de construire dans un type plutôt qu'un autre sur l'état de la structure.

4.6.3 Type 45 - Ponts acier-bois

Tableau 4.18 Résultat des estimations des effets de remplacer dans un type autre que le type 45 sur l'ICG.

	<u>Tous types</u>		<u>Type 35</u>		<u>Type 13</u>	
	Simple diff	Control	Simple diff	Control	Simple diff	Control
ATE	0.0157888	0.0224759	0.0308642	0.0275434	0.0308642	0.0320671
Rbst.Std. Err	0.0140317	0.0135414	.0197588	.0086902	0.0274212	0.0098942
$P > z $	0.2610	0.097	0.1191	0.002	0.2611	0.001
$Pmeans_0$	4.969136	4.963577	4.969136	4.972457	4.969136	4.967933
$Pmeans_1$	4.984925	4.986053	5	5	5	5
ATET	-	.0301197	-	0.0132127	-	0.0414796
Rbst.Std. Err	-	0.0167817	-	0.0098031	-	.0167201
$P > z $	-	0.073	-	0.178	-	0.013
$Pmeans_0$	-	4.954574	-	4.986787	-	4.95852

Le tableau donne les estimations des effets de construire dans un nouveau type pour remplacer un pont acier-bois sur la période 1990-2019 contre remplacer la structure par le même type. Les covariables contrôlent pour l'âge de la structure, le logarithme de son âge, sa longueur ainsi que les données géographiques de la structure.

Il y a 326 observations dans le groupe de contrôle ($D = 0$), 199 dans le groupe test où tous les types remplaçants sont confondus ($D_{45,toustypes} = 1$), 77 dans celui où on remplace par le type 35 ($D_{45,35} = 1$) et 41 par le type 13 ($D_{45,13} = 1$).

Tous types remplaçants Dans cette section, on va considérer que le traitement est simplement le fait d'être remplacé par un type différent du type 45. On va donc considérer que le groupe test correspond à tous les types remplaçants des ponts acier-bois, autres que les ponts acier-bois eux-mêmes ; c'est-à-dire les types 13, 15, 16, 18, 19, 20, 31, 35, 36, 42, 44, 46, 63 comme présentés au Tableau 4.14.

L'étude de la dispersion de l'ICG pour ces deux groupes nous apprend que la moyenne de l'ICG pour le groupe de contrôle est très élevée $\overline{ICG}_{contrôle}$ et avec un intervalle de confiance à 95% très resserré et donc un écart-type faible. Cette moyenne est plus élevée que la moyenne du groupe test dans son ensemble $\overline{ICG}_{test}$. Bien qu'il soit également très élevé, il est plus faible et avec un écart-type plus important. Nous notons également après un test de Mann-Whitney que cette différence n'est pas significative.

Nous ne pouvons néanmoins pas simplement étudier la différence de moyenne entre les

observations traitées et non-traitées sans contrôler pour des caractéristiques de la structure qui pourraient intervenir dans la valeur de la moyenne de l'ICG. Il nous faut donc préciser ces covariables pour pouvoir estimer correctement l'influence du traitement sur la moyenne de l'ICG.

Ce que l'on constate en premier lieu c'est le signe de l'estimation de la différence sur la moyenne de l'ICG de construire dans un autre type que l'acier-bois : il est en effet positif pour tous les modèles. Il semble donc que construire dans un type nouveau autre que l'acier-bois permet d'augmenter la moyenne de l'ICG et donc d'avoir des structures en meilleur état que si l'on remplaçait une structure acier-bois par une autre en acier-bois. Même si l'augmentation est faible pour chaque modèle, elle semble exister néanmoins. Cela conforte le fait que la moyenne de l'ICG du groupe test est supérieure à celle du groupe de contrôle et qui supposait donc que construire dans un autre type a tendance à faire augmenter la moyenne de l'ICG de 0,0157888 points (simple t-test). Lorsque l'on contrôle donc pour les covariables, cette tendance se confirme donc et il est donc plutôt intéressant de remplacer le type 45 par un autre type parmi ceux du Tableau 4.14.

La deuxième observation que l'on peut faire est le fait que cette estimation est significative à 10%. lorsque l'on contrôle pour les covariables, laissant supposer qu'il n'y a pour l'instant pas de problème de sélection et donc, a priori, pas de problème d'interactions entre les covariables.

Comment comprendre l'ATET ? Il correspond à la différence de moyenne sur les traités : la différence de moyennes d'ICG entre les structures remplaçantes qui ont été construites en un type innovant et les structures remplaçantes construites en acier-bois si elles avaient été construites dans un type innovant. Dans notre cas, les coefficients sont souvent très faibles mais sont toujours positifs ce que l'on peut comprendre comme le fait qu'une faible augmentation de l'ICG est appréciable pour les structures remplaçantes de type acier-bois si elles avaient été construites en matériau innovant.

Pour l'instant nous avons simplement attribué le fait qu'une structure en acier-bois soit remplacée par une structure d'un autre type parmi ceux référencés par le Tableau 4.14 sans faire de différence entre les types. La valeur supposée de l'ICG est donc calculée via tous ces types. On va donc s'intéresser de manière plus précise à l'effet sur l'ICG de remplacer une structure acier-bois dans certains types particuliers.

Type 35 - Portique en béton armé Le Type 35 - Portique en béton armé est l'un de ceux qui remplacent le plus les ponts acier-bois, il en représente presque 15% des remplacements. Il est donc légitime de s'intéresser à l'effet sur l'ICG de remplacer dans ce type par rapport à remplacer par un pont acier-bois.

Il s'avère que pour les 77 structures acier-bois remplacées par les portiques en béton armé, ceux-ci affichent tous un $ICG=5$. Nous sommes donc dans un cas extrême où l'écart-type est forcément nul et pour lequel on s'attend à une augmentation de l'ICG en contrôlant pour les covariables. Néanmoins, le test de Mann-Whitney nous donne une $p_{value} = 0.119 > 0.05$. Cette différence dans les moyennes d'ICG n'est donc pas significative mais l'est presque pour une valeur-seuil de 10%.

Ainsi, peu importe le modèle, les remplacements, les coefficients sont positifs, considérés comme significatifs à 1%; remplacer un pont-acier bois par un portique en béton armé plutôt que par un autre pont acier-bois augmente la valeur moyenne de l'ICG. Comme on l'a vu plus tôt, les portiques en béton armé remplaçant les ponts acier-bois représentent 25% de toutes les structures remplacées par les portiques en béton armé. Elles sont quasiment toutes en très bon état ($ICG=5$) à l'exception de deux observations sur 306.

Type 13 - Ponceaux rectangulaires en béton armé De la quarantaine d'observations de ponceaux rectangulaires en béton armé qui remplacent les ponts acier-bois, toutes ont un $ICG=5$. Comme pour les portiques en béton armé, l'écart-type σ est donc nul et nous sommes dans le cas extrême où, en contrôlant pour les covariables, on s'attend à voir une augmentation de l'ICG lorsque l'on décide de remplacer un pont acier-bois par un ponceau rectangulaire en béton armé plutôt que par un autre pont acier-bois.

Un test statistique t rapide nous donne une différence de moyenne de 0.0308642 mais non statistiquement significatif avec une probabilité $Pr(|T| > |t|) = 0.2611 > 0.05$. Un test de Mann-Whitney et un de Kruskal-Wallis nous donnent des informations similaires avec des p_{values} respectives de 0.2605 et 0.2606.

On constate effectivement bien cette augmentation peu importe le modèle et de manière significative à chaque fois, la p_{value} étant inférieure à 1% à chaque fois. Contrôler pour les covariables que l'on a déterminé est donc utile et semble donc rendre la démarche et les résultats pertinents et statistiquement significatifs.

Effet du remplacement par un autre matériau Il est intéressant de constater que les deux types pour lesquels remplacer un pont acier-bois a un effet positif sur la valeur de l'ICG des structures par rapport à un remplacement en pont acier-bois sont en béton armé. On peut donc se poser la question de l'effet de remplacer un pont acier-bois par une structure (pont, portique ou ponceau confondus) en béton armé par rapport à celui de remplacer par un autre pont acier-bois. Le traitement change alors légèrement et prend alors et est attribué aux structures remplaçantes des ponts acier-bois qui sont construits en béton armé, à savoir :

- 13 - Ponceau rectangulaire en béton armé ;
- 19 - Ponceau voûté en béton armé ;
- 31 - Pont à dalle pleine en béton armé ;
- 35 - Portique en béton armé ;
- 36 - Portique en béton armé, sous remblai.

Les résultats de cette démarche sont donnés au Tableau 4.19 ci-dessous.

Tableau 4.19 Résultat des estimations des effets sur l'ICG de remplacer un pont acier-bois par une structure en béton armé plutôt que par une en acier-bois.

	Béton armé	
	Simple diff	Control
ATE	0.0308642	0.0317471
Rbst.Std. Err	.0141986	0.0097662
$P > z $	0.0304	0.001
$Pmeans_0$	4.969136	4.968253
$Pmeans_1$	5	5
ATET	-	0.033477
Rbst.Std. Err	-	0.0118176
$P > z $	-	0.005
$Pmeans_0$	-	4.966523

Le tableau donne les estimations des effets de construire en béton armé pour remplacer un pont acier-bois sur la période 1990-2019 contre remplacer la structure par le même type. Les covariables contrôlent pour l'âge de la structure, le logarithme de son âge, sa longueur ainsi que les données géographiques de la structure.

Il y a 326 observations dans le groupe de contrôle ($D = 0$), 150 dans le groupe test où tous les types remplaçants sont en béton armé ($D_{45,bétonarmé} = 1$).

Il est ici clair que remplacer un pont acier-bois par une structure en béton armé a ainsi un effet positif significatif sur l'ICG des structures remplacées. Le cas des ponts acier-bois est un cas particulièrement intéressant parce qu'ils sont relatifs d'une grande réalité du réseau québécois

étant donné qu'ils en constituent environ un tiers. Le grand nombre de remplacements recensé malgré le fait que la base de données ne commence que dans les années 1990 nous permet de constater que l'on remplace encore énormément ces structures par d'autres ponts en acier-bois malgré le fait qu'il semble plus intéressant de les remplacer par des structures en béton armé. Comment expliquer ces choix ?

Le manuel de construction des ponts acier-bois (2006) nous apprend alors que le choix du type de la structure remplaçante d'un pont acier-bois par le concepteur doit se faire après une analyse coût-bénéfices et certains critères de base commune et de capacité du sol. Des suggestions sont données pour les remplacements selon les deux types en béton armé étudiés :

« Pour de courtes portées, le concepteur peut envisager de remplacer un pont acier-bois par un ponceau lorsque le site du pont satisfait à l'une des conditions suivantes :

- une largeur de cours d'eau de moins de 6 m au niveau des eaux hautes annuelles ;
- une pente de cours d'eau ne dépassant pas 1%, situation associée à une stagnation des eaux.

Pour des portées intermédiaires pouvant aller jusqu'à 20 m, le concepteur peut envisager de remplacer un pont acier-bois par un portique en béton armé. »

(Desgagné et Richard, 2006),p.1-9.

En nous intéressant ainsi aux largeurs des structures remplaçantes, on constate en effet que ces critères sont plus ou moins respectés, les ponceaux en béton armé allant jusqu'à 10m au maximum (cf. Tableau 4.20 ci-dessous).

Tableau 4.20 Moyenne des largeurs des deux structures remplaçantes en béton armé principales des ponts acier-bois.

Code du type de la structure	n	Largeur moyenne (m)	σ	[Min - Max]
13 - Ponceau rect. béton armé	39	5.740	1.152	[4.000-10.009]
35 - Portique béton armé	77	9.193	1.570	[5.400-18.900]

4.6.4 Synthèse partielle

Dans cette démarche, nous avons voulu étudier dans un premier temps l'effet sur l'ICG du traitement dans le cas le plus général où l'on remplace une structure par une autre d'un autre type. La structure de ce traitement nous a permis d'étudier plusieurs méthodes d'estimation d'effets de ce traitement ; la méthode par ajustement régressif, celle par pondération par les

probabilités inversées, une association doublement robuste de ces deux méthodes et enfin une méthode d'appariement par score de propension.

Les résultats de ces trois premières méthodes après analyse du balancement des covariables nous donnent des résultats similaires : les coefficients estimés sont tous positifs laissant transparaître le fait que, dans le cas général, remplacer une structure par une structure d'un autre type a, en moyenne, un effet positif sur l'état final de la structure.

Afin d'essayer de corroborer ces estimations et de bien s'assurer que l'on compare des structures similaires, nous avons donc voulu estimer l'effet de ce traitement par une méthode d'appariement. La méthode retenue a été celle du score de propension car elle permet d'apparier directement sur la probabilité de recevoir le traitement et non sur les valeurs de l'ICG estimés. Cette méthode nous permet ainsi de mettre en comparaison des structures avec des probabilités de recevoir le traitement similaires. Quelques précisions sont néanmoins à importer et elle n'est pas évidente à mettre en place. Il nous faut choisir un vecteur de covariables pour le traitement du cas général qui nous permet de vérifier la propriété de balancement des variables. Ces étapes de détermination font l'objet d'une littérature foisonnante de la part des économétriciens et d'un vecteur de covariables à un autre, les résultats peuvent être foncièrement différents. Dans notre cas, nous avons d'abord étudié le balancement du vecteur choisi avant l'appariement et après. Les méthodes d'appariement par score de propension testées sont au nombre de trois : par plus proches voisins, par trois plus proches voisins, par méthode de Kernel. Ces deux dernières sont celles pour lesquelles les différences entre groupes de contrôle et groupe test ne sont pas statistiquement significatives. Les deux groupes peuvent donc être considérés comme comparables dans une certaine mesure ou, du moins, constitués de populations comparables. Ce sont donc ces méthodes d'appariement par score de propension que nous finirons par sélectionner, méthodes qui permettront de vérifier la propriété de balancement également.

Les résultats de cette méthode corroborent alors ceux des trois méthodes d'estimations d'effet de traitement : nous estimons une différence positive non significative entre les groupes test et de contrôle qui s'interprète par un effet positif sur l'état des structures de remplacer une structure par une autre d'un autre type.

Par la suite, nous avons décidé d'étudier des cas particuliers issus de la sélection menée à la section précédente. À la vue du grand nombre de types de structures remplacées sur la période 1990-2019 et par de nombreux types différents, nous avons dû limiter notre étude à ceux que nous avons jugé le plus pertinent. Nous avons pris le parti, pendant l'étape de description des données, d'étudier les types qui présentaient le plus grand nombre d'observations afin de maximiser la qualité de nos résultats statistiques.

Pour ces cas d'étude, le traitement ne permet pas de mettre en place aisément une méthode d'appariement par score de propension étant donné que les densités de probabilités ne suivent pas les mêmes tendances, les covariables ne sont pas balancées. On est face à la problématique de la généralisation de nombreux cas particuliers qui atteint ses limites lorsque l'on précise les types d'études. La détermination d'un vecteur de covariables employable pour notre étude n'est pas réalisable avec les données dont nous disposons et nous nous limitons ainsi à la méthode d'estimation par ajustement régressif.

Néanmoins, on s'aperçoit très vite de la difficulté de rendre compte d'une réalité ; en effet, les structures remplaçantes ayant moins de trente ans pour les plus vieilles sont, pour beaucoup, encore en bon état et présentent un ICG maximum de 5. Nous avons alors des problèmes dans la crédibilité de nos résultats étant donné que pour certains types nous ne sommes pas capables d'estimer l'effet d'un remplacement par un nouveau type car les deux groupes de contrôle et tests ont tous les deux une moyenne d'ICG égale à 5 et avec un écart-type nul (toutes les observations présentent un ICG=5).

L'étude du remplacement des ponts acier-bois nous donne malgré tout des résultats qui semblent crédibles et qui sont statistiquement significatifs avec des valeurs réalistes. La littérature sur ce type particulier de structure vient nous apporter des précisions utiles sur les déterminants des remplacements des ponts acier-bois et souligne encore une fois le caractère expérimental de notre démarche générale. Les constructions sont gérées au cas par cas et font l'objet de réflexions poussées et renseignées de la part des décideurs publics. Ce processus n'étant que très peu documenté, nous avons voulu mettre en place cette démarche générale pour essayer de mettre en lumière certaines réalités.

Nous allons à présent changer l'approche de ce que l'on considère comme le traitement en étudiant l'effet sur l'état des structures de construire dans un type particulier plutôt qu'un autre sur une période donnée.

4.7 Effet du traitement : Comparaison simple de construire dans un type plutôt qu'un autre : le cas des ponts à poutres en béton armé

Dans cette section, nous allons prendre une approche plus large basée sur les chevauchements graphiques que l'on aura considéré dans la section descriptives des structures remplacées/remplaçantes.

Le traitement maintenant considéré est ici :

$$D = \begin{cases} 1 & \text{si la structure est construite dans un type nouveau, "innovant",} \\ 0 & \text{si elle est construite dans le type ancien, remplacé.} \end{cases}$$

Nous allons nous focaliser sur les ponts à poutres en béton armé (Type 41). Nous avons décidé de nous limiter à la période 1960-2019. En effet, dès 1960 s'amorce l'augmentation du nombre de constructions recensées dans les types 35, 42 et 44 qui remplacent les ponts à poutres en béton armé. Ces trois types dépassent le nombre de constructions annuel de ponts à poutres en béton armé autour des années 1970.

Nous allons donc essayer d'estimer les effets sur l'ICG de construire dans chacun de ces types contre celui de construire des ponts à poutres en béton armé en contrôlant pour nos covariables.

À la vue des moyennes de l'ICG de chacun des types, on aurait tendance à supposer que remplacer par l'un de ces types a un effet positif sur l'ICG étant donné que leurs structures sont globalement en meilleur état pour une période de construction similaire.

Lorsque l'on calcule l'ATE en contrôlant pour nos covariables, on trouve un résultat négatif pour chacun des types. Construire des ponts à poutres en béton armé contre des portiques en béton armé (Type 35), des ponts à poutres en béton précontraint préfabriqué (Type 42) ou des ponts à poutres en acier (Type 44) aurait donc un effet positif sur l'ICG.

Ces résultats sont encore plus marqués pour l'ATET : l'amplitude est plus importante, donc plus négative et les résultats sont significatifs à 5% pour les portiques en béton armé et les ponts à poutres en acier ($p_{value} < 0,05$).

Tableau 4.21 Résultat des estimations des effets sur l'ICG de construire dans un type considéré comme nouveau plutôt que dans le type 41.

	<u>Type 35</u>		<u>Type 42</u>		<u>Type 44</u>	
	Simple diff.	Control	Simple diff.	Control	Simple diff.	Control
ATE	.6131882	-.3251624	.4805852	-.0805964	.482439	-.1817597
Rbst.Std. Err	.054573	.1588782	.0505067	.1099072	.0594577	.1391856
$P > z $	0.001	0.041	0.004	0.463	0.002	0.192
$Pmeans_0$	4.213213	5.002314	4.213213	4.731403	4.213213	4.897321
$Pmeans_1$	4.826401	4.677151	4.693798	4.650806	4.695652	4.715561
ATET	-	-.5377511	-	-.1893401	-	-.4232522
Rbst.Std. Err	-	.2301562	-	0.1518891	-	.2131138
$P > z $	-	0.019	-	0.213	-	0.047
$Pmeans_0$	-	5.416204	-	4.911272	-	5.226701

Le tableau donne les estimations des effets de construire dans un nouveau type sur la période 1960-2019 contre construire en pont à poutres en béton armé. Les covariables contrôlent pour l'âge de la structure, le logarithme de son âge, sa longueur, sa largeur ainsi que les données géographiques de la structure.

Il y a 333 observations dans le groupe de contrôle ($D = 0$), 553 dans le groupe test lorsque l'on construit en type 35, 774 lorsque l'on construit en type 42 et 598 dans celui où l'on construit par le type 44.

Synthèse partielle Comme nous l'avons vu à la section précédente, il n'est pas évident de construire des groupes tests ou de contrôle en se basant uniquement sur les statistiques descriptives car nos données ne sont malheureusement pas complètes et nous ne disposons pas de l'ICG pour toutes les structures recensées ni de toutes les structures remplacées depuis le début du siècle dernier mais uniquement depuis le début des années 1990. Nous avons donc essayé de palier au manque d'information sur les remplacements en choisissant des périodes pour lesquelles deux types se chevauchaient : l'un qui diminuait fortement sur cette période pendant que l'autre voyait son nombre de constructions augmenter fortement. Si ce type est l'un des type remplaçant du premier, on peut faire l'hypothèse qu'il l'est depuis plus longtemps que simplement le début des années 1990 et considérer sur cette période les constructions dans le type disparaissant comme groupe de contrôle et celles dans le type augmentant comme groupe test.

Nous n'avons ainsi pas réussi à montrer que construire dans un des types remplaçants en fonction de la structure avait un effet positif significatif sur l'état des structures. À l'inverse, il semble même que, lorsque l'on contrôle pour les covariables, ce choix de construction soit pénalisant. On peut donc simplement extraire de notre étude que construire dans un type

"innovant" à un moment donné dans le temps soit risqué. Un effet négatif sur l'ICG est possible bien que ce résultat soit contraire à notre intuition initiale. Une autre analyse avec différentes variables, différents types ou différentes données pourra donner un résultat foncièrement différent, la méthode étant particulièrement sensible à chacun de ces critères. Il est bon de rappeler que toutes ces constructions sont mues par des décisions particulières prises par des décideurs publics municipaux ou nationaux, chaque cas de construction est l'effet d'une réflexion dans laquelle une analyse des coûts et des bénéfices de construire dans un type plutôt qu'un autre a été menée. Nous discuterons des compromis de l'inscription de notre démarche de généralisation vis-à-vis d'une réalité plus subtile et complexe en conclusion.

CHAPITRE 5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

5.1 Synthèse des travaux

5.1.1 Objectifs et approche

Notre étude s'inscrit dans une démarche bien particulière d'essayer de rendre compte de l'état du réseau d'infrastructures québécois et de caractériser son évolution au cours du temps. Ce projet s'inscrit dans la lignée de précédents mémoires sur l'état des infrastructures au Québec et vient préciser ces résultats au travers de l'angle de l'innovation. En effet, avec la mise en place d'une base de données conséquente qui croise la base de données principale des structures du Ministère des Transports, une base de données de structures pour lesquelles nous disposons d'un Indicateur de Condition Générale (ICG) et une dernière de structures remplacées, nous avons pu effectuer un état des lieux du réseau des infrastructures, de son état et de son évolution au cours du XX^e siècle.

Grâce à cette base de données, nous avons voulu étudier le lien entre remplacement de structure et état des infrastructures. Pour se faire, nous avons décidé de mettre en place une démarche économétrique causale afin d'évaluer les effets des remplacements de structures par d'autres plus "innovantes" ou simplement autres sur l'état actuel des infrastructures. Ces démarches, qui sont usuellement l'apanage des sciences sociales, ont pu se révéler particulièrement utiles dans la mise en exergue de certains résultats et ont su prouver qu'elles pouvaient être adaptées à une étude du réseau québécois. La difficulté de mettre en avant des liens de cause à effet sur une telle base de données vient du fait que les données sont toutes des observations, les méthodes quasi-expérimentales permettent ainsi de palier à ce problème par la constitution de groupes de contrôle et test relativement similaires nous permettant de croiser des observations comparables dans une certaine mesure.

5.1.2 Résultats

À propos de l'ICG Dans un premier temps, nous nous sommes attardés à effectuer un état des lieux descriptif de l'état du réseau d'infrastructures québécois au travers des catégories de structures, de leurs matériaux utilisés et des directions territoriales dans lesquelles elles sont construites. Ces résultats font ressortir de grandes tendances d'état des infrastructures qui nous ont permis de mettre en place un modèle explicatif de l'ICG, modèle qui dans son cas

général dont les résultats sont présentés en Annexe D, explique environ 19% de la variance de l'ICG. Ce modèle nous a permis de confirmer que :

- L'âge est l'un des facteurs explicatifs de la diminution de l'ICG les plus important, plus une structure vieillit, plus elle est en mauvaise condition ;
- Les dimensions de la structure ont un impact sur l'ICG : plus une structure est longue et large, plus l'ICG diminue ;
- Sa localisation géographique est un facteur explicatif : plus on se déplace vers le Nord et l'Ouest et plus l'ICG diminue ;
- Les ponts à poutres ont tendance à réduire l'ICG malgré le fait qu'ils représentent plus de 90% des catégories de ponts ;
- Construire en bois a un impact significativement négatif sur l'état des structures ;
- À l'exception de la Côte-Nord, peu importe la Direction Territoriale dans laquelle on construit, cela a un impact négatif sur l'ICG.

Les différences de moyennes d'ICG relevés par Direction Territoriale ne sont néanmoins pas toujours significatives et il nous faudra ainsi nuancer notre propos sur ce type de variable.

Ce qu'il est intéressant de remarquer néanmoins est le poids du matériau de construction et de la catégorie de structure qui, à eux deux, constituent le type de la structure sur lequel nous avons travaillé dans le reste de notre étude. En effet, construire en acier, en béton précontraint ou en acier-bois semble avoir un effet positif sur l'état des structures.

Un autre résultat de ce modèle est que le fait qu'une structure ait déjà remplacé une autre structure précédemment, *i.e* qu'elle soit une structure remplaçante, a un effet positif significatif sur l'ICG.

À propos des structures remplacées Ce résultat en particulier nous a conduit à nous intéresser plus en détail aux structures remplaçantes. Nous nous sommes donc attardé à comprendre quelles étaient les facteurs qui influençaient le fait qu'une structure soit remplacée par un type différent de son type initial. À l'aide d'un modèle Logit multivarié dont les résultats sont dispensés au Tableau E.2, nous avons donc mis en exergue certains facteurs explicatifs et souligné quelques résultats inattendus :

- L'âge de la structure au moment d'être remplacé a un impact positif non significatif sur la probabilité d'être remplacée par une structure d'un autre type. Il faut donc comprendre que plus une structure qui va se faire remplacer est âgée, plus elle a de chance de se faire remplacer par une structure d'un type différent. L'âge est un facteur significatif ;
- Plus une structure est longue, plus elle a de chance de se faire remplacer par une

structure du même type ;

- La localisation géographique joue également un rôle significatif puisque plus la structure est située dans le Nord, plus sa probabilité d'être remplacée par une structure d'un autre type est grande ;
- La catégorie initiale de la structure et son matériau est également un facteur explicatif de remplacement : une structure étant initialement un pont a un effet négatif sur sa probabilité d'être remplacée par un autre type. Il est à noter qu'un autre type peut tout aussi bien être un pont dans ce cas pour lequel on aura changé de matériau par exemple. Le résultat est similaire pour les ponceaux, de façon significative.
- Les structures en acier voient leur probabilité d'être remplacées par une structure d'un autre type diminuer de façon significative. Les structures en béton armé voient leur probabilité d'être remplacées par des structures d'un type différent augmenter tandis que les structures initialement construites en acier-bois ont plus de chance d'être remplacées par des structures du même type. Dans ce cas particulier, type et matériau sont confondus puisqu'il n'existe qu'un type de structure en acier-bois, le type "45-Pont acier-bois". L'amplitude associée à ce coefficient est par ailleurs le plus important estimé. Cela est principalement dû à la part importante que représente ces structures parmi les structures remplacées recensées sur notre période d'observation.

Ces résultats de régression logistique ont donc permis de mettre en avant certaines variables qui ont un effet sur la probabilité pour une structure d'être remplacée par un type autre que son type initial. Afin de ne pas traiter uniquement le cas général sans donner d'exemple concret, nous avons décidé de considérer trois types particuliers d'étude pour lesquels nous nous focaliserons :

- 18 - Les ponceaux arqués en acier ;
- 41 - Les ponts à poutres en béton armé ;
- 45 - Les ponts acier-bois.

Après analyse descriptives de ces types remplacés, nous avons ainsi déterminé des couples de structures par lesquels ils étaient le plus fréquemment remplacés afin d'essayer d'établir un lien entre nouveau type remplaçant et amélioration de l'ICG. Nous nous sommes néanmoins d'abord attardés à établir une tendance générale.

Cas général En travaillant sur le vecteur de covariables explicatif du traitement « être remplacée par une structure d'un autre type », et en le restreignant aux variables de carac-

téristiques dimensionnelles de la structure nous avons estimé les effets d'être une structure remplacée par un autre type que son type initial sur l'ICG par trois méthodes différentes. Ainsi, il semblerait que remplacer une structure par un type nouveau ait un effet positif sur l'ICG lorsque l'on considère le cas général tous types confondus. Ce résultat est similaire peu importe la méthode d'estimation d'effets employée, laissant supposer à une certaine robustesse des résultats à la méthode.

Afin de corroborer ce résultat, nous employons une méthode d'appariement par score de propension par méthode de trois plus proches voisins et par méthode de pondération de Kernel. Ces résultats viennent ainsi confirmer ceux estimés par l'emploi des trois méthodes d'estimation d'effets de traitement employées. En effet, pour les deux méthodes d'appariement par score de propension, le résultat estimé est positif. L'avantage de la méthode d'appariement est de s'assurer que la probabilité de recevoir le traitement est balancée de la même façon dans le groupe de traitement et de contrôle ; on s'assure qu'il n'y ait pas de différences significatives entre les deux groupes et, par la même occasion, que l'on compare des structures, des observations réellement comparables entre elles.

Cette démarche rejoint alors la démarche plus précise de mise en comparaison de deux structures avec des caractéristiques similaires et qui diffèrent en un point particulier comme le cas des passerelles Barr et Isabey-Darnley.

Dans notre cas, il semblerait ainsi qu'en globalité, le remplacement par un type nouveau ait un effet plutôt positif sur l'ICG.

Afin de donner des exemples plus concrets de remplacements, nous avons estimé ces effets pour les trois types d'étude isolés.

Cas particuliers Lorsque l'on contrôle pour les covariables via un ajustement régressif, un résultat intéressant ressort : remplacer un pont acier-bois par un autre type ou plus précisément par un portique en béton armé ou un ponceau en béton armé a un effet positif significatif sur l'ICG.

Ce résultat nous a amené à étudier le remplacement des ponts acier-bois par une nouvelle structure mais cette fois construite en béton armé ; ici encore les estimations des effets de ce remplacement sont positifs et significatifs. Il serait donc plus intéressant de remplacer un pont acier-bois par une structure en béton armé plutôt que par une autre structure en acier-bois. Ce résultat semble néanmoins contraster avec la réalité puisqu'environ 60% des ponts acier-bois remplacés le sont par des ponts acier-bois. C'est dans ce genre de situations que l'évaluation statistique qui essaie de mettre en exergue des résultats globaux est confron-

tée à la une réalité individuelle et aux cas particuliers et peut commencer à montrer ses limites.

Dans le cas des ponceaux arqués en acier (Type 18), toutes les valeurs d'ICG du type de contrôle et de chacun des types remplaçants étant maximale, aucune conclusion ne peut réellement être tirée. En ce qui concerne les ponts à poutres en béton armé (Type 41), l'approche a été légèrement différente : nous avons, à l'aide des statistiques descriptives et d'études graphiques, considéré le traitement plus large d'être construit dans un type particulier par rapport à l'un de ces types de contrôle sur une période donnée. Ainsi, construire dans l'un des types remplaçants des ponts à poutres en béton armé, à savoir en portique en béton armé (35), en pont à poutres en béton précontraint préfabriqué (42) et en pont à poutres en acier (44) a un effet négatif sur l'ICG.

On peut ainsi apprécier les subtilités de différences lorsque l'on s'intéresse à des types de structures au cas par cas et l'effet de leur remplacement sur l'ICG.

Notre objectif principal de mettre en place une démarche économétrique afin d'étudier l'effet des remplacements de structures sur l'ICG et de dresser un portrait du réseau québécois a donc été, globalement, atteint. Certains problèmes ont néanmoins été rencontrés pendant l'étude et doivent être adressés afin de permettre à une possible future étude des améliorations conséquentes sur la qualité et la compréhension des résultats.

5.2 Limitations de la solution proposée et améliorations futures

5.2.1 La problématique des données

Comme nous l'avons mentionné à plusieurs reprises, la problématique des données a été le facteur le plus limitant de notre démarche. En effet, force est de constater que malgré la bonne volonté de transparence de la part des institutions, les différentes bases de données ne communiquent pas entre elles rendant bien plus complexe et chronophage la réalisation d'une base de données pertinente, basée sur les mêmes variables.

Dans notre cas, c'est la récupération des données liées à l'ICG qui a posé le plus de problème : il n'existe pas de base de données actualisée à intervalle régulier qui propose une valeur d'ICG observable pour chacune des structures disponible dans la base de données du Ministère des Transports qui, elle, est actualisée très régulièrement. Ces valeurs d'ICG sont disponibles uniquement au travers de « fiches portrait » ce qui force sa récupération soit à la main, soit au travers d'un code HTML ou VBA afin d'automatiser le processus. C'est cette démarche que Marmoux (2016) a effectué et ce pourquoi nous avons choisi de récupérer sa base de données

afin d'avoir le plus d'observations possibles avec un ICG disponible. Le nombre de structures pour lesquelles on observe un ICG reste néanmoins élevé puisque nous en avons 5662 au total.

La base de données des structures remplacées a elle été récupérée après différents échanges avec la Direction de la Géomatique du Ministère des Transports et présente quelques particularités. Elle ne recense les structures remplacées que depuis le début des années 1990. Cette démarche récemment mise en oeuvre va néanmoins se poursuivre et, de façon systématique par le Ministère. Elle n'est pas disponible en ligne et nécessite donc de prendre contact directement avec le Ministère. Il n'est néanmoins pas certain que le Ministère s'emploie à recueillir ces informations sur les structures remplacées sur la période précédent 1990, nous n'en avons, présentement, pas la confirmation. La non disponibilité de l'ICG directement par cette base a également été un problème puisqu'il nous a fallu aller récupérer cette variable sur le site du Ministère à la main en recherchant pour chaque numéro de dossier de chaque structure.

Ainsi, une meilleure disponibilité et homogénéité des différentes bases de données intéressantes du Ministère pourraient se révéler particulièrement efficaces et ouvriraient la porte à différentes approches et des résultats plus proches de la réalité. La disponibilité d'un suivi de l'évolution de l'ICG en particulier aurait pu permettre d'employer des méthodes économétriques plus poussées comme l'emploi de séries temporelles. Ces données ne seront néanmoins pas disponibles à une telle granularité et il n'est pas d'actualité que le Ministère en face un suivi.

5.2.2 La méthode

La première critique possible sur l'ICG est la considération de l'ICG comme une variable continue. En effet, dans son attribution même, l'ICG est une variable discrète et nous aurions pu considérer la probabilité qu'une structure ait un ICG d'une valeur entière comprise entre 2 et 5. Des méthodes de régressions logistiques auraient ainsi été considérées. Néanmoins, considérer un ICG continu nous permettait plus simplement de comparer l'évolution de sa moyenne en fonction de certaines variables et donc de comparer les structures, types de structures, matériaux entre eux.

Un autre point sur lequel notre étude peut être considérée comme incomplète est la précision de la définition des structures "innovantes". En effet, nous avons considéré de façon relativement large le fait qu'une structure soit remplacée par une structure autre plutôt qu'innovante au sens premier du terme dans le cas général. Nous avons néanmoins essayé de considérer l'évolution de l'apparition de certains types par rapport à d'autres lorsque nous

avons travaillé sur les types d'études. Il est également à noter que les différentes innovations intrinsèques à un matériau ne sont pas précisées dans la base de données. Ainsi une structure construite en béton armé au début du XX^e siècle ne sera évidemment pas construite dans le même béton armé qu'une structure construite il y a une dizaine d'années. La granularité d'informations disponible sur la base de données ne nous permet pas de les différencier.

D'autre part, dans l'application des calculs des scores de propension, la détermination d'un vecteur de covariables est particulièrement importante étant donné que ce sont via ces variables que ces scores seront calculés. Nous ne disposons que de peu de variables continues et disponibles pour toutes les observations et certaines auraient pu influencer sur l'affectation au traitement (on peut penser au DJMA notamment).

La condition délicate à remplir est celle du balancement des variables : les covariables doivent être choisies de telle sorte qu'il n'existe pas de différence significative entre les groupes test et de contrôle. Dans notre cas, après étude du balancement pour différents vecteurs de covariables, nous avons réduit ce vecteur à la simple considérations des caractéristiques physiques de la structure (âge, longueur, largeur, latitude, longitude). Une fois cette propriété vérifiée avant l'appariement, il est nécessaire de la re-vérifier après. Cette propriété nécessaire à l'évaluation des effets du traitement n'a néanmoins pas pu être vérifiée pour les traitements des cas particuliers. Dans le cas général néanmoins, elle permet de corroborer le résultat de la méthode doublement robuste en s'assurant de pouvoir associer des observations similaires entre elles. L'omission de variables d'intérêt pour l'affectation du traitement peut donc avoir un impact non négligeable sur la qualité directe de nos résultats et, dans un autre cas, en disposant de variables supplémentaires, un autre analyste pourrait ainsi présenter des résultats différents voire contradictoires.

Finalement, On constate au travers des résultats que malgré tout l'arsenal statistique et économétrique employé, nous n'arrivons pas à remplacer pleinement l'approche quasi-expérimentale qui consiste à réaliser des études comparatives de structures comparables comme le cas des passerelles Barr et Isabey-Darnley. Il est à noter que ces études prennent des hypothèses de base non-négligeables et donc relativement larges, sur la durabilité des structures considérées dans le cas d'Isabey-Darnley par exemple.

La démarche à adopter de la part des autorités publiques est donc plutôt celle d'un réflexe à développer : mettre en œuvre une culture de suivi de nouvelles méthodes et de comparaisons afin de pouvoir baser les futures décisions sur des bases comparatives solides, vérifiables et objectives tout en croisant ces résultats avec les approches de grands nombres qu'apportent les méthodes économétriques et statistiques via les bases de données générales nationales.

RÉFÉRENCES

Olivier ANTERRIEU : Assimilation de données pour l'évaluation de la vitesse de corrosion des ouvrages. *In 26ème colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art*, Québec, QC, 7-8 mai 2019. URL https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/ministere/role_ministere/colloques-congres-conferences/colloques-ouvrages-art/Documents/26/OAnterrieu.pdf.

Norman R. BALL : *Bâtir un pays : Histoire des travaux publics au Canada*. Boréal, Montréal, QC, 1988.

Laurent-David BEAULIEU, Marcelin JOANIS, Clélia DESMETTRE, Richard GAGNÉ et Jean-Philippe CHARRON : Promouvoir l'innovation par les marchés publics. *In Le Québec Économique 6 : Le défi des infrastructures*, pages 327–351. Les Presses de l'Université Laval, Québec, 2017.

Luc BEHAGHEL, Philippe DE VREYER et Anne-Sophie ROBILLIARD : Mooc : Introduction aux méthodes d'évaluation d'impact des politiques publiques - session 2. Mooc disponible sur la plateforme fun (attestation du 7 décembre 2018), Université Paris Dauphine - PSL, 2018. URL <https://www.fun-mooc.fr/courses/course-v1:dauphine+125001+session02/about>.

Hélène-Andrée BIZIER : *Ce Québec que nous construisons : 75 ans de grands projets*. Delbusso, Montréal, QC, 2019.

Pier-André BOUCHARD ST-AMANT : Notes de cours du cours enp7011 : Analyse statistique en administration publique. Notes de cours, École Nationale d'Administration Publique (ÉNAP), 2018. URL http://www.enap.ca/enap/2903/Liste_des_cours_par_ordre_alphabetique.enap.

Olivier CADOT, Lars-Hendrik RÖLLER et Andreas STEPHAN : Contribution to productivity or pork barrel? the two faces of infrastructure investment. Discussion Paper FS IV 02-09, Wissenschaftszentrum Berlin, 2002.

Marco CALIENDO et Sabine KOPEINING : Some practical guidance for the implementation of propensity score matching. Discussion Paper IZA DP No. 1588, Forschungsinstitut zur Zukunft der Arbeit Institute for the Study of Labor, IZA, 2005.

Jean-Philippe CHARRON et Étienne CANTIN BELLEMARE : Passerelle piétonne isabey-darnley – utilisation de dalles prefabriquées en bfup. *In 24ème colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art*, Québec, QC, 10 mai 2017.

Jean-Philippe CHARRON et Clélia DESMETTRE : Intérêt de l'utilisation des bétons renforcés de fibres pour la construction d'ouvrages d'art durables. Rapport de recherche SR13-01, Groupe de recherche en génie des structures - Polytechnique Montréal, Montréal, QC, 2015.

Jean-Philippe CHARRON, Clélia DESMETTRE et Étienne CANTIN BELLEMARE : Precast uhpfr slabs and uhpfr field-cast joints of the isabey-darnley pedestrian bridge. *In 10th International Conference on Short and Medium Span Bridges*, Québec, QC, August 2018.

MTQ CHAUSSEES : Bilan de l'état des chaussées du réseau routier supérieur québécois. Rapport, Ministère des Transports, 2018. URL <https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/entreprises-partenaires/entreprises-reseaux-routier/chaussees/Documents/bilan-chaussees.pdf>.

David CONCIATORI : Systeme de gestion optimise de la maintenance des infrastructures. *In Journée conférence/formation annuelle sur le béton - Chapitre étudiant de l'American Concrete Institute a l'Université Laval en collaboration avec le CRIB*, Québec, QC, 7 juin 2019.

David CONCIATORI et Mario FAFARD : Platelage en aluminium pour pont routier : conception et analyse economique du cycle de vie. *In 26ème colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art*, Québec, QC, 7-8 mai 2019. URL https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/ministere/role_ministere/colloques-congres-conferences/colloques-ouvrages-art/Documents/26/MFafard.pdf.

David CONCIATORI et G.C KESERLE : Dégradation des structures en condition hivernale et ses limitations. *In 25ème colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art*, Québec, QC, 8-10 mai 2018. URL https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/ministere/role_ministere/colloques-congres-conferences/colloques-ouvrages-art/Documents/25/conciatori-keserle.pdf.

Nathalie DE MARCELLIS-WARIN et Ingrid PEIGNIER : Perception des risques au québec : Baromètre cirano 2018. Rapport, CIRANO, 2018.

Jean-François DENOËL, Bernard ESPION, Hellebois ARMANDE et Provost MICHEL : *Histoire de béton armé - Patrimoine, Durabilité et Innovations*. FEBELCEM et FABI, Bruxelles, Belgique, 2013. URL https://www.febelcem.be/fileadmin/user_upload/autres-publications/fr/histoires_de_beton_arme.pdf.

Gérard DESGAGNÉ et Guy RICHARD : Manuel des ponts acier-bois. Manuel technique FOR-013, Direction des Structures du Ministère des Transports du Québec, 2006.

Robert DESROSIERS : L'histoire des ponts du québec. Rapport technique, Ministère des Transports - Direction des Structures, Québec, QC, 1991.

G. DOIRON : Béton fibré à ultra-hautes performances (bfup) et les ouvrages d'art en Amérique du nord. *In 19ème colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art*, Québec, QC, 2016. URL https://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/1112955/02_Beton-fibre-ultra-hautes-performances-bfup.pdf.

Kodjovi M. EKLOU, Marcelin JOANIS et Étienne FARVAQUE : Des investissements publics efficients pour une dette publique soutenable. *In Le Québec Économique 6 : Le défi des infrastructures*, pages 141–158. Les Presses de l'Université Laval, Québec, 2017.

FMI : Perspectives de l'économie mondiale : Nuages et incertitudes de l'après-crise. Rapport, Fonds Monétaire International (FMI) - Études économiques et financières, 2014.

Robert GAGNÉ et Alexandre HAARMAN : Les infrastructures publiques au Québec : évolution des investissements et impact sur la croissance de la productivité. Rapport, Centre sur la productivité et la prospérité - HEC Montréal, 2011.

Roger GALIPEAU et Serge POURREAUX : La résorption du déficit d'entretien des infrastructures. *In Le Québec Économique 6 : Le défi des infrastructures*, pages 303–323. Les Presses de l'Université Laval, Québec, 2017.

Rodriguez GERMAN : Lecture notes on generalized linear models. Notes de cours, Princeton University, 2007. URL <https://data.princeton.edu/wws509/notes/>.

James-A GOULET : Comment prédire l'évolution de la condition du parc d'ouvrages d'art québécois? *In 25ème colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art*, Québec, QC, 8-10 mai 2018. URL https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/ministere/role_ministere/colloques-congres-conferences/colloques-ouvrages-art/Documents/25/goulet.pdf.

James-A GOULET : Openbdlm : une plateforme ouverte pour le suivi du comportement des ouvrages d'art. *In 26ème colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art*, Québec, QC, 7-8 mai 2019. URL https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/ministere/role_ministere/colloques-congres-conferences/colloques-ouvrages-art/Documents/26/J-AGoulet.pdf.

L. GUIZANI, M. NASSAR, M-J NOLLET et A. TAHAN : Approche probabiliste pour évaluer la fiabilité des ponts isolés à la base, sous l'effet simultané des séismes et de la température en régions froides. *In 25ème colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art*, Québec, QC, 8-10 mai 2018. URL https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/ministere/role_ministere/colloques-congres-conferences/colloques-ouvrages-art/Documents/25/nassar.pdf.

Tarek HARCHAOUI et Faouzi TARKHANI : L'infrastructure publique au Canada : où en sommes-nous ? Document analytique No 11-624-MIF au catalogue — No 005, Statistiques Canada, Ottawa, 2003.

Marcelin JOANIS et Stéphanie LAPIERRE : Conclusion - le défi des infrastructures. *In Le Québec Économique 6 : Le défi des infrastructures*, pages 447–453. Les Presses de l'Université Laval, Québec, 2017.

Marcelin JOANIS, Luc SAVARD, Mathieu PAQUET et Dorothée BOCCANFUSO : Une analyse comparative du financement des investissements en infrastructures au Québec. *In Le Québec Économique 6 : Le défi des infrastructures*, pages 185–211. Les Presses de l'Université Laval, Québec, 2017.

Pierre Marc JOHNSON, Armand COUTURE et Roger NICOLET : Rapport d'enquête sur l'effondrement d'une partie du viaduc de la Concorde. Rapport d'enquête CEIC-R-2446, Commission d'enquête sur le Viaduc de la Concorde - Gouvernement du Québec, Québec, 2007. URL <https://apigq.qc.ca/wp-content/uploads/2013/08/CEIC-R-2446.pdf>.

Kim-Sean LAUCH : Betons auto-cicatrisants à l'aide de différents ajouts. *In Colloque étudiant du CRIB*, Polytechnique Montréal, QC, 7-8 mars 2019.

G. S. MADDALA : *Limited-Dependent and Qualitative Variables in Econometrics*. Econometric Society Monographs. Cambridge University Press, 1983.

Patrick MAILLARD et Mélanie MICHAUD : Analyse de déplacements des passerelles piétonnes surplombant l'autoroute 520. Rapport d'analyse de déplacements piétons, Ville de Montréal, Montréal, QC, 2009.

Alexandrine MALTAIS, Nikola PETROV et Michel THIBAUT : Réparation des murs des écluses en bfup. *In 25ème colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art*, Québec, QC, 8-10 mai 2018. URL https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/ministere/role_ministere/colloques-congres-conferences/colloques-ouvrages-art/Documents/25/maltai-thibault.pdf.

Jacques MARCHAND : L'ingénierie de la durabilité – concevoir des structures qui atteindront une durée de vie de 100 ans et plus. *In Journée conférence/formation annuelle sur le béton - Chapitre étudiant de l'American Concrete Institute à l'Université Laval en collaboration avec le CRIB*, Québec, QC, 7 juin 2019.

Bruno MARMOUX : Déterminants de l'état des infrastructures routières : une analyse économétrique du réseau québécois. Mémoire de maîtrise, Dép. de génie industriel, École Polytechnique de Montréal, Montréal, QC, 2016. URL https://publications.polymtl.ca/2238/1/2016_BrunoMarmoux.pdf.

Bruno MASSICOTTE : Utilisation des betons fibres pour la conception et la refec-tion des ouvrages d'art durables, securitaires et economiquess? *In 25ème colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art*, Québec, QC, 8-10 mai 2018. URL https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/ministere/role_ministere/colloques-congres-conferences/colloques-ouvrages-art/Documents/25/massicotte.pdf.

Hervé MAUREY, Patrick CHAIZE et Michel DAGBERT : Sécurité des ponts : éviter un drame. Rapport d'information, Sénat, 2018.

MTQ : Plan annuel de gestion des investissements publics en infrastructures. Rapport de Budget de dépenses 8, Conseil du Trésor, 2019a. URL https://www.tresor.gouv.qc.ca/fileadmin/PDF/budget_depenses/19-20/fr/8-Infrastructures_publicques_Quebec.pdf.

MTQ : Plan québécois des infrastructures. Rapport de Budget de dépenses 8, Ministère des Transports, 2019b. URL https://www.tresor.gouv.qc.ca/fileadmin/PDF/budget_depenses/19-20/fr/8-Infrastructures_publicques_Quebec.pdf.

Ashraf MUHAMMAD SHOAIB : Eco-cement : Converting waste into resource. *In Colloque étudiant du CRIB*, Polytechnique Montréal, QC, 7-8 mars 2019.

OCDE : Getting infrastructure right : a framework for better governance. Report, 2017.

Carolyn O'FALLON : Linkages between infrastructure and economic growth. Economic report, Ministry of Economic Development, Wellington, New Zealand, 2003.

Estelle OUELLET : Guide d'économétrie appliquée pour stata pour ecn 3950 et fas 3900. Guide stata, Université de Montréal, 2005. URL <https://sceco.umontreal.ca/fileadmin/Documents/FAS/sciences-economiques/Documents/3-Ressources-services/Ressources-formulaires/GuideEconometrieStata.pdf>.

Valerie A. RAMEY : Costly capital reallocation and the effects of government spending. *The Quarterly Journal of Economics*, 126 (1):1–50, 2011.

Valerie A. RAMEY et Matthew D. SHAPIRO : Costly capital reallocation and the effects of government spending. *Carnegie-Rochester Conference Series on Public Policy*, 48:145–194, 1998.

Patrice RIVARD : Les methodes non destructives au service de l'évaluation des ouvrages en beton. *In Journée conférence/formation annuelle sur le béton - Chapitre étudiant de l'American Concrete Institute a l'Université Laval en collaboration avec le CRIB*, Québec, QC, 7 juin 2019.

Paul ROSENBAUM et Donald RUBIN : The central role of the propensity score in observational studies for causal effects. *Biometrika*, 70:41–55, 04 1983.

STATA CORP : Stata : Release 13. Statistical software, College Station, TX, 2013. URL <https://www.stata.com/manuals13/u.pdf>.

Dalibor STEVANOVIC : Notes de cours du cours eco8086 : Application de modèles économiques. Notes de cours, Université du Québec À Montréal - UQÀM, Département d'économie, 2018. URL <https://etudier.uqam.ca/cours?sigle=ECO8086>.

MTQ STRUCTURES : Bilan de l'état des structures. Rapport, Ministère des Transports, 2018. URL <https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/projets-infrastructures/structures/Documents/bilan-structures.pdf>.

Émilie THUILLIER et Pierre G. LAPORTE : Rapport d'examen de la conformité du processus d'appel d'offres de la passerelle barr. Rapport d'examen, Commission permanente sur l'examen des contrats - Ville de Montréal, Montréal, QC, 2015.

Melissa Roy TREMBLAY : Utilisation de l'analyse d'images pour l'évaluation de l'endommagement des infrastructures et la caractérisation des matériaux. *In 26ème colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art*, Québec, QC, 7-8 mai 2019. URL https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/ministere/role_ministere/colloques-congres-conferences/colloques-ouvrages-art/Documents/26/MRoyTremblay.pdf.

ANNEXE A RELATIONS ENTRE LES TROIS BASES DE DONNÉES MTQ, ICG ET DES STRUCTURES REMPLACÉES

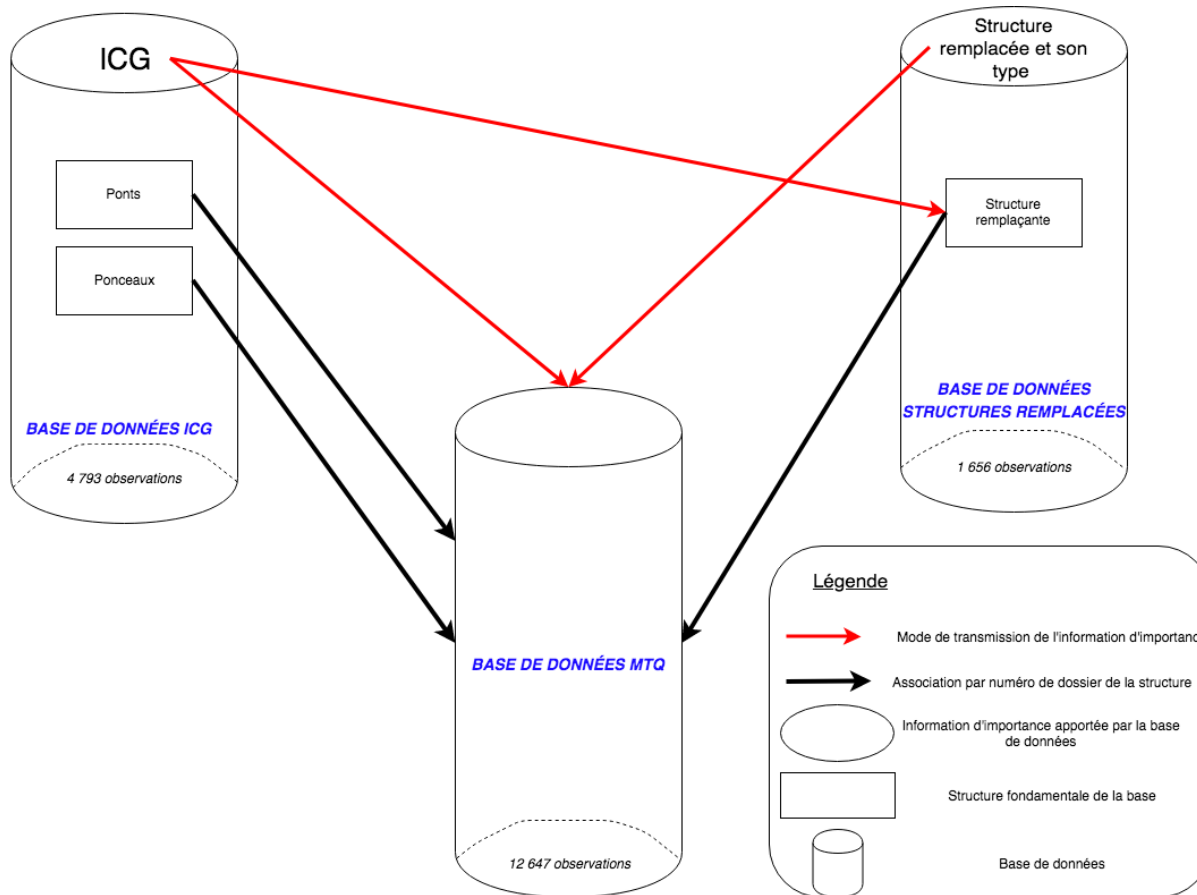


Figure A.1 Représentation des relations entre bases de données avant les appariements.

Les variables communes de base sont le numéro de dossier de la structure *num_dossr*, son année de construction *val_annee* et le type auquel elle appartient *code_des_t*.

La base de données de l'ICG apporte la valeur de l'ICG des structures et est appariée via les numéros de dossiers des deux sous-bases de données : celle des ponts et celle des ponceaux.

La base de données des structures remplacées apporte le type et l'année de construction de la structure remplacée. C'est via le numéro de dossier de la structure remplaçante que l'appariement se fait avec la base de données du MTQ.

ANNEXE B STATISTIQUES DESCRIPTIVES - PONTS

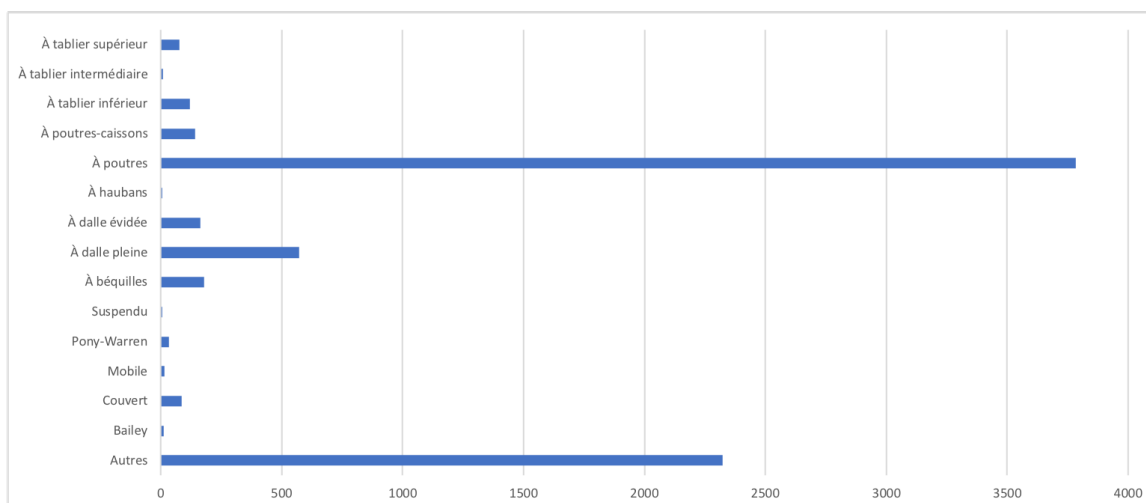


Figure B.1 Répartition des catégories de ponts

Les catégories de ponts La première classification que nous avons établie a été basée sur la variable *code_des_t* relative au type de structure général et décrite sous la forme "44 - Pont à poutres en acier". Nous avons ainsi une granularité relativement fine qui nous donne la répartition donnée en Figure B.1. On a alors une répartition d'environ 50% des ponts considérés comme des ponts à poutres et 30% dans la catégorie "Autres".

Cette catégorie correspond en réalité aux types "45-Pont acier-bois" qui recense 2315 observations et "66-Pont en bois" qui n'en recense qu'une. On peut ainsi se rendre compte que la granularité est bien trop précise pour le type de description que nous voulons mettre en place ; il nous faut donc grouper plus de catégories entre elles.

Cette nouvelle catégorisation est donnée au Tableau B.1. La catégorie relative au types de ponts à poutres est largement majoritaire (93%) suivis par les ponts en arc (6%). Les ponts mobiles, suspendus et à haubans sont par contre sous-représentés, n'auront donc aucun poids statistique et pourrons ainsi être écartés de l'analyse. En effet, les valeurs d'ICG ne pourront pas être déduites de si peu d'observations et le nombre de ces structures remplacées étant respectivement de 2 sur 16 pour les ponts mobiles, 1 sur 7 pour les ponts à haubans et d'aucun pour les ponts suspendus, aucune probabilité de remplacement ne pourra être estimée pour ces catégories de structures.

Tableau B.1 Nouvelle catégorisation des ponts

Ancien type de pont	Codes associés	Nouveau groupe	Pourcentage associé
Autres	45,66	À poutres	93,37%
Bailey	64		
Pony-Warren	63		
À dalle pleine	31, 32		
À dalle évidée	33, 34		
À poutres	41, 42, 43, 44, 46, 52		
À poutres-caissons	56, 57, 58		
Couvert	67	En arc	6,24%
À béquilles	38, 39, 50, 51		
À tablier inférieur	61, 71, 72		
À tablier intermédiaire	62, 73, 74		
À tablier supérieur	65, 75, 76, 77		
À haubans	82	À haubans	0,09%
Suspendu	81	Suspendu	0,08%
Mobile	85	Mobile	0,21%

L'ICG moyen pour chacune des deux catégories de ponts est donc calculé avec les observations pour lesquelles un ICG est disponible. Les ponts à poutres ont alors un ICG moyen supérieur à celui des ponts en arc et cette différence est significative d'après un test de Mann-Whitney. Les valeurs sont également dispersées plus proche de cette moyenne pour les ponts à poutres que pour les ponts en arc comme le montre l'écart-type de chacune des catégories. Cette différence significative vient très certainement des différences dans la sollicitation des structures : en compression pour les ponts en arc contre en flexion pour les ponts à poutres. Il y a donc une corrélation notable entre la catégorie de pont et la valeur moyenne de l'ICG.

Tableau B.2 ICG moyen par categorie de pont.

Catégorie de pont	n	n_{ICG}	$\overline{ICG} (\sigma)$
À poutres	6972	3514	4,50 (0,87)
En arc	440	230	4,235 (0,983)
Total	7440	3751	4,481 (0,88)

Les matériaux utilisés Le matériau le plus recensé dans la base de données pour la construction de ponts est le couple acier-bois qui constitue quasiment un tiers du réseau de

ponts au Québec (on retrouve cet ordre de grandeur dans le Manuel des Ponts acier-bois (Desgagné et Richard, 2006)(p. i)). Viennent ensuite le béton armé, l'acier et l'acier précontraint qui, à eux quatre, composent quasiment toutes les structures du réseau québécois. Sans rentrer dans le détail des propriétés mécaniques de chaque matériau, il est bon de noter que chaque matériau a une résistance différente en fonction des sollicitations auxquelles il est soumis et donc de la catégorie de pont concernée (à poutres ou en arc). Ces propriétés mécaniques permettent d'expliquer les différences notables dans l'état des structure que l'on peut observer au Tableau B.3. Ainsi, il n'est pas surprenant d'avoir des valeurs particulièrement faibles d'ICG pour les structures en bois ou en acier enrobé de béton par exemple, mais il est beaucoup plus inhabituel d'avoir des valeurs moyennes d'ICG aussi faibles pour les constructions en béton armé, que ce soit pour les ponts à poutres ou les ponts en arc.

Tableau B.3 ICG moyen selon le matériau de construction et la catégorie de pont.

Catégorie	Matériau	Codes associés	n_{ICG}	$\overline{ICG} (\sigma)$
À poutres	Béton armé	31, 33, 41, 56	1066	4,111 (1,068)
	Acier	44, 58, 63, 64	779	4,673 (0,717)
	Béton précontraint	32, 34, 42, 43, 57	1096	4,685 (0,621)
	Acier-bois	45	526	4,70 (0,743)
	Bois	46, 66	20	4,4 (0,883)
	Acier enrobé de béton	52	28	3,429 (1,200)
En arc	Béton armé	38, 71, 73, 75	162	4,241 (1,026)
	Acier	51, 61, 62, 65, 72, 74, 76	60	4,117 (0,885)
	Béton précontraint	39	7	5 (0)

Après une étude de la dispersion de l'âge en fonction de la valeur de l'ICG pour les ponts en béton armé, on constate qu'ils sont répartis autour de 60 ans approximativement de la même manière, l'âge de la structure ne semble donc pas être un facteur permettant à lui seul d'expliquer la faible moyenne d'ICG des ponts en béton armé.

Après étude de la répartition de ces ponts dans les différentes Directions Territoriales, cette distribution ne semble pas expliquer non plus pleinement la valeur de l'ICG étant donné que pour chaque valeur d'ICG, les structures sont réparties quasiment en proportions similaires dans chaque direction territoriale.

Directions Territoriales La répartition des ponts parmi les différentes Directions Territoriales est à peu près similaire à la répartition de toutes les structures parmi les Directions Territoriales.

Les directions relatives à la Nouvelle Autoroute 30, la Concession 125 et le Transport Maritime représentent seulement 1% des ponts. On pourra par la suite les écarter.

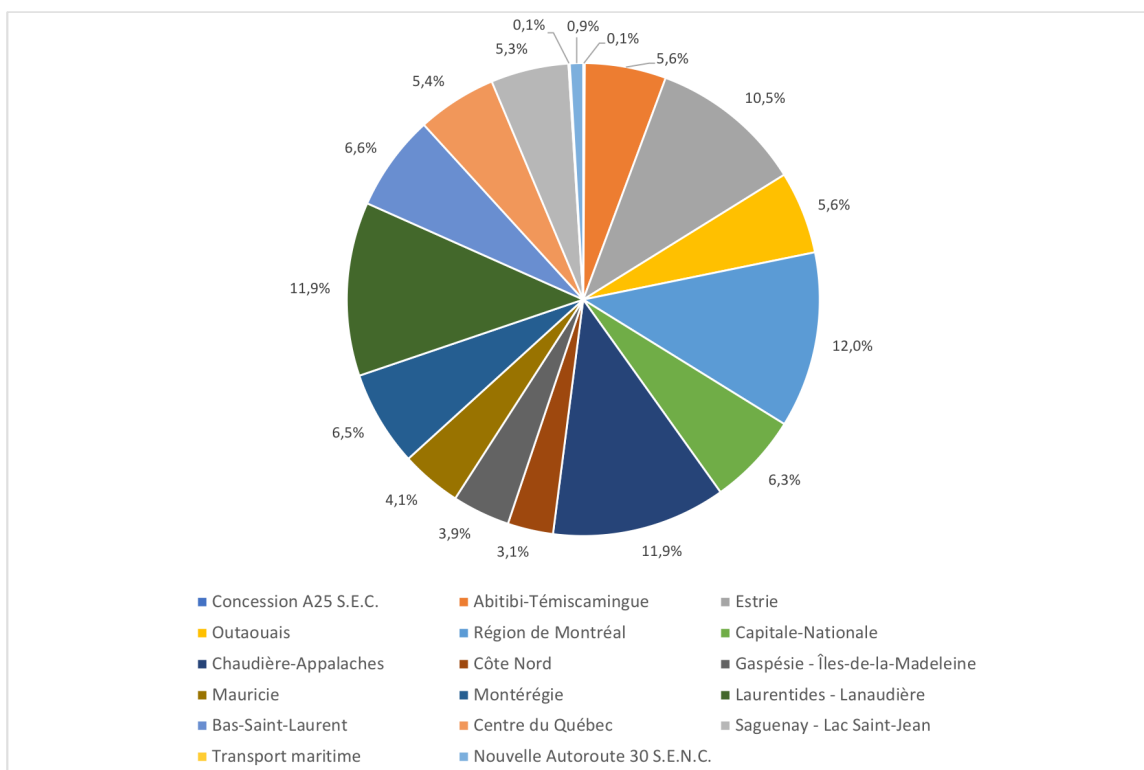


Figure B.2 Distribution du pourcentage de ponts par Direction Territoriale

Un test de Kruskal-Wallis nous apprend que les différences d'ICG ne sont pas significatives, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle qui consiste à dire que les moyennes présentées par le Tableau B.4 sont égales. Néanmoins les moyennes obtenues pour l'Abitibi-Témiscamingue, l'Estrie, l'Outaouais et la Région de Montréal sont significativement différentes des autres. L'association par direction territoriale ne nous apporte pour l'instant pas d'information pertinente sur l'ICG, il ne semble pas avoir de corrélation entre Direction Territoriale et valeur d'ICG pour les ponts.

Tableau B.4 Moyenne de l'ICG des ponts par direction territoriale

Direction Territoriale	n	$\overline{ICG} (\sigma)$
Abitibi - Témiscamingue	186	4,317 (0,948)
Estrie	337	4,489 (0,929)
Outaouais	199	4,804 (0,538)
Région de Montréal	632	4,339 (0,963)
Capitale-Nationale	279	4,534 (0,825)
Chaudière-Appalaches	376	4,561 (0,821)
Côte-Nord	186	4,409 (0,835)
Gaspésie - Île-de-la-Madeleine	158	4,538 (0,886)
Mauricie	168	4,60 (0,767)
Montérégie	253	4,3 (0,97)
Laurentides-Lanaudière	351	4,575 (0,8)
Bas-Saint-Laurent	239	4,615 (0,785)
Centre-du-Québec	186	4,172 (1,168)
Saguenay-Lac Saint-Jean-Chibougamau	198	4,631 (0,579)

ANNEXE C STATISTIQUES DESCRIPTIVES - PORTIQUES

Les portiques sont bien plus rapides à traiter car il n'y a pas réellement de catégorisation : quatre types seulement les composent. Lorsqu'il s'agit de décrire l'ICG, le matériau n'est pas un facteur déterminant étant donné que les deux seuls types statistiquement importants dans ce calcul sont en béton armé. Les types 35 et 36 étant similaires, la seule explication de la différence de 0,24 points environ d'ICG est donc liée à l'environnement de la structure même, c'est-à-dire au remblai et à sa composition. Un test de Mann-Whitney nous indique que cette différence d'ICG est significative $prob > |z| = 0.006$.

Tableau C.1 Distribution et ICG moyen des portiques

Type de la structure	n	Pourcentage (%)	n_{ICG}	$ICG (\sigma)$
35 - Portique en béton armé	734	65,48	586	4,824 (0,565)
36 - Port. béton armé, ss remblai	377	33,63	300	4,553 (0,907)
37 - Portique en béton précontraint	4	0,36	4	5 (0)
47 - Portique en béton	6	0,54	0	-
Total	1121	100,00	890	4,734 (0,780)

Le peu d'observations recensées dans certaines directions territoriales comme en Abitibi-Témiscamingue, en Outaouais ou en Côte-Nord laissent à nous demander s'il y a peu de structures pour lesquelles on dispose d'un ICG dans ces directions territoriales ou si on a tendance à moins construire de portiques dans ces zones. La Figure C.1 nous valide la seconde hypothèse : en effet, les constructions dans ces trois directions territoriales représentent toutes les trois 1% chacune du total de constructions de portiques recensé au Québec.

La plus faible moyenne d'ICG est celle du Centre-du-Québec.

L'Abitibi-Témiscamingue et la Mauricie se dénotent par des moyennes particulièrement élevées malgré leur faible nombre d'observations. L'Estrie, Capitale-Nationale, Chaudière-Appalaches et le Bas-Saint-Laurent sont les valeurs les plus proches de la moyenne globale de tous les portiques présentée au Tableau C.1.

Tableau C.2 Moyenne de l'ICG des portiques par direction territoriale

Direction Territoriale	n	$\overline{ICG} (\sigma)$
Abitibi - Témiscamingue	9	4,889 (0,333)
Estrie	102	4,873 (0,481)
Outaouais	11	5 (0)
Région de Montréal	82	4,561 (0,876)
Capitale-Nationale	116	4,81 (0,542)
Chaudière-Appalaches	149	4,765 (0,586)
Côte-Nord	14	5 (0)
Gaspésie - Île-de-la-Madeleine	41	4,488 (1,08)
Mauricie	26	4,884 (0,431)
Montréal	90	4,822 (0,572)
Laurentides-Lanaudière	58	4,638 (0,810)
Bas-Saint-Laurent	79	4,709 (0,719)
Centre-du-Québec	63	4,429 (1,146)
Saguenay-Lac Saint-Jean-Chibougamau	50	4,8 (0,639)

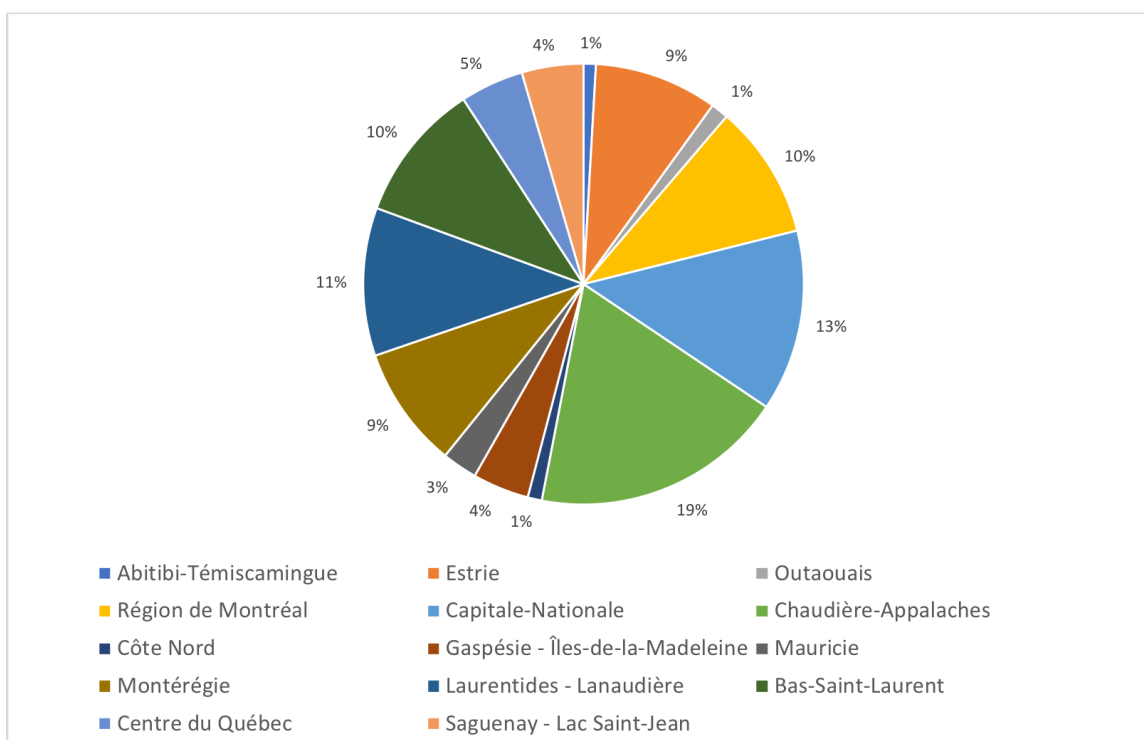


Figure C.1 Nombre de constructions de portiques par Direction Territoriale

ANNEXE D RÉSULTATS DE LA RÉGRESSION DE L'ICG

Tableau D.1 Résultats de la régression générale sur l'ICG (t_{stat}) contrôlant pour les ponceaux arqués, les ponts en arc, le béton armé et le Bas-Saint-Laurent. Niveaux de significativités : 1%(* * *), 5%(**) et 10%(*).

Variable	Coeff.	Variable	Coeff.
age	-.0175281*** (-14.14)	bois	-.0237856 (-0.15)
log(age)	.1822528*** (5.42)	acier-bois	.0309398 (0.75)
geo_{lattd}	.0099218 (0.59)	Montréal	-.1954259*** (-5.54)
geo_{longt}	-.0267786*** (-4.29)	Centre Québec	-.3572124*** (-8.10)
val_{longr}	-7.98e-07*** (-7.77)	Côte-Nord	.0239191 (0.41)
structure_replaçante	.0544799* (1.73)	Saguenay	-.076685 (-1.40)
pont	.3476212*** (4.92)	Capitale	-.0672212* (-1.85)
À poutres	-.0872645* (-1.83)	Montréal	-.2000974*** (-4.65)
portique	.4946243*** (7.97)	Laurentides	-.1109313*** (-2.92)
rectangulaire	.5919417*** (9.12)	Estrie	-.0307831 (-0.76)
voûté	.4358593*** (6.08)	Abitibi	-.3775779*** (-4.58)
acier	.2460688*** (7.99)		
béton précontraint	.2170387*** (6.95)		
		R^2_{aj}	21.62%

ANNEXE E ASSOCIATIONS BIVARIÉES ET MULTIVARIÉES

Tableau E.1 Associations bivariées des caractéristiques, de la localisation géographique, de la catégorie de structure, du matériau de construction et de la Direction Territoriale avec la probabilité d'être une structure remplacée par une structure d'un autre type (t_{stat}) Niveaux de significativités : 1%(* * *), 5%(**) et 10%(*).

Variable	Logit	Probit
Caractéristiques		
Âge	.012*** (6.54)	.007*** (6.75)
val_{longr}	1.27e-05*** (4.69)	6.86e-06*** (4.83)
val_{largr}	7.69e-05*** (5.64)	2.87e-05*** (5.36)
Localisation		
geo_{lattd}	-.144*** (-3.93)	-.09*** (-4.00)
geo_{longt}	-.044** (-2.55)	-.026** (-2.52)
Catégorie		
Pont	-1.911*** (-14.91)	-1.124*** (-15.65)
Ponceau	1.111*** (7.98)	.651*** (8.30)
Portique	1.984 (9.03)	1.102 (10.12)
Matériau		
Béton armé	1.978*** (14.86)	1.156*** (15.75)
Béton précontraint	1.24 (4.81)	.704 (5.16)
Acier	.934*** (5.60)	.545*** (5.84)
Acier-bois	-4.039*** (-21.63)	-2.379*** (-24.33)

Tableau E.1 Associations bivariées des caractéristiques, de la localisation géographique, de la catégorie de structure, du matériau de construction et de la Direction Territoriale avec la probabilité d'être une structure remplacée par une structure d'un autre type (t_{stat}) Niveaux de significativités : 1%(* * *), 5%(**) et 10%(*) (suite et fin).

Variable	Logit	Probit
Dir. Terr.		
Montréal	1.271*** (4.24)	.721*** (4.58)
Gaspésie	-.688*** (-3.38)	-.423*** (-3.34)
Centre Québec	.701*** (2.77)	.410*** (2.88)
Bas-St-Laurent	-1.203*** (-6.24)	-.744*** (-6.20)
Chaudière-App.	-.301** (-2.02)	-.182** (-2.01)
Côte-Nord	1.194*** (3.67)	.679*** (3.94)
Saguenay	-.678*** (-3.06)	-.417*** (-3.02)
Mauricie	.210 (0.62)	.126 (0.63)
Capitale-Nat.	.433* (1.92)	.256** (1.96)
Montréal	1.439*** (5.50)	.811*** (5.99)
Laurentides-Lanau.	-.985*** (-5.26)	-.607*** (-5.20)
Outaouais	-.806*** (-3.12)	-.497** (-3.08)
Etrie	.739*** (3.43)	.432*** (3.55)
Abitibi	-.241 (-0.79)	-.147 (-0.78)

Tableau E.2 Résultat de la régression logistique multivariée du remplacement par un type nouveau selon les caractéristiques (contrôlant pour la largeur), la localisation géographique (contrôlant pour la longitude), la catégorie de structure (contrôlant pour les portiques), le matériau de construction (contrôlant pour le béton précontraint) et la Direction Territoriale (contrôlant pour l'Abitibi)(t_{stat}) Niveaux de significativités : 1%(* * *), 5%(**) et 10%(*).

		Variable	Coeff
		Dir. Terr.	
		Montréal	.805 (1.12)
		Gaspésie	.052 (0.10)
		Centre Québec	.433 (0.67)
		Bas-St-Laurent	-.526 (-1.04)
		Chaudière-App.	.646 (1.12)
		Côte-Nord	1.044 (1.39)
		Saguenay	-.683 (-1.28)
		Mauricie	-.390 (-0.62)
		Capitale-Nat.	-.036 (-0.07)
		Montréal	1.146 (1.55)
		Laurentides-Lanau.	-.229 (-0.37)
		Outaouais	1.015 (1.38)
		Estrie	1.963*** (2.59)
Variable	Coeff.		
Caractéristiques			
Âge	.033** (2.35)		
val_{longr}	-5.27e-07 (-0.28)		
Localisation			
geo_{lattd}	.253 (1.26)		
Catégorie			
Pont	-.023 (-0.05)		
Ponceau	-.781*** (-2.96)		
Matériau			
Béton armé	.382 (0.89)		
Acier	-.249 (-0.79)		
Acier-bois	-4.436*** (-13.05)		

ANNEXE F TYPE DE STRUCTURES REMPLACÉES

Tableau F.1 Répartition des types de structures remplacées

Type des structures remplacées	Fréquence	Pourcentage
11 - Ponceau à dalle en béton armé	7	0.43
12 - Ponceau portique en béton armé	17	1.05
14 - Ponceau circulaire en béton armé	1	0.06
13 - Ponceau rectang. en béton armé	75	4.63
15 - Ponceau circulaire en acier	71	4.38
17 - Ponceau elliptique en acier	15	0.93
18 - Ponceau arqué en acier	163	10.06
19 - Ponceau voûté en béton armé	2	0.12
20 - Ponceau voûté en acier	4	0.25
21 - Ponceau rectangulaire en bois	1	0.06
31 - Pont à dalle pleine en béton armé	102	6.29
33 - Pont à dalle évidée en béton armé	12	0.74
34 - Pont à dalle évidée en béton pré..	2	0.12
35 - Portique en béton armé	37	2.28
36 - Port. béton armé, ss remblai	55	3.39
38 - Pont à béquilles, béton armé	15	0.93
39 - Pont à béquil., béton précont.	2	0.12
41 - Pont à poutres en béton armé	222	13.7
42 - Pont à pout. béton précont., pré..	42	2.59
43 - Pont à pout. béton préc., coul. ..	1	0.06
44 - Pont à poutres en acier	68	4.19
45 - Pont acier-bois	527	32.51
46 - Pont à poutres en bois	7	0.43
47 - Portique en béton	9	0.56
50 - Pont à béquilles en béton	12	0.74
51 - Pont à béquilles, en acier	2	0.12
52 - Pont à poutres en acier enr. de ..	52	3.21
56 - Pont à poutres-caissons en béton..	6	0.37
57 - Pont à pout.-cais. en béton préc..	7	0.43
58 - Pont à poutres-caissons en acier	6	0.37

Tableau F.1 Répartition des types de structures remplacées (suite et fin).

Type des structures remplacées	Fréquence	Pourcentage
61 - Pont à tablier inférieur, en acier	22	1.36
63 - Pont de type Pony-Warren, en acier	29	1.79
64 - Pont de type Bailey, en acier	5	0.31
65 - Pont à tablier supérieur, en acier	7	0.43
67 - Pont couvert	4	0.25
72 - Pont à tablier inférieur, en acier	1	0.06
75 - Pont à tablier supér., béton armé	8	0.49
82 - Pont à haubans	1	0.06
85 - Pont mobile	2	0.12
Total	1621	100.00