

# ESTIMATION DES COUTS MARGINAUX D'ENTRETIEN DU RESEAU FERRE NATIONAL

Expertise des travaux économétriques

30 janvier 2017



---

Frontier Economics Ltd est membre du réseau Frontier Economics, composé de deux sociétés distinctes établies en Europe (Frontier Economics Ltd, avec des bureaux à Bruxelles, Cologne, Dublin, Londres et Madrid) et en Australie (Frontier Economics Pty, avec des bureaux à Melbourne et Sidney). Les actionnaires des deux entités sont indépendants et les engagements légaux pris par l'une des sociétés ne lient pas l'autre société du réseau. L'ensemble des opinions exprimées dans ce document sont celles de Frontier Economics Ltd.

## TABLE DES MATIERES

1	Introduction	1
2	Modélisation de SNCF Réseau et ses conseils	3
2.1	Données	3
2.2	Approche de modélisation	4
2.3	Principaux résultats	7
3	Analyses des services de l'Arafer	10
3.1	Commentaires des services de l'Arafer sur la démarche économétrique de SNCF Réseau	10
3.2	Analyse des données	10
3.3	Choix de la forme fonctionnelle	11
3.4	Analyse de sensibilité à la désagrégation de la variable de trafic	11
3.5	Analyse de la sensibilité au choix des variables explicatives	12
3.6	Analyses des interactions entre les variables explicatives et effets non-linéaires	12
3.7	Distinction du coût marginal d'entretien par sous-réseau	12
4	Analyse de Frontier Economics – Principes généraux	14
4.1	Principes de tarification de l'accès à l'infrastructure ferroviaire	14
4.2	Bonnes pratiques de modélisation économétrique	14
4.3	Approche de choix d'un modèle	15
5	Analyse de Frontier Economics – Choix de la forme fonctionnelle	16
5.1	Contexte	16
5.2	Comprendre les propriétés des données	17
5.3	Choix du modèle	21
5.4	Stabilité des résultats entre les modèles	25
5.5	Validité des hypothèses	28
5.6	Sensibilité des résultats	31
5.7	Conclusions et recommandation	35
6	Analyse de Frontier Economics – Distinction par sous-réseau	39
6.1	Principes	39
6.2	Comprendre la relation a priori entre UIC, trafic et coûts	40
6.3	Représentations graphiques	42
6.4	Résultats économétriques	44
6.5	Conclusion	46
7	Recommandations d'évolutions futures du modèle	48
	<b>Annexe A</b> Analyses additionnelles de SNCF Réseau.....	<b>51</b>

# 1 INTRODUCTION

Créée en 2009, l'Arafer est notamment le garant de l'accès équitable des entreprises au réseau ferroviaire. Ses pouvoirs pour remplir cette mission incluent l'émission d'un avis sur le Document de Référence de Réseau proposé par SNCF Réseau chaque année, et l'émission d'un avis conforme sur les redevances d'infrastructures qui déterminent la tarification de l'accès au réseau ferroviaire en France.

Un corpus réglementaire assure la transposition en droit français des dispositions européennes relatives à la tarification des prestations minimales, et dicte plus généralement les principes de tarification de l'accès au réseau ferré national français. En particulier, le Décret n°97-446 du 5 mai 1997 dispose que la redevance de circulation est destinée à couvrir la part variable des charges d'exploitation et de maintenance du réseau. Le Décret n°2003-194 du 7 mars 2003<sup>1</sup> précise quant à lui certains des principes auxquels se conforme SNCF Réseau dans sa proposition de redevances<sup>2</sup>.

Les coûts relevant du périmètre de la redevance de circulation font depuis plusieurs années l'objet de nombreuses analyses et travaux d'estimation, notamment depuis la refonte tarifaire qui a fait suite en 2010 au rapport sur la tarification du réseau ferré<sup>3</sup>.

L'Arafer a exigé des révisions des travaux dans son avis n°2015-004 sur le Document de Référence de Réseau pour l'horaire de service 2016. L'Autorité a également publié en février 2016 ses recommandations relatives à la refonte de la tarification de l'utilisation du réseau ferré national et aux travaux associés<sup>4</sup>.

Ainsi, depuis 2015 SNCF Réseau a développé un nouveau modèle, à partir notamment de données plus récentes et appropriées, en vue de remédier aux écueils identifiés par le régulateur. Ces travaux ont notamment porté sur l'estimation des coûts marginaux d'entretien de l'infrastructure.

Le gestionnaire d'infrastructure a remis aux services de l'Arafer les résultats de ses travaux, dont l'étude approfondie a abouti à la production d'un rapport technique par les services de l'Arafer.

L'objectif de la présente étude consiste à répondre aux questions soulevées par les services de l'Arafer concernant ces travaux. Ces questions portent plus précisément :

- Sur la forme fonctionnelle retenue pour l'analyse des coûts d'entretien
- Sur la désagrégation de l'analyse des coûts d'entretien entre réseau structurant et réseau capillaire.

Nous notons également à titre contextuel que le gestionnaire d'infrastructure a mis en ligne le 14 décembre 2016 le Document de Référence Réseau pour

---

<sup>1</sup> Modifié depuis par le Décret n°2015-1040 du 20 août 2015

<sup>2</sup> Voir notamment articles 29, 30

<sup>3</sup> « Rapport sur la tarification du réseau ferré », IGP N°2007-M-059-02, CGPC N.005215-01, Juillet 2007

<sup>4</sup> Arafer, « Recommandations n° 2016-016 du 10 février 2016 relatives à la refonte de la tarification de l'utilisation du réseau ferré national », 10 février 2016

ESTIMATION DES COUTS MARGINAUX D'ENTRETIEN DU RESEAU FERRE  
NATIONAL

l'horaire de service 2018, dont l'entrée en vigueur reste conditionnelle à l'avis conforme de l'Autorité.

## 2 MODELISATION DE SNCF RESEAU ET SES CONSEILS

SNCF Réseau a mandaté le groupement STRATEC-ITS<sup>5</sup>-ECOPLAN pour les conseiller sur l'élaboration d'un modèle économétrique d'analyse des coûts d'entretien du réseau. Le rapport de l'étude intitulé « Modelling railway infrastructure maintenance cost in France », daté du 16 septembre 2016, issu de leur étude, a été transmis aux services de l'Arafer. Cette partie présente les éléments saillants du rapport, notamment relatifs aux deux questions approfondies dans le cadre de la mission.

### 2.1 Données

L'étude concerne quatre catégories de coûts d'entretien: voie, appareils de voie (AdV), signalisation et caténaires. Le présent rapport se concentre sur la source de coûts principale – l'entretien des voies.

Les données proviennent des dépenses constatées sur l'année 2013 par SNCF Réseau. Ensuite, STRATEC puis Ecoplan ont nettoyé ces données. Ils ont notamment supprimé des observations incohérentes, pour lesquelles le trafic était manquant ou nul, ou ayant une très courte longueur.

Les données sont collectées à la maille des sections de ligne<sup>6</sup>. Au total, la base de données contient 1370 observations, dont 1127 ont été retenues pour l'analyse après nettoyage de la base de données.

Le jeu de données est transversal et les techniques d'analyse économétrique de panel telles que les effets fixes ne peuvent donc pas être utilisées pour l'analyse.

Le jeu de données est composé des données de coûts d'entretien et de séries de données pour des potentielles variables explicatives de ces coûts:

- Le tonnage journalier sur le segment, distingué par sous-activité (par exemple trafic de trains à grande vitesse voyageurs).
- Des variables techniques tels que « âge moyen du rail », « vitesse maximum autorisée », « nombre d'AdV par kilomètre », « nombre de traverses par km », « proportion de la section en courbe », « proportion de la section en rails soudés », « proportion de la section en pente », « ligne haute vitesse », « région », « profil de rail », « densité des appareils de dilatation », « âges moyen des traverses », « proportion des transverses en béton », « proportion de rails nouveaux », « nombre de voies » ainsi que des variables de climat ,
- La longueur de section,
- Une variable dichotomique pour les observations nulles<sup>7</sup>.

---

<sup>5</sup> Institute for Transport Studies of University of Leeds

<sup>6</sup> SNCF Réseau indique que ce niveau de granularité, bien que moins fin que celui des données utilisées pour les coûts de renouvellement, est élevé et en particulier supérieur à la plupart des études sur la question des coûts marginaux de maintenance.

<sup>7</sup> Cette technique est utilisée afin de résoudre la problématique des observations nulles. Ce point est repris plus bas.

## 2.2 Approche de modélisation

### Revue de littérature

L'étude d'Ecoplan se penche d'abord sur la littérature existante sur le sujet de la modélisation des coûts d'entretien. Les conclusions principales tirées de cette revue de littérature sont résumées ci-après.

Les coûts marginaux d'entretien peuvent être déterminés à partir de deux approches. La première est une approche d'ingénierie – l'approche « bottom-up » - qui se base sur des connaissances techniques. La deuxième est une approche économétrique - l'approche « top-down » - qui vise à estimer une fonction de coûts d'entretien et à en déduire l'élasticité des coûts au trafic. Seule l'approche économétrique est retenue par SNCF Réseau et les services de l'Arafer.

Dans les modèles économétriques, le trafic est reconnu comme la variable explicative principale des coûts d'entretien. Une distinction entre le trafic de trains voyageurs et de trains de fret est généralement faite. Ecoplan indique également que dans certaines études, le trafic des trains de voyageurs est décomposé plus finement en plusieurs sous-catégories.

Dans les études précédentes sur le sujet, les variables explicatives des coûts d'entretien comprennent généralement des caractéristiques techniques comme la longueur de la voie, de l'itinéraire, ou des sections de changement, la présence de tunnels et de ponts. L'âge d'une section ou la vitesse maximum sur une section est souvent utilisée comme proxy de la qualité de la voie. De manière générale, si le choix des variables qui devraient être incluses peut être discuté d'un point de vue technique, c'est généralement la disponibilité de données qui restreint le choix de variables explicatives pouvant être retenues dans le modèle.

Ecoplan reporte que le choix de la forme fonctionnelle de la fonction de coût est largement discuté dans la revue de littérature. Deux familles de formes fonctionnelles sont utilisées dans la majorité des études:

- Les modèles en log:
  - Ces modèles comprennent les régressions en log-log, en log-linéaire et en translog.
  - Des régressions en translog récentes ont produit des résultats plausibles par rapport à la variation de l'élasticité avec le trafic. Ecoplan note que ces modèles sont largement utilisés dans la littérature académique pour l'analyse économétrique des coûts dans le secteur ferroviaire.
- Les modèles en Box-Cox :
  - Il existe plusieurs versions des modèles Box-Cox qui se différencient par les restrictions imposées sur les coefficients. La forme la plus générale n'impose pas de restrictions sur les paramètres de transformations Box-Cox et un paramètre différent pour chaque variable peut donc être estimé. Les versions plus restrictives imposent par exemple un paramètre de

transformation Box-Cox unique et commun à toutes les variables ou à toutes les variables explicatives.

- Les paramètres de transformation Box-Cox sont estimés en maximisant la log-vraisemblance, et ce simultanément avec l'estimation du modèle<sup>8</sup>. Ceci implique que les modèles en Box-Cox ont toujours un meilleur ajustement aux données (apprécié par la log-vraisemblance) que les modèles en log-log ou linéaires analogues.
- Ils ne peuvent généralement pas inclure de variables quadratiques ou cubiques (sauf pour les modèles en Box-Tidwell pour lesquels la variable dépendante est transformée en log).
- Ces modèles englobent les régressions en log-log, en log-linéaires et linéaires et sont donc plus « flexibles ». On peut noter également que les modèles en Box-Tidwell englobent les régressions en translog.
- Dans la littérature ces modèles ont pu produire des résultats plus plausibles par rapport à la variation de l'élasticité avec le trafic.

### Formes fonctionnelles

Ecoplan estime trois types de modèles:

- Ecoplan estime d'abord un modèle en Box-Tidwell (BT). Il s'agit d'un cas particulier de la forme Box-Cox pour lequel le paramètre de transformation de la variable dépendante est égal à zéro, ce qui équivaut à appliquer une transformation logarithmique (ln) à la variable dépendante. Quatre versions du modèle sont testées avec et sans différents termes d'interactions.
- Ecoplan estime ensuite un modèle en Box-Cox sans termes d'interaction (BC). Trois versions du modèle sont également testées avec différentes restrictions sur les paramètres de transformation des variables explicatives.
- Pour finir Ecoplan estime également trois versions d'un modèle Box-Cox avec des termes d'interaction (BCI).

### Variables explicatives

Ecoplan estime le modèle en distinguant entre trafic fret et trafic voyageurs. Ce choix est justifié en se référant à la littérature. De plus, Ecoplan note que distinguer plus finement les types de trafic entraîne des incohérences au niveau du signe du coefficient de certaines variables de trafic.

Dans le modèle final, les variables suivantes ont également été retenues:

- Le tonnage journalier sur le segment, avec une distinction entre trafic de voyageurs et trafic de fret.
- Des variables techniques tels que « âge moyen du rail », « vitesse maximum autorisée », « nombre d'AdV par kilomètre », « nombre moyen de traverses par km », « proportion de la section en courbe », « proportion de la section en rails soudés », « ligne haute vitesse », « région »,

<sup>8</sup> Pour les régressions en Box-Tidwell, la détermination du paramètre de transformation optimal se fait manuellement par itérations.

- Une variable dichotomique pour les observations nulles.

En revanche, les variables suivantes ont été exclues du modèle pour plusieurs raisons:

- parce qu'elles ne sont pas significatives: c'est le cas des variables « profil de rail », « densité des appareils de dilatation », proportion de la section en pente », proportion des transverses en béton », « proportion de rails nouveaux », et « nombre de voies »,
- parce qu'elles ne sont pas significatives à cause de leur colinéarité avec une autre variable: il s'agit des variables « âge moyen des traverses » (forte corrélation avec « âge moyen des rails »), et « variables de climat » (forte corrélation avec les « régions »),
- parce que les coûts sont exprimés en €/kTBC-km et que les experts de SNCF Réseau estiment qu'il n'y a pas d'économie d'échelle dans l'entretien des sections de voie : la « longueur de section ».

### Traitement des résultats

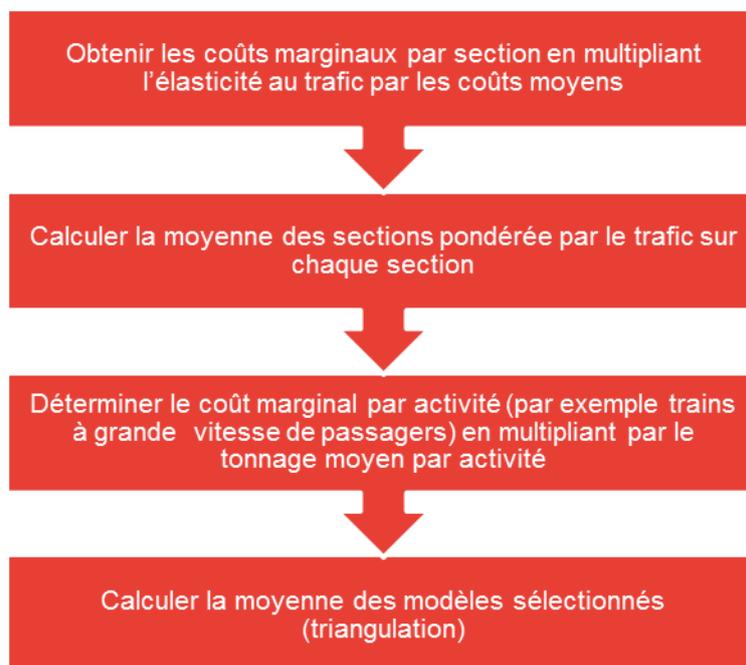
Après avoir choisi un modèle pour l'analyse économétrique des coûts d'entretien de la voie, des appareils de voie (AdV), de la signalisation et des caténaires, il est nécessaire de convertir les résultats de régressions en coûts marginaux.

Pour ce faire, Ecoplan calcule d'abord l'élasticité au trafic pour chaque observation. Ensuite, le coût marginal en euro par kTBC-km est déduit en multipliant l'élasticité par les coûts moyens d'entretien à partir des données constatées.

Afin d'obtenir un coût marginal moyen sur l'ensemble du réseau, Ecoplan calcule une moyenne pondérée par le trafic du coût marginal. Ainsi, un coût marginal moyen par kTBC-km est obtenu.

La redevance de circulation est facturée en euro par train-km et différenciée pour neuf types de train. Un coût marginal en euro par train-kilomètre est calculé pour chaque sous-activité en multipliant le coût marginal à la kTBC-kilomètre par le tonnage moyen de chaque sous-activité. Le tonnage moyen correspond ici au tonnage déclaré par les entreprises ferroviaires au moment de la réservation des sillons.

**Figure 1** Passage des résultats de régression au coût marginal et à la redevance de circulation



Source: Frontier Economics

## 2.3 Principaux résultats

Les conclusions suivantes sont tirées par Ecoplan à partir des résultats des régressions :

- Pour l'ensemble des modèles, les résultats confirment la relation positive et statistiquement significative entre le trafic et les coûts d'entretien. Les densités de trafic de trains de voyageurs et de fret ont toutes deux un impact positif et significatif sur les coûts.
- Pour les modèles en Box-Tidwell, la version la plus complexe qui comporte des termes d'interactions et des termes quadratiques est plus performante selon les tests de ratio de log-vraisemblance. En accord avec les résultats du test, Ecoplan recommande le modèle en Box-Tidwell le plus complet. Certaines variables techniques et certains termes d'interaction ne sont pas statistiquement significatifs dans ce modèle mais ils sont retenus par défaut.
- Pour les modèles en Box-Cox sans termes d'interaction, l'ajout de flexibilité autour des coefficients de transformation augmente significativement la log-vraisemblance. Au regard de la log-vraisemblance les résultats confortent l'utilisation d'une transformation Box-Cox de la variable dépendante et tous les coefficients de transformations sont significativement différents de zéro.
- Pour les modèles en Box-Cox avec des termes d'interaction, le modèle le plus complexe est à nouveau le plus performant d'après les résultats des tests de ratio de log-vraisemblance. Certaines variables techniques et certains termes d'interaction ne sont pas statistiquement significatifs dans ce modèle mais ils sont retenus par défaut.

- Le tableau ci-dessous présente les élasticités moyennes au trafic, pondérées par les tonnes-kilomètre circulées de chaque section. On observe une variation des élasticités obtenues à partir des différents modèles, plus marquée pour les modèles fret que voyageurs. L'élasticité au trafic de trains de voyageurs est également plus élevée que l'élasticité au trafic de trains de fret pour tous les modèles. Enfin, les élasticités tendent à être plus élevées pour les modèles plus flexibles.
- Ecoplan fait également remarquer que les élasticités au trafic augmentent avec le trafic. Cette relation semble plausible. Néanmoins, cette relation est moins présente pour le trafic fret pour les modèles les plus flexibles (mais pas dans les modèles retenus in fine).

**Figure 2 Elasticité des coûts d'entretien au trafic (moyenne pondérée par les km de section)**

	Box-Tidwell				Box-Cox			Box-Cox avec interactions		
	BT1	BT2	BT3	BT4	BC2	BC3	BC4	BCI2	BCI3	BCI4
Voyageurs	0.352	0.385	0.505	0.458	0.352	0.327	0.385	0.338	0.404	0.435
Fret	0.171	0.050	0.017	0.055	0.156	0.150	0.026	0.028	0.245	0.260

Source: ECOPLAN, *Modelling railway infrastructure maintenance cost in France*, p.39

Le tableau ci-dessous présente les coûts marginaux moyens obtenus à partir des différents modèles pour les trains par kTBC-kilomètre. De manière générale, les modèles plus complexes entraînent des coûts marginaux plus élevés. En générale, les coûts marginaux obtenus dans les modèles s'inscrivent dans l'intervalle des résultats obtenus dans la littérature.

**Figure 3 Coûts marginaux d'entretien en € 2013/kTBC-kilomètre**

	BT1	BT2	BT3	BT4	BC2	BC3	BC4	BCI2	BCI3	BCI4
Voyageurs	1.086	1.147	1.534	1.504	1.011	0.969	1.038	0.970	1.332	1.251
Fret	0.843	0.288	0.240	0.550	0.655	0.663	0.391	0.204	0.553	0.808

Source: ECOPLAN, *Modelling railway infrastructure maintenance cost in France*, p.43

Ecoplan décide de retenir une moyenne de trois modèles. Ce choix est justifié dans le rapport d'Ecoplan au regard (1) du précédent réglementaire : les régulateurs au Royaume-Uni ont tendance à prendre la moyenne de plusieurs modèles si les résultats diffèrent de l'un à l'autre et (2) du fait qu'il n'y a pas de raison évidente de choisir un modèle plutôt que l'autre. Dans le cadre de la mission, SNCF Réseau ajoute considérer cette approche comme raisonnable et conservatrice car limitant le risque d'erreur et de choisir un unique modèle dont les résultats pourraient être trop spécifiques.

Les trois modèles retenus sont BT4, BC4, BCI4, les variantes les plus flexibles et complexes au sein de chaque famille de modèles. La raison principale pour laquelle ces modèles sont retenus est leur ajustement aux données, mesurée par la log-vraisemblance<sup>9</sup>.

<sup>9</sup> La plausibilité des résultats a également été utilisée comme critère : dans les cas où le modèle présentant la log-vraisemblance la plus élevée donnait des résultats (valeur, signe) non plausibles, alors le modèle présentant la deuxième log-vraisemblance la plus élevée est priorisé.

Le modèle BT4 est notamment retenu car il n'est pas englobé par les modèles Box-Cox en raison de la présence de termes quadratiques mais il englobe le modèle translog largement utilisé dans la littérature.

Le modèle BC4 est retenu même si il est englobé dans le modèle BCI4 car il a l'avantage d'être plus parcimonieux.

## 3 ANALYSES DES SERVICES DE L'ARAFER

Dans le but de vérifier la reproductibilité des résultats obtenus par SNCF Réseau et ses consultants et de favoriser l'efficacité des échanges entre le régulateur et le gestionnaire d'infrastructure, l'Arafer a demandé à SNCF Réseau la transmission des données désagrégées permettant la modélisation des coûts d'entretien. Ces données furent transmises par SNCF Réseau en deux parties, le 23 novembre 2015 puis le 29 janvier 2016.

Les services de l'Arafer ont réalisé des analyses de sensibilité des résultats obtenus par SNCF Réseau et les présentent dans un rapport daté du 27 mai 2016. Les analyses présentées portent uniquement sur la composante « voie » de l'infrastructure mais l'Autorité souligne que des résultats très similaires ont été obtenus pour les autres composantes.

Cette section retranscrit les éléments saillants de l'analyse des services de l'Arafer. Cette section traite plus particulièrement des aspects par rapport auxquels Frontier se positionne dans ce rapport, c'est-à-dire le choix de la forme fonctionnelle et la désagrégation de l'échantillon en groupes UIC.

Par ailleurs, nous notons que les analyses économétriques des coûts de maintenance sont plus compliquées à répliquer en raison de la complexité des modèles utilisés par SNCF et, pour certaines variantes des modèles, du logiciel nécessaire aux analyses (TRIO).

### 3.1 Commentaires des services de l'Arafer sur la démarche économétrique de SNCF Réseau

Les services de l'Arafer estiment tout d'abord que l'augmentation de la log-vraisemblance associée à l'inclusion de nombreuses variables d'interaction dans les modèles BT3, BT4, BCI3 et BCI4 n'est pas une justification suffisante pour l'inclusion de ces variables d'interaction. Ils soulignent qu'aucun autre élément n'est présenté pour justifier l'intérêt de l'inclusion de ces variables dans le modèle.

De plus, la complexité accrue des estimations en comparaison avec la littérature académique sur le sujet et les précédentes estimations peut, selon les services de l'Arafer, entraver la compréhension de la méthodologie par les acteurs.

### 3.2 Analyse des données

Les services de l'Arafer présentent des statistiques descriptives à partir des données transmises par SNCF Réseau. Les éléments suivants sont notamment présentés: moyenne, écart-type, minimum et maximum des variables de coûts d'entretien par km, de longueur de voie, de tonnage journalier de fret, de tonnage journalier de voyageurs, de densité de traverses, de vitesse maximale, d'âge du rail et de densité d'appareils de voie, de pourcentage de segment en courbe, de pourcentage de segment en long rail soudé, de pourcentage de segment LGV.

### 3.3 Choix de la forme fonctionnelle

Le rapport d'Ecoplan ne présente que les résultats pour les formes fonctionnelles Box-Tidwell et Box-Cox. Les services de l'Arafer notent que la littérature mobilise également d'autres formes fonctionnelles et choisit de ne pas les écarter a priori. Les résultats des régressions testées par les services sont présentés dans le rapport de l'Arafer.

La figure ci-dessous présente les élasticités et coûts marginaux calculés selon les différents modèles.

**Figure 4 Résultats des régressions réalisées par les services de l'Arafer pour différentes formes fonctionnelles (Coûts marginaux en €/kTBC-km)<sup>10</sup>**

	Linéaire	Log-log	Box-Tidwell	Box-Cox ( $\lambda=\theta$ )	Box-Cox ( $\lambda\neq\theta$ )
Elasticité voyageurs	0.22	0.06	0.26	0.17	0.25
Elasticité fret	0.06	0.09	0.19	0.15	0.14
Cout marginal voyageurs	0.905	0.261	1.052	0.696	1.005
Cout marginal fret	0.027	0.367	0.770	0.624	0.574

Source: Services de l'Arafer

Le modèle Box-Tidwell des services de l'Arafer correspond au modèle BT1 d'Ecoplan, le modèle Box-Cox ( $\lambda=\theta$ ) correspond au modèle BC1 et le modèle Box-Cox ( $\lambda\neq\theta$ ) correspond au modèle BC2. Notons que les résultats obtenus par les services de l'Arafer diffèrent légèrement des résultats obtenus par Ecoplan. Les écarts ont fait l'objet d'échanges complémentaires tout au long de la mission et ont été finalement attribués à des différences dans l'importation des données par les logiciels utilisés et de traitement des zéros..

### 3.4 Analyse de sensibilité à la désagrégation de la variable de trafic

Dans les analyses économétriques réalisées par Ecoplan, le trafic voyageurs et le trafic fret sont distingués. Néanmoins, des données de trafic plus fines sont disponibles et les services de l'Arafer estiment donc différents modèles faisant intervenir des désagrégations plus fines du trafic.

Au regard des résultats obtenus, les services de l'Arafer concluent que la question de la désagrégation du trafic mérite d'être creusée. Néanmoins, cet aspect ne fait pas partie du champ de l'étude de Frontier.

<sup>10</sup> Les résultats présentés dans ce tableau ont évolué lors de la réalisation de l'étude à la lumière des échanges entre SNCF Réseau et l'Arafer concernant la version du logiciel STATA utilisée pour réaliser les estimations et le traitement des observations présentant des valeurs nulles. La Figure 13 présente les résultats finaux des estimations des services de l'Arafer.

### 3.5 Analyse de la sensibilité au choix des variables explicatives

Les services de l'Arafer testent la robustesse des résultats obtenus à partir du modèle en Box-Cox retenu par SNCF Réseau à l'inclusion ou l'exclusion de variables explicatives.

De ces analyses, les services de l'Arafer concluent que :

- Les coûts marginaux des modèles testés sont relativement comparables avec ceux de la spécification retenue par SNCF Réseau dans l'ensemble.
- Les signes des coefficients des variables explicatives testées sont cohérents avec les intuitions techniques et économiques des déterminants des coûts d'entretien de l'infrastructure ferroviaire.

### 3.6 Analyses des interactions entre les variables explicatives et effets non-linéaires

Les services de l'Arafer estiment également des modèles contenant différents termes d'interactions entre les variables de trafic et les autres variables explicatives ainsi que des variables quadratiques de trafic.

Les résultats de ces modèles semblent indiquer qu'il existe bien des effets non linéaires entre le trafic et les coûts d'entretien.

En revanche, les services questionnent l'approche adoptée par SNCF Réseau et Ecoplan qui tendent à inclure une large quantité de termes d'interaction sans justifier leur intérêt.

### 3.7 Distinction du coût marginal d'entretien par sous-réseau

Les services de l'Arafer considèrent que la politique d'entretien n'est pas homogène sur l'entièreté du réseau ferré national. En conséquence, ils proposent de prendre en compte une estimation alternative du coût marginal d'entretien pour laquelle on procéderait à des régressions distinctes pour différents sous-réseaux. Les sous-réseaux sont définis en fonction des catégories UIC des différents segments.

Les estimations n'étant pas possibles en Box-Cox à deux paramètres pour certaines sous-parties du réseau, les services de l'Arafer procèdent à des régressions en Box-Cox à paramètre de transformation unique.

De plus, certains segments de gestions ne peuvent pas être attribués à un sous-réseau en particulier (segments appartenant à plusieurs classes UIC) et sont exclus des modèles.

Les principaux résultats des modèles qui distinguent entre les segments UIC 2 à 6 et les segments UIC 7 à 9 sont présentés ci-dessous.

**Figure 5 Résultats des estimations des services de l'Arafer par sous réseaux (coûts marginaux en €/kTBC-km)**

	Réseau structurant (UIC 2 a 6)	Réseau capillaire (UIC 7 a 9)
Elasticité voyageurs	0.18	0.08
Elasticité fret	0.26	0.24
Coût marginal voyageurs	0.553	1.620
Coût marginal fret	0.809	4.906

Source: Services de l'Arafer

Les résultats suggèrent des coûts marginaux beaucoup plus élevés pour le réseau capillaire. Les coûts marginaux obtenus pour le réseau structurant sont relativement proches des résultats obtenus avec la même forme fonctionnelle sur l'ensemble du réseau.

Cependant, les services de l'Arafer soulignent que plusieurs coefficients ne sont pas significatifs dans les modèles estimés séparément pour chaque sous-réseau.

## 4 ANALYSE DE FRONTIER ECONOMICS – PRINCIPES GENERAUX

Cette partie expose les principes généraux qui ont gouverné la revue critique des éléments soumis pour expertise à Frontier Economics. Ils concernent :

- Les principes de tarification de l'accès à l'infrastructure ferroviaire
- Les bonnes pratiques de modélisation économétrique dans le contexte d'un exercice de construction tarifaire
- L'approche de choix d'un modèle d'estimation des coûts.

### 4.1 Principes de tarification de l'accès à l'infrastructure ferroviaire

La Directive 2012/34/UE dispose que les redevances perçues pour l'ensemble des prestations minimales et pour l'accès à l'infrastructure reliant les installations de service doivent être fixées au coût directement imputable à l'exploitation du service ferroviaire. Celui-ci est interprété comme le coût marginal entraîné par un mouvement de train supplémentaire sur le réseau. Cette disposition est déclinée dans le corpus réglementaire français présenté en introduction du présent rapport.

La définition des tarifs doit ainsi atteindre deux objectifs:

- Le recouvrement des coûts directs de l'opérateur imputables à un mouvement de train supplémentaire
- L'efficacité allocative en matière d'utilisation de l'infrastructure: En envoyant le signal de prix adéquat, les entreprises ferroviaires feront circuler des trains seulement quand il est efficace de le faire.

Le coût marginal d'un mouvement de train est un concept local. Les éléments de coûts qui ne sont pas directement associés à une faible augmentation du trafic d'un type de train donné sur un segment donné ne devraient pas être recouverts via la redevance de circulation<sup>11</sup>.

### 4.2 Bonnes pratiques de modélisation économétrique

Dans le milieu académique comme dans le contexte de la construction d'une grille tarifaire, les acteurs tendent à respecter certains principes ou bonnes pratiques de modélisation économétrique. Le respect de ces principes permet généralement une meilleure acceptabilité des résultats. Parmi ces principes de bonnes pratiques, on retrouve:

- La transparence :

---

<sup>11</sup> L'article 32.1 de la Directive 2012/34/UE permet aux gestionnaires de réseaux ferroviaires de recouvrer leurs coûts indirects grâce à une majoration, à la condition que cette majoration puisse être supportée par les acteurs du marché. Cette majoration intervient en France dans la redevance de réservation et dans la redevance d'accès à l'infrastructure ferroviaire.

- Les parties prenantes doivent pouvoir comprendre et interpréter les résultats de la modélisation, y compris:
  - Déterminer l'effet des variables explicatives en termes de direction (influence positive ou négative sur la variable dépendante), d'ampleur de l'impact et de significativité statistique,
  - Comparer les résultats entre les modèles,
  - Comprendre les hypothèses implicites (par exemple les rendements constants par rapport à certaines variables),
  - Détecter les résultats emprunts d'erreurs ;
- Le régulateur doit pouvoir répliquer les résultats en utilisant des outils qui sont accessibles au public et utilisés par une communauté assez large de spécialistes ;
- Le régulateur doit pouvoir effectuer des tests statistiques pour déterminer la validité des résultats.
- La prévisibilité et la stabilité. Obtenir des résultats stables et en accord avec ce qui peut raisonnablement être attendu est un atout important qui renforcera la confiance en l'exactitude des résultats. Plusieurs éléments peuvent être pris en compte pour apprécier la prévisibilité et la stabilité des résultats, par exemple le fait que les résultats reflètent les propriétés de l'ensemble des données mises en évidence par des statistiques descriptives simples, l'obtention de signes et d'ordres de grandeur raisonnables, ou encore la sensibilité limitée à la spécification du modèle.

### 4.3 Approche de choix d'un modèle

Lorsque plusieurs modèles sont envisagés en vue de quantifier la relation entre plusieurs variables d'intérêt, nous recommandons la prise en compte de plusieurs critères lors du choix d'un ou de plusieurs modèle(s):

- Adéquation statistique ou ajustement aux données: plusieurs indicateurs permettent de déterminer dans quelle mesure un modèle capture la variabilité entre les observations au sein de l'échantillon,
- Parcimonie: ce principe consiste à éviter d'inclure des variables supplémentaires et à ne pas utiliser une spécification plus complexe s'il n'y a pas d'avantage clair par rapport à un modèle plus simple,
- Robustesse du modèle à de faibles variations de la spécification (par exemple inclusion/exclusion de variables explicatives),
- Validité des hypothèses sous-jacentes: une modélisation économétrique n'est généralement valide qu'à condition que certaines hypothèses sous-jacentes au modèle soient respectées. Par exemple, tous les modèles envisagés par SNCF Réseau et ses consultants font l'hypothèse que les erreurs sont identiques, indépendantes et distribuées normalement.
- Caractère raisonnable des résultats en termes de signe, d'ampleur et de significativité statistique, ainsi que facilité à repérer des résultats emprunts d'erreurs.

## 5 ANALYSE DE FRONTIER ECONOMICS – CHOIX DE LA FORME FONCTIONNELLE

L'Arafer a demandé à Frontier d'évaluer si la forme fonctionnelle retenue par SNCF Réseau est adéquate.

### 5.1 Contexte

#### Modèles sélectionnés

Après avoir exécuté plusieurs modèles avec différentes formes fonctionnelles et différentes spécifications, Ecoplan recommande de retenir trois modèles considérés comme les plus performants au sein de leur famille fonctionnelle respective. Les modèles retenus sont le modèle BT4 (modèle Box-Tidwell avec des termes d'interaction entre toutes les variables), BC4 (modèle Box-Cox sans termes d'interaction mais avec une flexibilité totale en termes de paramètres de transformation Box-Cox) et BCI4 (modèle Box-Cox avec termes d'interaction). La décision de retenir la moyenne de trois modèles est motivée par le fait qu'aucun modèle ne semble plus valide et adapté que les autres selon Ecoplan.

#### Modèles Box-Cox

SNCF Réseau et ses consultants ont avancé plusieurs raisons pour l'utilisation des transformations Box-Cox dans les diverses communications écrites à destination de l'Autorité et durant les échanges qui ont eu lieu dans le cadre du projet. Nous rappelons ci-dessous les principaux éléments de justification fournis par SNCF Réseau pour le choix d'un modèle en Box-Cox et ceux avancés dans la littérature, car nous nous y référons à plusieurs reprises dans le reste de cette partie. Les raisons incluent:

Le traitement du problème de nombreuses observations avec des valeurs nulles

L'intégration d'un degré de non-linéarité flexible, en notant en particulier que les modèles linéaires et logarithmiques sont imbriqués au sein des modèles présentant cette flexibilité

L'obtention de résultats raisonnables<sup>12</sup>

La cohérence avec la littérature sur les coûts ferroviaires

La cohérence avec l'approche utilisée lors des précédents exercices de détermination des redevances.

#### Autres formes fonctionnelles

Ecoplan ne présente pas dans son rapport les résultats de modèles plus simples tels que les modèles linéaire, en log-log ou en translog. SNCF Réseau a indiqué

---

<sup>12</sup> Par exemple, des études antérieures dans la littérature ont montré que les formes fonctionnelles de type translog pourraient mener à des élasticités de coût qui diminuent avec la densité de trafic. Ce résultat est considéré comme incohérent.

lors des échanges que modèles log-log et translog avaient été testés pour la voie.

Nous estimons que les modèles plus simples tels que les modèles linéaires, en log-log ou translog devraient faire partie des modèles envisagés et nous avons donc demandé que des résultats de modèles de ce type (le cas échéant, résultats issues de travaux préalables non présentés ou résultats d'estimations réalisées durant notre étude) soient fournis dans le cadre de notre mission. SNCF Réseau ainsi que les services de l'Arafer nous ont transmis les résultats de plusieurs modèles et ceux-ci sont analysés dans ce rapport.

### Modèles Translog

La fonction translog est une extension du modèle log-log qui introduit des termes d'interaction et des termes quadratiques pour certaines ou toutes les variables explicatives. L'objectif principal de ce modèle est de disposer d'une spécification plus générale qui puisse tenir compte d'un large éventail de relations non linéaires entre la variable dépendante et les variables explicatives sélectionnées.

SNCF Réseau souligne que les modèles translog peuvent présenter certains inconvénients comme la perte de degrés de libertés en raison du nombre de paramètres à estimer ou encore des coefficients obtenus contre-intuitifs. En particulier, dans une partie de la littérature sur les coûts ferroviaires les modèles translog ont conduit à des estimations d'élasticité décroissante avec le trafic.

Dans le cadre de l'étude, Frontier a obtenu des résultats de modèles en translog qui sont pris en compte dans le présent rapport.

## 5.2 Comprendre les propriétés des données

Nous considérons que la première étape avant d'estimer des modèles de régression est de comprendre les caractéristiques de la base de données. En particulier, il serait important de déterminer si l'une des problématiques que les transformations Box-Cox ont vocation à résoudre, telle que la proportion de données nulles et la non-linéarité de la relation entre les coûts et le trafic, est présente.

### Proportion de valeurs nulles

Dans la littérature, les transformations Box-Cox sont souvent désignées comme une solution pour résoudre la problématique des valeurs nulles, problématique qui se pose avec les transformations logarithmiques non définies en zéro.

D'après les éléments transmis dans le cadre de l'étude, le trafic voyageurs, le trafic fret et le nombre d'AdV par km sont les seules variables explicatives non-dichotomiques présentant un nombre significatif de valeurs nulles. Sur un total de 1127 observations, 111 sont nulles pour le trafic voyageurs (9,8% des observations), 9 pour le trafic fret (0,8% des observations) et 68 pour le nombre d'AdV par km (6,0% des observations).

Afin de traiter cette question Ecoplan a choisi d'ajouter une variable dichotomique associée aux variables transformées qui contiennent des valeurs nulles<sup>13</sup>.

Nous ne considérons pas que la part des observations avec une valeur nulle implique nécessairement un risque de biais dans l'estimation; le traitement des données les rend appropriées à la modélisation avec des formes fonctionnelles logarithmiques.

Afin de s'assurer plus avant que la démarche ne biaise pas les résultats, nous recommandons d'exécuter les estimations en excluant toutes les observations avec des valeurs nulles et de vérifier que la variation des résultats obtenus est limitée.

### Visualisation des données

Nous recommandons de prendre en compte des statistiques descriptives et une visualisation graphique des données pour détecter les spécificités de l'échantillon auxquelles le modèle économétrique, dont la forme fonctionnelle, devrait alors être adapté. Dans le cadre de notre mission, nous n'avons pas pu retracer complètement les étapes de l'analyse des données qui ont conduit SNCF Réseau et ses conseils à la sélection du modèle retenu. Nous comprenons également que, dans une certaine mesure, le choix a été motivé par des considérations plus larges qui ne sont pas spécifiques à la base de données. Dans le cadre de notre mission, nous avons demandé des diagrammes de dispersion des données pour pouvoir appréhender de façon visuelle la forme potentielle de la relation entre les coûts d'entretien et le trafic.

Les figures ci-dessous présentent des diagrammes de dispersion entre le logarithme des coûts d'entretien pour la voie et le logarithme du trafic fret et voyageurs (respectivement). Les points verts représentent les observations du réseau «capillaire» et les points bleus représentent les observations du réseau «structurant». La ligne rouge représente les valeurs ajustées de la régression des coûts d'entretien par kilomètre sur le trafic fret et voyageurs respectivement.

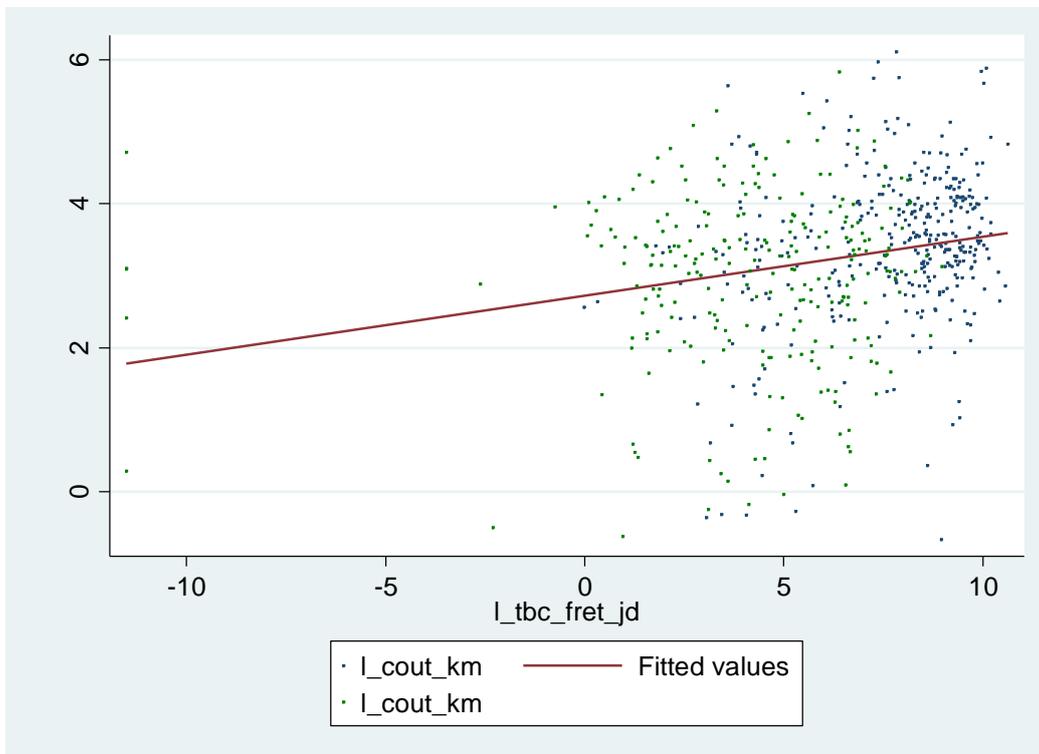
Ces éléments ne semblent pas suggérer une relation clairement non-linéaire (en log-log). Bien entendu, ces observations doivent être considérées avec prudence car d'autres variables pourraient interagir avec les coûts d'entretien et le trafic et fausser les observations faites à partir de ces graphiques.

Nous notons que la principale raison pour laquelle les Figure 6 et Figure 7 sont présentées sous forme logarithmique est la répartition du trafic et des coûts par km dans l'ensemble des données. Les boîtes à moustaches des Figure 8 et Figure 9 suggèrent une densité élevée d'observations avec de faibles coûts d'entretien et de faibles densités de trafic de fret et voyageurs respectivement. Elles mettent également en évidence un certain nombre de valeurs aberrantes pour les trois variables.

---

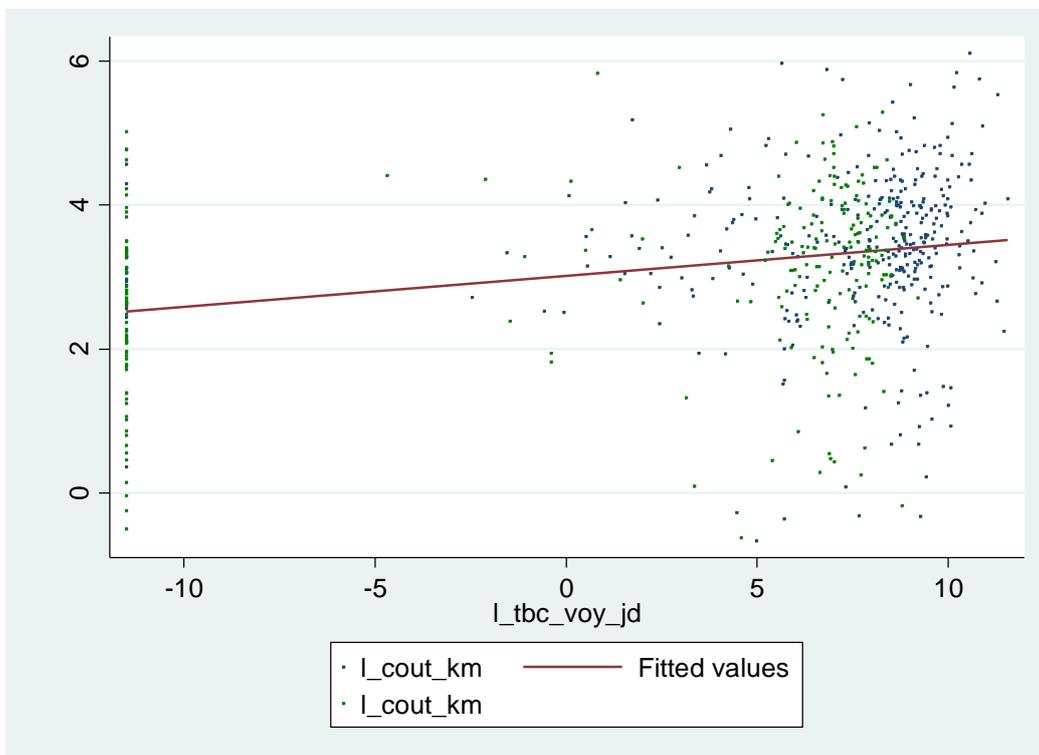
<sup>13</sup> L'ajout de la variable dichotomique est accompagné d'une opération permettant de rendre la variable égale à 0, en cas d'observation initiale égale à 0. Ainsi, pour  $\lambda=0$ , et  $x=0$ , alors  $x^\lambda(\lambda)$  est remplacé par 0.

Figure 6 Coûts d'entretien par km en fonction du trafic fret en tonnes (en log-log)



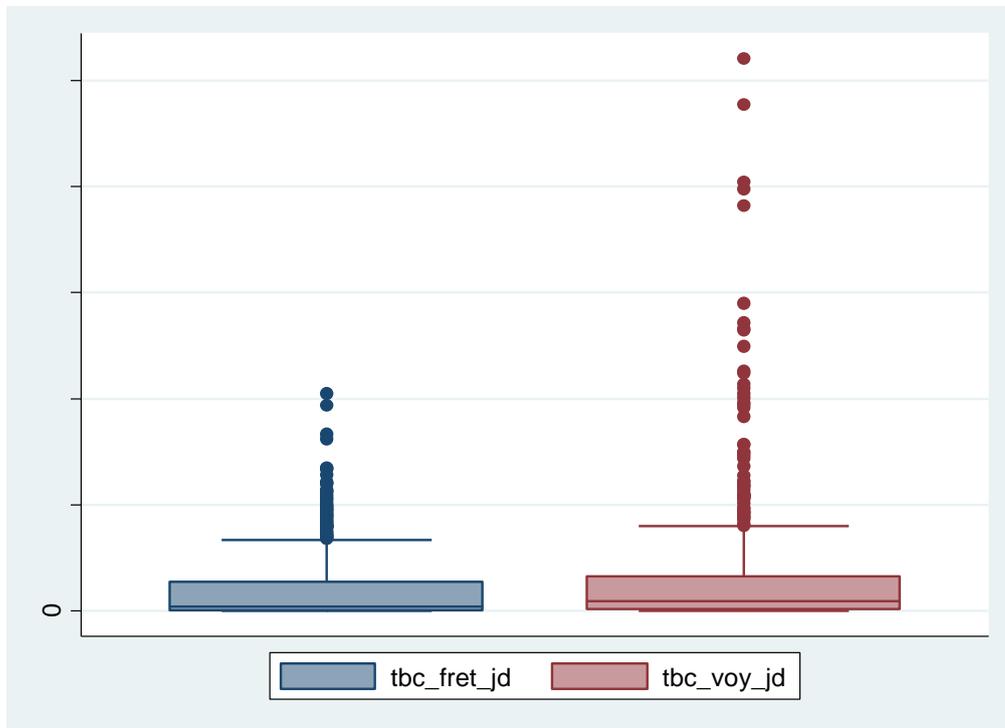
Source: Services de l'Arafer

Figure 7 Coûts d'entretien par km en fonction du trafic voyageurs en tonnes (en log-log)



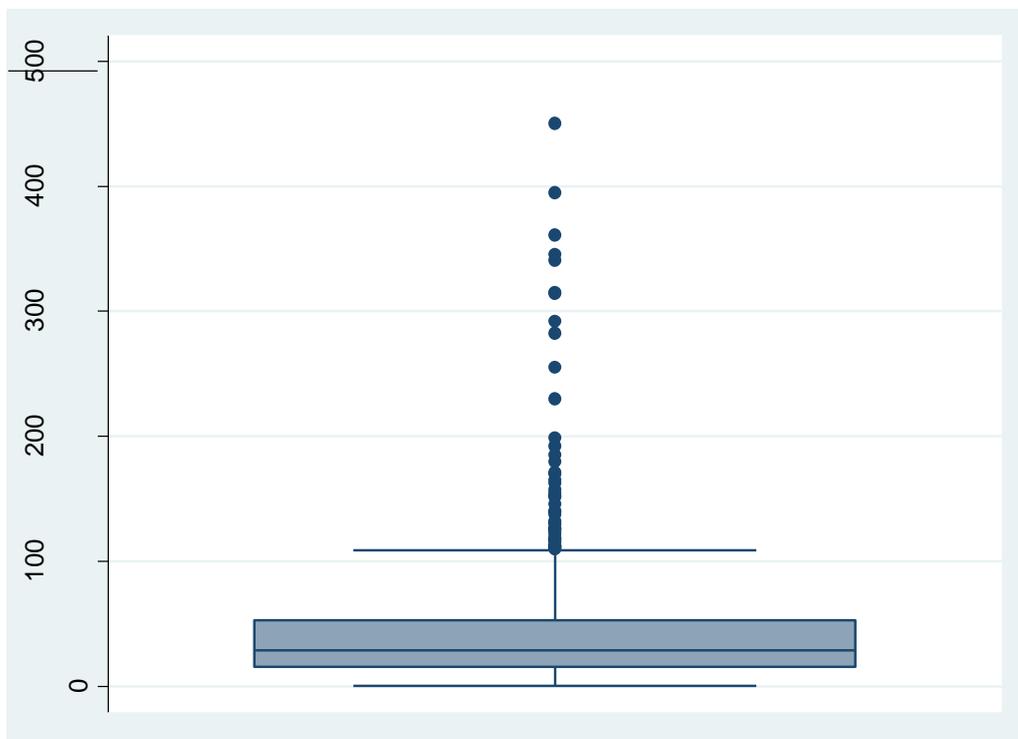
Source: Services de l'Arafer

Figure 8 Boîte à moustaches du trafic voyageurs et fret journalier



Source: Services de l'Arafer

Figure 9 Boîte à moustache des coûts d'entretien par km



Source: Services de l'Arafer

## 5.3 Choix du modèle

### Complexité et transparence

SNCF Réseau justifie l'utilisation des transformations de Box-Cox en référence à la littérature et par souci de cohérence avec l'approche utilisée durant la période réglementaire précédente. Cependant, peu de justifications sont proposées au cas d'espèce, c'est-à-dire au regard des caractéristiques de la présente base de données en particulier (voir ci-dessus). Egalement, sans remettre en cause l'intérêt de ces formes fonctionnelles, nous considérons qu'il est nécessaire de peser les avantages en matière d'ajustement des données (discuté plus en avant en partie 5.3) et les inconvénients potentiels de l'utilisation d'une forme fonctionnelle complexe telle que la transformation de Box-Cox.

En reprenant les principes généraux énoncés dans la partie précédente, nous identifions des risques et inconvénients à choisir une forme fonctionnelle faisant intervenir une ou plusieurs transformations en Box-Cox. Ces inconvénients émanent du recours à une transformation de Box-Cox en soi ; et ils sont exacerbés dans les variantes des modèles faisant intervenir plus de variables explicatives et de termes d'interaction. Ceux-ci incluent:

- Difficulté d'interprétation des coefficients: les transformations Box-Cox affectent l'échelle dans laquelle les variables sont mesurées. Par conséquent, il est nécessaire d'effectuer des calculs non triviaux pour déduire des effets marginaux ou des élasticités à partir des résultats des régressions. De fait, dans le cadre des échanges il a été possible d'obtenir de telles estimations pour les variables de trafic, d'âge et de longueur des sections, mais pas pour les autres variables explicatives testées dans différents modèles.

L'interprétation de résultats de régressions de modèles non linéaires emporte toujours un degré de complexité supérieur aux modèles linéaires ; néanmoins ce degré de complexité varie selon les formes fonctionnelles. Dans un modèle Translog les effets marginaux restent, eux, linéaires. Dans les modèles Box-Tidwell les fonctions d'effet marginal font intervenir une fonction puissance, limitant la complexité du calcul des élasticités mais restreignant néanmoins un peu plus l'interprétation directe et intuitive des résultats. Dans les modèles Box-Cox les effets marginaux sont des fonctions complexes de l'ensemble des variables du modèle, restreignant encore plus fortement l'appréhension intuitive des résultats.

- Risque d'erreur : cette même caractéristique du modèle Box-Cox contrecarre la capacité à vérifier les résultats. Il est possible de déterminer le signe et la significativité statistique des coefficients des variables explicatives. Cependant, l'ordre de grandeur de l'impact des variables n'est pas observable dans les résultats de régression standards et demande des calculs additionnels plus ou moins complexes et chronophages. Par conséquent, il est plus difficile de comparer les coefficients entre les modèles ou d'identifier des résultats potentiellement emprunts d'erreurs lors d'itérations successives des calculs dans le cadre des exercices de construction tarifaire..

- Limites liées à l'utilisation de TRIO: SNCF Réseau a utilisé un logiciel spécialisé (TRIO) pour l'estimation simultanée des coefficients de régression et des paramètres de Box-Cox pour certains des modèles testés. L'utilisation de ce logiciel peut créer quelques difficultés. Tout d'abord, il est relativement complexe de reproduire certains des résultats en utilisant un logiciel utilisé plus couramment tel que STATA<sup>14</sup>. Deuxièmement, il semble plus difficile d'effectuer des tests de post-estimation pour examiner la validité des résultats car les tests habituellement utilisés pour des régressions simples ne sont pas configurés dans le logiciel (voir ci-dessous pour plus de discussion des tests post-estimation).
- Manque de transparence du modèle : La complexité ajoutée par l'utilisation d'un modèle Box-Cox le rend également moins transparent. Compris par les experts académiques et quelques praticiens, les modèles Box-Cox sont utilisés dans certains domaines de la littérature académique mais leur mobilisation dans le contexte d'un exercice de régulation tarifaire est plutôt limitée. La complexité des modèles Box-Cox pour les non-praticiens est susceptible d'entraver leur acceptabilité en raison d'un manque de transparence. En outre, le régulateur n'a pas été en mesure de reproduire tous les résultats fournis par SNCF Réseau et, par conséquent, doit se référer exclusivement aux éléments fournis par le gestionnaire d'infrastructure pour expertiser les résultats de ces modèles. La reproductibilité de tous les résultats est une composante nécessaire du processus de construction tarifaire.
- Proportionnalité : SNCF Réseau et ses conseils ont démontré qu'ils possèdent l'expertise nécessaire pour mettre en œuvre le modèle Box-Cox afin d'estimer les coûts marginaux. Cependant, même avec cette expertise, la réalisation de ces estimations nécessite plus de temps et d'efforts que pour des modèles plus simples. Une telle charge analytique supplémentaire ne devrait être imposée dans le cadre du processus de régulation que lorsqu'elle est requise et proportionnée. Cette nécessité au cas d'espèce n'a pas semblé avoir été établie en amont de notre mandat. Nous discutons plus bas de la nécessité d'une modélisation complexe au regard des éléments analysés dans le cadre de l'étude.

### Ajustement aux données

SNCF Réseau et Ecoplan ont fondé le choix de modèle sur des critères d'ajustement aux données principalement, et plus spécifiquement sur des tests de rapport de vraisemblances. L'ajustement aux données est l'un des principaux critères de choix d'un modèle économétrique et, selon ce critère, le modèle Box-Cox surpasse les spécifications alternatives.

Cependant, d'autres éléments doivent être pris en compte pour le choix du modèle. En particulier, nous notons trois problèmes principaux qui peuvent apparaître lorsque le choix du modèle repose uniquement sur l'ajustement aux données:

---

<sup>14</sup> Nous notons que les résultats obtenus par les services de l'Arafer avec STATA diffèrent légèrement de ceux obtenus par SNCF Réseau et ces consultants avec TRIO pour des régressions identiques.

- **Premièrement**, ce critère ne prend pas en compte directement l'arbitrage entre les gains en pouvoir explicatif et certains inconvénients dus à la complexité supplémentaire des modèles. La complexité (au sens du nombre de variables) intervient indirectement dans le test du ratio des vraisemblances au travers des degrés de liberté. Les critères d'information quant à eux prennent cet arbitrage en compte explicitement.

Les critères d'information Akaike (AIC) et le critère d'information bayésien (BIC) comptent parmi les critères d'information les plus fréquemment utilisés. Les modèles les plus performants, d'après ces critères, sont ceux pour lesquels l'indicateur affiche les valeurs les plus basses. Cependant, ces mesures ne peuvent être comparées entre les modèles lorsqu'une transformation différente est appliquée à la variable dépendante d'un modèle à l'autre. Par conséquent, il est seulement possible de comparer les critères d'information pour les modèles Log-Log, Translog et Box-Tidwell d'une part, et pour les modèles BC et BCI d'autre part<sup>15</sup>.

D'après la Figure 10, l'AIC et le BIC sélectionnent le modèle en translog plutôt que le modèle en log-log. Nous notons cependant que la différence de scores entre tous les modèles présentés n'est pas grande. SNCF Réseau a fourni les LL, AIC et BIC de plusieurs spécifications de modèles en translog (Figure 12). Le critère AIC favorise l'utilisation du modèle TL5, le plus complexe de la famille fonctionnelle. En revanche, le BIC favorise l'utilisation du modèle TL2.

D'après la Figure 11, dans la famille Box-Tidwell, nous pouvons conclure que le modèle BT4 performe mieux selon le critère AIC et le modèle BT2 performe mieux selon le critère BIC.

Pour les modèles en Box-Cox, l'AIC favorise le modèle le plus complexe BCI4 et le BIC favorise un modèle plus simple, le BC1.

L'ensemble de ces résultats montre la sensibilité de l'analyse au degré de pénalisation de la complexité emporté par chaque indicateur.

Les tests de ratio des vraisemblances favorisent presque toujours les modèles les plus complexes par rapport aux modèles les plus simples pour toutes les familles de modèles (BT, BC, BCI, LL / TL)<sup>16</sup>. Relativement à d'autres mesures telles que BIC et AIC, le test de ratio des vraisemblances pénalise moins l'ajout de complexité et est donc ainsi plus enclin à privilégier des modèles complexes.

<sup>15</sup> Pour ces derniers, la log-vraisemblance et les critères d'informations sont exprimés sur l'échelle linéaire. Il est possible de rendre tous les critères d'information de tous les modèles comparables mais les manipulations nécessaires pour y arriver sont complexes et n'ont pas pu être réalisées étant donné les contraintes de délai de réalisation de l'étude.

<sup>16</sup> Les tests de ratio des vraisemblances des modèles BT, BC et BCI ont été exécutés par Ecoplan dans son rapport. Frontier a exécuté ces tests pour les modèles LL et TL. D'après ces derniers tests, nous concluons que les modèles les plus complexes sont toujours meilleurs que les modèles plus simples, à l'exception du test entre les modèles TL3 et TL4 qui est inconcluant.

**Figure 10 Critères d'information Akaike et bayésien pour les modèles linéaire, en log-log et en translog exécutés par les services de l'Arafer**

	Linear	Log-Log	Translog
Log-vraisemblance	-]5965.738	-1515.229	-1503.09
AIC	11991.48	3090.457	3072.181
BIC	12142.3	3241.277	3238.082

Source: Services de l'Arafer

Note: Spécifications retenues par SNCF Réseau dans son rapport pour tous les modèles.

La log-vraisemblance et les critères d'information du modèle en translog ne peuvent pas être comparés aux autres modèles car leur échelle est différente.

**Figure 11 Log-vraisemblance et critères d'information Akaike et bayésien pour les modèles BT, BC et BCI**

Track maintenance costs models

Models	BT1	BT2	BT3	BT4	BC0	BC1	BC2	BC3	BC4	BCI2	BCI3	BCI4
Software	Stata	Stata	Stata	Stata	Trio							
LL	-1496	-1480	-1457	-1422	-5252	-5207	-5205	-5204	-5198	-5192	-5157	-5104
DoF	33+1	36+1	50+1	76+1	33+1	33+1	33+2	33+3	33+4	34+5	48+12	69+13
N	1127	1127	1127	1127	1127	1127	1127	1127	1127	1127	1127	1127
AIC	3060	3035	3017	2997	10572	10483	10479	10481	10469	10462	10433	10371
BIC	3231	3221	3273	3384	10743	10654	10655	10662	10655	10658	10735	10784

Source: SNCF Réseau

Note: Les résultats surlignés en rose marquent les modèles sélectionnés au sein de chaque famille fonctionnelle d'après l'AIC et le BIC.

**Figure 12 Log-vraisemblance et critères d'information Akaike et bayésien pour les modèles en log-log et translog**

Models	LL	TL1	TL2	TL3	TL4	TL5
Software	Stata	Stata	Stata	Stata	Stata	Stata
LL	-1503	-1493	-1486	-1461	-1454	-1423
DoF	32	34	35	47	55	76
N	1127	1127	1127	1127	1127	1127
AIC	3072	3058	3043	3017	3021	3000
BIC	3238	3234	3224	3258	3302	3387

Source: SNCF Réseau

Note: Les résultats surlignés en rose marquent les modèles sélectionnés au sein de chaque famille fonctionnelle d'après l'AIC et le BIC.

- **Deuxièmement**, la validité de critères de choix tels que le test du rapport des vraisemblances s'appuie fondamentalement sur la vérification des hypothèses du modèle de régression (voir la sous-partie sur les tests ci-dessous pour plus de détails). Le non-respect des hypothèses sous-jacentes au modèle peut potentiellement rendre l'ensemble du modèle invalide : les coefficients peuvent être biaisés et le coût marginal peut donc être sous / surestimé. Un modèle dans lequel ces hypothèses sont respectées devrait donc être préféré à un modèle pour lequel ce n'est pas le cas. Or, les

estimations en Box-Cox rendent plus difficile la vérification de la validité des hypothèses. Cette question est examinée plus en détail dans la partie sur les tests ci-dessous.

- Troisièmement, la qualité de l'ajustement aux données ne doit pas être confondue avec le pouvoir de prédiction. La qualité d'ajustement d'un modèle est sa capacité à prédire les observations dans l'échantillon et donc à minimiser les résidus. Le pouvoir prédictif d'un modèle est sa capacité à prédire correctement la relation entre les variables dans la population totale, y compris en dehors de l'échantillon. Un modèle trop spécifié et complexe peut être relativement bon en terme d'ajustement aux données de l'échantillon en modélisant également les erreurs des observations. Cependant, un tel modèle serait moins performant par rapport à un modèle plus simple pour une prévision à l'extérieur de l'échantillon. Il faut donc être prudent lorsque l'on favorise un modèle complexe à partir de son ajustement aux données de l'échantillon, car le meilleur ajustement du modèle complexe pourrait être dû à une sur-spécification. Au vu de la taille de l'échantillon, nous estimons que l'inclusion d'un nombre excessif de termes d'interactions pourra présenter un tel écueil de sur-spécification. Dès lors, le nombre de termes d'interaction devrait être limité si ceci est acceptable au regard des autres critères de choix du modèle.

## 5.4 Stabilité des résultats entre les modèles

Le tableau ci-dessous résume les résultats communiqués par Ecoplan, les services de l'Arafer et SNCF Réseau<sup>17</sup>.

Dans l'ensemble, nous observons une forte variabilité des estimations de l'élasticité et des coûts marginaux entre les modèles. Ceci est le cas y compris au sein des familles de modèles (par exemple, les spécifications alternatives de Box-Cox).

Etant donné le nombre élevé de spécifications comparées, nous avons d'abord mis en avant en gras, dans chaque famille de modèles, les spécifications retenues selon les critères d'information discutés précédemment (log-vraisemblance comprise). Puis les modèles ayant obtenu les meilleurs résultats sur les critères d'information dans la famille LL/BT/TL d'une part et dans la famille BC/BCI d'autre part sont soulignés. Cette approche aboutit à mettre en avant les modèles BT2, BT4, BC1 et BC14.

---

<sup>17</sup> Pour rappel:

- Ecoplan a estimé les modèles dans log-log, translog, Box-Tidwell et Box-Cox mais les résultats des régressions estimées dans log-log et translog n'ont pas été reportés.
- SNCF Réseau a fourni les résultats de ces régressions suite à la demande de Frontier dans le cadre de la mission, ainsi que les élasticités et coûts marginaux correspondants.
- Les services de l'Arafer ont estimé des régressions supplémentaires qui permettent de comparer les résultats du modèle Box-Cox avec des spécifications alternatives, en particulier les formes fonctionnelles linéaires, logarithmiques et translog.

**Figure 13 Coût marginal (en €2013/kTBC-km) par modèle**

Modèle	Estimé par	Elasticité voyageurs	Elasticité fret	Coût marginal voyageurs	Coût marginal fret
Linear	Arafer	0.22	0.06	0.905	0.027
LL	SNCF Réseau	0.107	0.088	0.443	0.779
BT1	Ecoplan	0.352	0.171	1.086	0.843
<b>BT2</b>	<b>Ecoplan</b>	<b>0.385</b>	<b>0.050</b>	<b>1.147</b>	<b>0.288</b>
BT3	Ecoplan	0.505	0.017	1.534	0.240
<b>BT4</b>	<b>Ecoplan</b>	<b>0.458</b>	<b>0.055</b>	<b>1.504</b>	<b>0.550</b>
<b>BC1</b>	<b>Arafer</b>	<b>0.17</b>	<b>0.15</b>	<b>0.696</b>	<b>0.624</b>
BC2	Ecoplan	0.352	0.156	1.011	0.655
BC3	Ecoplan	0.327	0.150	0.969	0.663
<b>BC4</b>	<b>Ecoplan</b>	<b>0.385</b>	<b>0.026</b>	<b>1.038</b>	<b>0.391</b>
<b>BCI2</b>	<b>Ecoplan</b>	<b>0.338</b>	<b>0.026</b>	<b>0.970</b>	<b>0.204</b>
BCI3	Ecoplan	0.404	0.245	1.332	0.553
<b>BCI4</b>	<b>Ecoplan</b>	<b>0.435</b>	<b>0.260</b>	<b>1.251</b>	<b>0.808</b>
TL1	SNCF Réseau	0.222	0.040	0.802	0.602
<b>TL2</b>	<b>SNCF Réseau</b>	<b>0.234</b>	<b>0.053</b>	<b>0.857</b>	<b>0.432</b>
TL3	SNCF Réseau	0.307	0.050	1.132	0.457
TL4	SNCF Réseau	0.319	0.050	1.146	0.536
<b>TL5</b>	<b>SNCF Réseau</b>	<b>0.324</b>	<b>0.062</b>	<b>1.197</b>	<b>0.643</b>

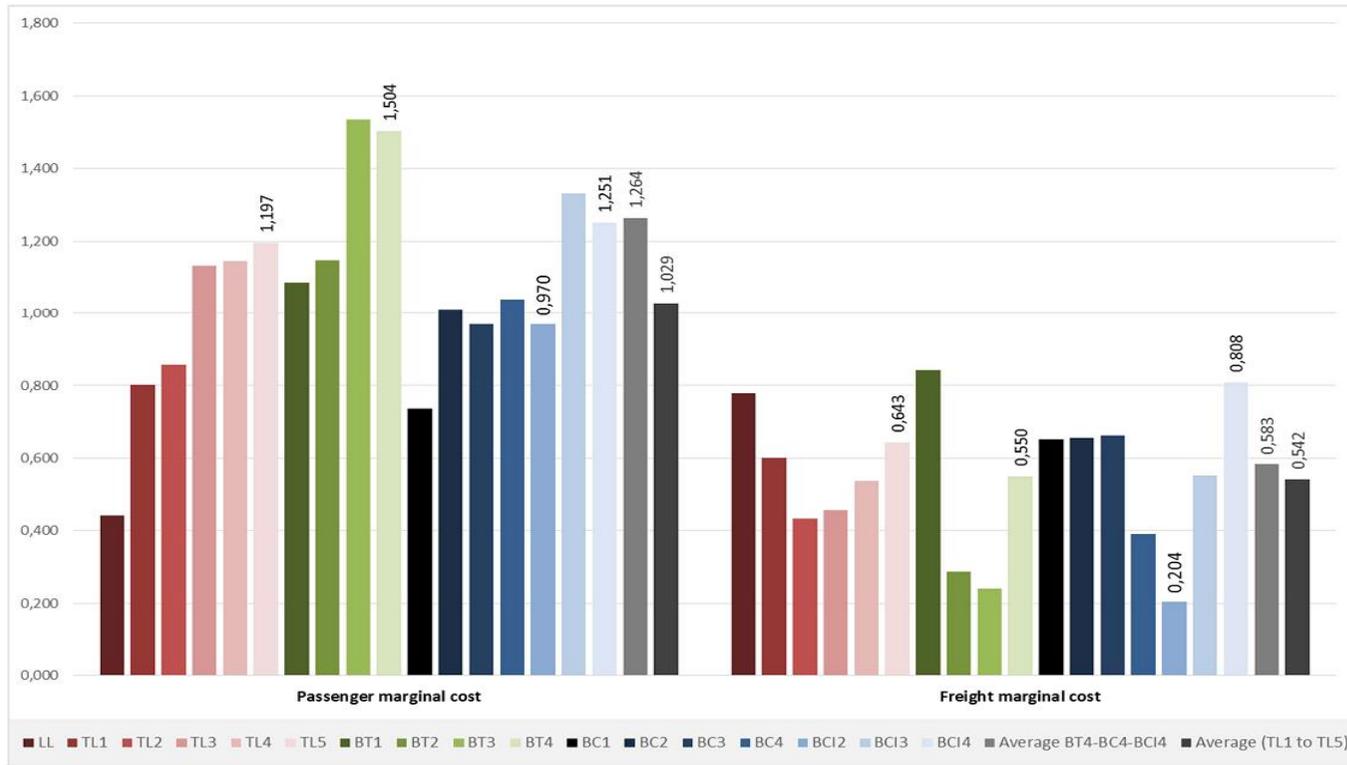
Source: *Ecoplan, Services de l'Arafer, SNCF Réseau*

Dans les tableaux de résultats de régression correspondants aux modèles listés dans la figure ci-dessus, certains des coefficients ne semblent pas statistiquement significatifs, en particulier dans les spécifications incluant des termes d'interaction. Néanmoins, dans ces cas, la significativité conjointe de variables liées devrait être testée plutôt que la significativité des coefficients individuels. Ces tests n'ont pas été effectués (ou ne nous ont pas été transmis).

La figure ci-dessous présente une comparaison visuelle des coûts marginaux d'entretien de la voie pour le trafic fret et voyageurs sur l'ensemble des modèles estimés et présentés par Ecoplan/SNCF Réseau. D'après cette figure:

- Les modèles en translog et Box-Cox produisent des estimations dans une fourchette similaire.
- Les modèles en log-log produisent des estimations significativement différentes de celles des autres modèles. En particulier, le coût marginal du trafic de voyageurs est considérablement inférieur à l'estimation de tout autre modèle. Le coût marginal du fret s'inscrit quant à lui dans la partie supérieure de la fourchette produite par d'autres modèles.
- Les modèles plus complexes au sein de chaque famille tendent à produire des estimations de coût marginal plus élevées, en particulier pour le trafic de voyageurs.

Figure 14 Coût marginal d'entretien de la voie estimé par différents modèles



Source: SNCF Réseau

## 5.5 Validité des hypothèses

La validité de la fonction de log-vraisemblance et du test du rapport des vraisemblances repose sur les hypothèses clés du modèle de régression classique: que les erreurs d'estimation soient normalement et identiquement distribuées et indépendantes (« hypothèse NIID »). Ces hypothèses peuvent ne pas être respectées en conséquence de divers problèmes:

- Hétéroscédasticité dans les résidus,
- Multicolinéarité entre variables,
- Omission de variables pertinentes (c'est-à-dire corrélées aux coûts et aux autres variables explicatives, en particulier au trafic),
- Non normalité des résidus.

Toute infraction à l'hypothèse NIID peut avoir les conséquences suivantes:

- Biais des coefficients,
- Biais des erreurs types qui fausserait les tests de significativité et les inférences basées sur le modèle,
- Invalidité du test du rapport des vraisemblances pour le choix d'un modèle.

Le rapport de SNCF Réseau ne présentait pas de test de la validité de ces hypothèses. Nous avons demandé aux services de l'Arafer et à SNCF Réseau d'effectuer plusieurs tests des modèles dans le cadre de la mission, notamment:

- Test d'hétéroscédasticité (par exemple test de Breush-Pagan),
- Test d'omission de variable (par exemple test de réinitialisation de Ramsey),
- Test de multicolinéarité (par exemple test de Belsley-Kuh-Welsch)
- Test de normalité (par exemple test de Jarque-Bera).

Les conclusions suivantes peuvent être tirées des résultats des tests sur les modèles linéaire, en log-log et en translog réalisés par les services de l'Arafer et sur les modèles modèles Box-Tidwell, Box-Cox, Log-log et Translog réalisés par SNCF Réseau<sup>18</sup>:

- Hétéroscédasticité :
  - De l'hétéroscédasticité est détectée par l'Arafer dans tous les modèles. Ceci a été vérifié en utilisant le test de Breusch-Pagan qui identifie une corrélation entre les résidus de la régression et les valeurs ajustées. Nous notons que les tests d'hétéroscédasticité en fonction d'autres variables explicatives n'ont pas été réalisés.
  - Aucun test d'hétéroscédasticité n'a été fourni par SNCF Réseau du fait des délais contraints. Nous comprenons de fait que l'exécution de ceux-ci dans TRIO peut ne pas être triviale. Cependant, SNCF Réseau a fourni des diagrammes de dispersion des résidus par rapport aux principales

<sup>18</sup> Les services de l'Arafer n'ont pas pu réaliser les tests sur les régressions en Box-Cox. Les conclusions concernent donc uniquement les modèles linéaire, en log-log et en translog. Les tests réalisés par SNCF Réseau sur les autres formes fonctionnelles sont présentés ci-après.

variables explicatives de la régression pour les modèles BC4 et BCI4 (voir en annexe pour une reproduction de tous les graphiques de dispersion). Les graphiques représentant graphiquement les résidus en fonction du trafic fret et voyageurs suggèrent une certaine hétéroscédasticité.

- Variables omises :
  - Les tests de réinitialisation de Ramsey réalisé par l'Arafer pour les modèles linéaire, en log-log et en translog ne concluent pas que des variables ont été omises dans aucun des modèles.
  - SNCF Réseau n'a pas pu fournir de résultats à ces tests en raison des contraintes temporelles de l'étude.
- Multicollinéarité :
  - Des tests de Belsey-Kuh-Welsh ont été effectués par SNCF Réseau pour les modèles LL, TL, BT, BC et BCI. Pour toutes les familles de modèles sauf la famille BC, on observe de la multicollinéarité avec les variables de trafic dans certaines variantes des modèles. Celle-ci peut potentiellement biaiser les coefficients de régression et gonfler les écarts types des coefficients.
  - Nous notons que la multicollinéarité est généralement plus présente dans les modèles ayant de nombreux termes d'interaction et termes quadratiques.
- Distribution des erreurs
  - Pour tous les modèles testés par l'Arafer et SNCF Réseau la répartition des résidus est asymétrique et sa platitude (mesurée par le Kurtosis) ne correspond pas à celle d'une distribution normale. Cela indique que les erreurs ne sont pas normalement distribuées.

Dans l'ensemble, les résultats mettent en doute la validité des hypothèses énoncées plus haut pour l'ensemble des modèles. Les modèles qui ont été estimés peuvent donc tous présenter une certaine forme de biais dans l'estimation des coûts marginaux d'entretien.

Le non-respect des hypothèses énoncées plus haut peut être dû à des problématiques d'ordre économétrique ou bien aux caractéristiques des données sous-jacentes. Dans ce deuxième cas de figure, il se peut qu'aucune forme fonctionnelle ou spécification de modèle ne permette de respecter les hypothèses. Pour cette raison, le non-respect des hypothèses ne doit pas empêcher de poursuivre les analyses, même si les incidences possibles de ce non-respect des hypothèses doivent être prises en compte. La partie 7 de notre rapport présente des recommandations qui pourraient favoriser la résolution de ces problèmes dans le futur, mais dans le contexte de la présente itération du DRR, un modèle doit être choisi.

### Analyse qualitative graphique

Étant donné que les tests ne pointent pas vers l'un des modèles en particulier, les hypothèses ne semblant être valides pour aucun des modèles testés, nous

nous tournons vers une comparaison plus qualitative des fonctions de densité des résidus.

Ces histogrammes (reproduits en annexe et transmis par SNCF Réseau) suggèrent que la distribution des résidus n'est pas aussi éloignée d'une distribution normale que les tests peuvent suggérer. Dans l'ensemble, les modèles plus complexes semblent afficher des distributions de résidus plus normalement distribuées. Cependant, les modèles plus simples ne semblent pas être significativement moins bons.

### Corrections de l'hétéroscédasticité

Des techniques existent qui visent à atténuer la possible influence du non-respect des hypothèses susmentionnées dans certains cas, en particulier en termes d'hétéroscédasticité.

A titre préliminaire, nous rappelons que :

- Dans le cas des modèles simples estimés par OLS, l'hétéroscédasticité a pour effet de biaiser les erreurs-types des coefficients et les résultats de l'inférence statistique. Cependant, l'hétéroscédasticité en elle-même ne biaise pas les coefficients des variables.
- Dans le cas des modèles estimés en maximisant la fonction de log-vraisemblance, tels que les modèles de Box-Cox et Box-Tidwell, la présence d'hétéroscédasticité a aussi des conséquences sur le biais de la fonction de vraisemblance. Par conséquent, à la fois les coefficients et les erreurs-types sont affectés, car les paramètres de transformation de Box-Cox sont déterminés par la maximisation de la fonction log-vraisemblance.

Les logiciels statistiques standards permettent de corriger l'impact de l'hétéroscédasticité sur les erreurs-types pour les modèles OLS simples à l'aide des corrections White. Nous comprenons qu'il n'existe aucun équivalent simple pour les modèles Box-Cox.

En outre, pour les modèles estimés en maximisant la fonction de log-vraisemblance (BC et BT), il est nécessaire de comprendre la nature précise de l'hétéroscédasticité et d'adapter la fonction de vraisemblance en conséquence pour ré-estimer les coefficients. SNCF Réseau rapporte comment cette procédure a été appliquée dans le cadre de l'estimation des coûts marginaux d'entretien. Ils identifient visuellement la corrélation entre les résidus et les variables de trafic et ré-estiment le modèle pour tenir compte de l'hétéroscédasticité de forme «multiplicative». L'impact des corrections sur les estimations de coûts marginaux est minime.

Nous n'avons pas reçu d'informations détaillées pour pouvoir évaluer les propriétés statistiques des modèles corrigés. Cependant, nous considérons que des modèles pouvant être estimés avec un estimateur plus simple (notamment OLS) peuvent être préférés aux modèles Box-Cox lorsque l'on est en présence d'invalidité des hypothèses des modèles parce que ceux-ci peuvent être compris et corrigés de manière plus simple et plus fiable. En outre, nous notons qu'il existe d'autres méthodes pour traiter l'hétéroscédasticité disponibles pour les

modèles OLS qui seraient difficiles à mettre en œuvre pour les modèles en Box-Cox<sup>19</sup>.

## 5.6 Sensibilité des résultats

En ligne avec les principes énoncés plus haut, nous estimons nécessaire d'explorer la sensibilité des résultats des estimations.

Nous proposons d'examiner la sensibilité des résultats à deux éléments:

- Les paramètres de transformation Box-Cox ( $\lambda$  et  $\theta$ ) sur l'élasticité-coût du trafic,
- L'introduction de la longueur de section comme variable explicative.

### Sensibilité aux paramètres de transformation Box-Cox

L'estimation du modèle en Box-Cox passe notamment par la détermination du ou des paramètres de transformation Box-Cox de sorte que la log-vraisemblance de la régression soit maximisée. Un test de robustesse important consiste à apprécier la sensibilité de l'élasticité au trafic à une éventuelle mauvaise spécification du modèle, c'est-à-dire à un choix erroné de valeurs pour les paramètres de transformation. En particulier, nous recommandons d'analyser graphiquement l'élasticité ou le coût marginal par rapport aux paramètres qui transforment la variable coût et la variable trafic.

Nous considérons nécessaire d'examiner la variation potentielle des élasticités estimées en cas de faibles variations de la valeur de lambda, pour deux raisons. Tout d'abord, il est intéressant de comprendre les impacts sur l'élasticité d'un déplacement au sein de l'intervalle de confiance autour de la valeur centrale de lambda estimée par le modèle<sup>20</sup>. Deuxièmement, une certaine incertitude existe quant à la validité de la fonction supposée de log-vraisemblance dans la présente base de données (voir partie précédente). Par conséquent, il est pertinent d'examiner les implications potentielles de la mauvaise spécification du modèle.

SNCF Réseau a produit des graphiques permettant d'apprécier la mesure dans laquelle les élasticités du trafic de voyageurs et fret sont sensibles au choix des paramètres de transformation Box-Cox pour les modèles BT4, BC4 et BCI4. Ces graphiques sont reportés en annexe et commentés ci-dessous.

#### Modèle BT4

Nous observons une forte variation de l'élasticité obtenue à partir de régressions pour différentes valeurs du paramètre lambda. En effet, l'élasticité du trafic de voyageurs varie de plus du simple au double en fonction de la valeur de lambda. Les modèles BT englobent le modèle log-log lorsque lambda est égal à zéro. Comme indiqué précédemment, les élasticités estimées pour les modèles logarithmiques sont plus faibles que pour le modèle représentatif (lambda =

<sup>19</sup> Par exemple, les estimations par les moindres carrés pondérés (WLS), fréquemment utilisées dans la littérature, permettent de traiter certains problèmes d'hétéroscédasticité.

<sup>20</sup> De telles intervalles de confiance n'ont pas été présentés dans les rapports expertisés, nous définissons donc des intervalles centrés sur les valeurs retenues pour les paramètres de transformation.

0,0795) pour le trafic de voyageurs et plus élevées pour le trafic fret. Par conséquent, les élasticités estimées varient entre ces deux extrêmes pour des valeurs intermédiaires de  $\lambda$ . De plus, nous notons que, pour des valeurs de  $\lambda$  supérieures à 0,0795, l'élasticité au trafic de voyageurs (resp. fret) continue à augmenter (resp. diminuer) considérablement.

Dans le cas du trafic de voyageurs, la pente de la courbe est relativement abrupte autour de  $\lambda = 0,0795$ . Par exemple, quand la valeur de  $\lambda$  varie de 0,05 à 0,1, les élasticités correspondantes s'inscrivent entre 0,40 et 0,48 environ<sup>21</sup>. Dans le cas du transport de fret, la fourchette de valeur des élasticités serait de 0,05 à 0,06 pour ces mêmes valeurs de  $\lambda$ .

Nous concluons que les estimations pour le trafic de voyageurs sont sensibles au choix de  $\lambda$  dans un intervalle proche de la valeur centrale estimée par le modèle. À l'inverse, l'estimation du trafic de fret ne semble pas particulièrement sensible à la valeur de  $\lambda$ .

#### Modèle BC4

Plusieurs paramètres de transformation Box-Cox sont déterminés lors de l'estimation du modèle BC4. SNCF Réseau fournit des graphiques montrant la sensibilité des élasticités au trafic fret et voyageurs aux paramètres de transformation des trois variables principales :

- trafic fret,
- trafic de voyageurs,
- coûts de maintenance (variable dépendante).

Nous observons une forte variation de l'élasticité du trafic voyageurs et fret à la valeur à leurs propres paramètres de transformation Box-Cox. La fourchette des élasticités est large pour les deux variables. La courbe est plus raide autour de la valeur optimale pour l'élasticité au trafic de voyageurs.

Les élasticités au trafic de voyageurs et fret semblent peu sensibles au paramètre de transformation de la variable dépendante. L'élasticité au trafic fret est particulièrement stable<sup>22</sup>.

#### Modèle BCI4

Plusieurs paramètres de transformation Box-Cox sont déterminés lors de l'estimation du modèle BC4. SNCF Réseau fournit des graphiques montrant la sensibilité des élasticités au trafic fret et voyageurs aux paramètres de transformation des trois variables principales :

- trafic fret,
- trafic voyageurs,

<sup>21</sup> Ces résultats résultent d'une approximation visuelle basée sur le graphique fourni par SNCF Réseau pour appréhender autant que possible, mais toujours qualitativement, la sensibilité potentielle des résultats, sans présupposer du caractère probable ou pas de l'ampleur de la variation de  $\lambda$  envisagée.

<sup>22</sup> SNCF Réseau a également produit des graphiques de sensibilité aux valeurs des paramètres de transformations Box-Cox suivant une approche alternative. Dans celle-ci, les paramètres de Box-Cox que l'on ne fait pas varier ne sont pas fixes à leur valeur dans le modèle représentatif mais sont libres de varier pour optimiser à nouveau la fonction de log-vraisemblance. Nous ne reportons pas ces graphiques mais nous notons qu'une variabilité relativement plus faible des élasticités est observée.

- coûts de maintenance (variable dépendante).

Nous observons que les élasticités aux trafics fret et voyageurs ne sont pas particulièrement sensibles à des variations des paramètres de transformation Box-Cox appliquées aux trois variables énoncées ci-dessus.

Ceci étant dit, nous notons que la relation entre le lambda du trafic passagers et les élasticités aux trafics apparaissent moins lisses. En particulier la valeur de l'élasticité du modèle représentatif semble correspondre à un point d'inflexion de la courbe.

### Conclusions sur la sensibilité aux paramètres de transformation Box-Cox

Pour deux des trois modèles retenus par SNCF Réseau, nous observons une sensibilité à de faibles changements des paramètres de transformation Box-Cox<sup>23</sup>. Cette sensibilité combinée aux incertitudes quant à la validité de la fonction de log-vraisemblance utilisée pour choisir les paramètres de transformation peut être problématique. En effet, les résultats des régressions et les élasticités peuvent changer sensiblement si les paramètres Box-Cox estimés s'avèrent ne pas être à leur juste valeur.

### Sensibilité à la longueur

SNCF Réseau a décidé de tenir compte de l'influence de la longueur de la voie sur les coûts totaux d'entretien en retenant les coûts unitaires (coût par kilomètre) comme variable dépendante. Ce choix emporte l'hypothèse implicite que les rendements d'échelle sont constants par rapport à la longueur<sup>24</sup>. Ce choix diffère de l'approche retenue dans une grande partie de la littérature, et pourrait conduire à un biais d'omission de variable. Un tel biais viendrait interférer avec notre objectif de recommandation d'une forme fonctionnelle ; nous avons donc cherché à approfondir cette question.

La justification fournie par SNCF Réseau et leurs conseils pour ce choix est que la segmentation est purement administrative et n'a pas de sens économique. SNCF Réseau s'attend donc à ce que la longueur des tronçons n'influence pas les coûts unitaires par kilomètre.

Nous estimons néanmoins qu'il convient de vérifier le caractère strictement proportionnel de la relation entre les coûts et la longueur dans les données. En effet, nous considérons concevable que les coûts par km ne soient au cas d'espèce pas constants avec la longueur de la section (par exemple, la longueur de la section influencera le coût unitaire si les décisions d'entretien prises par les équipes d'ingénierie au jour le jour sont liées à la segmentation de la voie).

La relation entre la longueur et le coût peut être établie par:

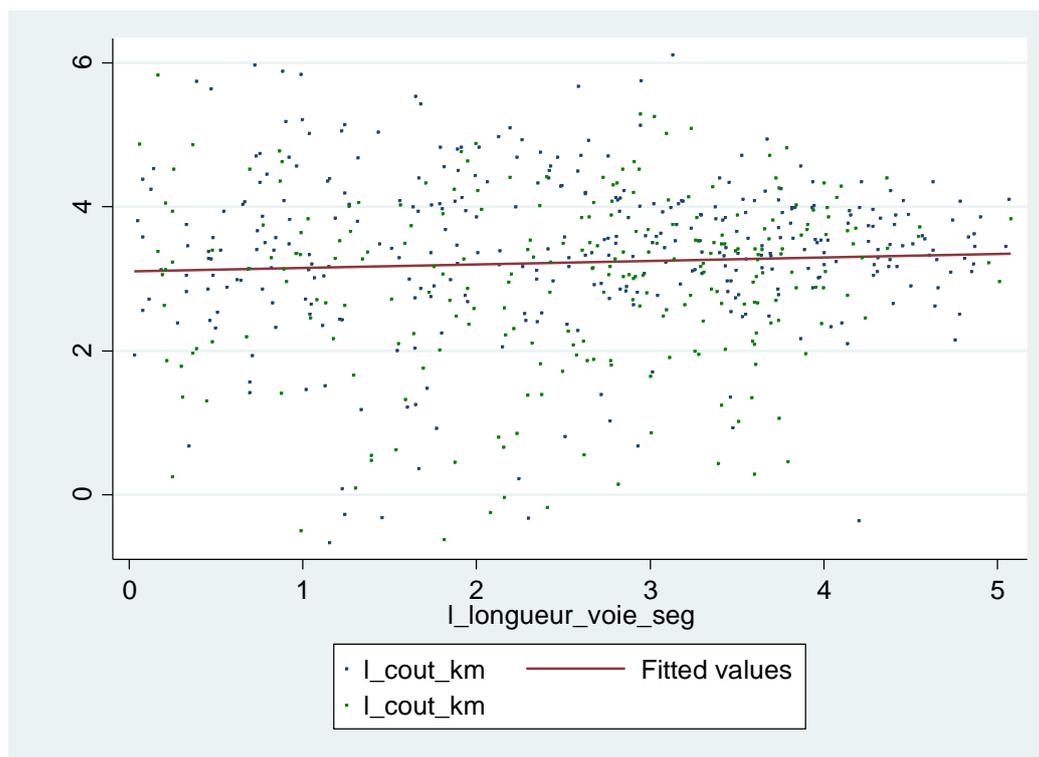
- L'examen d'un diagramme de dispersion des coûts par kilomètre par rapport à la longueur. Si les coûts ne varient pas en fonction de la longueur, l'approche de SNCF Réseau peut être considérée raisonnable.

<sup>23</sup> En d'autres termes, la pente de la courbe représentant l'élasticité à lambda est forte autour de la valeur estimée de lambda.

<sup>24</sup> Cette approche est équivalente à l'introduction de la longueur des segments comme variable explicative mais en restreignant son coefficient à 1.

- Dans le graphique ci-dessous, la ligne des valeurs ajustées est presque horizontale et montre donc que le coût d'entretien par km semble être indépendant de la longueur de la section. Cependant, les conclusions d'un tel graphe doivent être prises avec prudence car d'autres variables explicatives non-contrôlées dans ce graphe pourraient empêcher d'observer la relation causale entre la longueur de voie et le coût d'entretien.

**Figure 15 Diagramme de dispersion des coûts par km de voie pa rapport à la longueur des sections (en log-log)**



Source: Services de l'Arafer

- Inclure la longueur de la section comme variable explicative. Tout d'abord, ceci permet de tester la pertinence statistique d'un rendement à l'échelle non-constant. Deuxièmement, la longueur peut être une variable omise pertinente et cela affecterait l'élasticité par rapport au trafic. Lorsqu'elle est incluse comme variable explicative, nous observons que la longueur de section n'est pas statistiquement significative pour les modèles linéaires, en log-log, et translog.

**Figure 16 Coût marginal (en €/kTBC-km) par modèle avec la longueur de section**

Modèle	Coût marginal fret	Coût marginal voyageurs
Linéaire	.270063	.9170766
Log-Log	.3712049	.2639689
Translog	.370935	.5303493

Source: Services de l'Arafer

Nous concluons donc de ces résultats que l'inclusion de la variable longueur de segment dans le modèle n'est pas nécessaire.

## 5.7 Conclusions et recommandation

### Modèles en Box-Cox

L'utilisation des modèles en Box-Cox introduit plusieurs complexités dans la mise en œuvre des estimations, dans l'interprétation des résultats et dans la mise en œuvre des tests post-estimation. Ces complexités posent problème dans le contexte d'un exercice de construction tarifaire, car elles vont à l'encontre des principes de transparence du modèle et de prévisibilité exposés ci-dessus. [

Cependant, la forme fonctionnelle Box-Cox pourrait être recommandée:

1. Si l'utilisation d'un modèle en Box-Cox présentait des avantages substantiels pour modéliser les caractéristiques de l'échantillon au cas d'espèce, ou
2. S'il pouvait être démontré que le recours à des modèles plus simples comporterait un risque élevé de non-respect des autres principes de tarification, en particulier du principe de réflectivité des coûts.

Nous considérons que l'analyse des éléments à notre disposition ne conforte aucun de ces deux points. Nous les examinons à tour de rôle ci-dessous.

#### 1. Avantage pour la modélisation des données au cas d'espèce

Les formes fonctionnelles de Box-Cox ont montré des avantages dans la littérature académique, en particulier:

- Ils ont fourni un moyen de surmonter les biais emportés par la prévalence de valeurs nulles dans certains échantillons.
- Ils ont contribué à une meilleure compréhension de la relation entre les coûts et le trafic pour différents niveaux de trafic.

Cependant, nous estimons que la prévalence de valeurs nulles ne constitue pas un problème dans le cas présent, étant donné les caractéristiques des données.

L'existence d'une relation non-linéaire entre les coûts et le trafic n'apparaît pas de façon immédiate dans une représentation visuelle des données. Les diagrammes de dispersion des coûts et des trafics ne semblent pas présenter un modèle clairement non linéaire. Mais ces observations doivent être prises avec prudence car des variables peuvent interagir avec les coûts et les trafics et peuvent empêcher une relation causale entre le trafic et le coût d'apparaître dans ces graphiques. Les modèles non linéaires ont d'ailleurs suggéré une non-linéarité statistiquement significative de la relation entre coûts d'entretien et trafic.

Les transformations Box-Cox peuvent être des outils adéquats pour refléter une relation potentiellement non linéaire. Cependant, ce n'est pas le seul outil. La forme fonctionnelle translog est plus simple et permet également la modélisation de relations non-linéaires. Cette forme a affiché des limites dans certains travaux, mais dans le cas présent les résultats obtenus ne sont pas contre-intuitifs<sup>25</sup>. De plus, la forme fonctionnelle translog présente des avantages

<sup>25</sup> En particulier on ne trouve pas le résultat problématique d'une décroissance de l'élasticité au trafic avec le trafic. Pour s'en assurer, on s'intéresse au coefficient de régression du terme quadratique. Celui-ci est positif pour le trafic de voyageurs. Pour le fret, le coefficient n'est pas statistiquement différent de zéro, et parfois légèrement positif ou négatif. Ces résultats suggèrent que la relation entre trafic et coût de maintenance n'est peut-être pas non-linéaire pour le fret. ,

indéniables par rapport à la forme fonctionnelle Box-Cox en termes d'interprétation des résultats des régressions, de tests d'hypothèses et de possibilité de correction en réaction au non-respect des hypothèses.

## 2. Risque de non-respect du principe de réflectivité des coûts

Les résultats de nos analyses ne permettent pas de conclure à la nécessité de l'utilisation de transformations Box-Cox au titre du principe de réflectivité des coûts et dans le contexte de la fixation de la redevance de circulation.

Les modèles en Box-Cox surpassent les alternatives telles que les modèles logarithmiques ou translog en termes de qualité de l'ajustement aux données (telle que mesurée par la fonction de log-vraisemblance).

En revanche, les éléments fournis dans le cadre de la présente expertise ne démontrent pas que les modèles en Box-Cox présentent de meilleurs résultats sur les tests de post-estimation, bien que nous notions que ceci est difficile à évaluer en raison de l'indisponibilité de plusieurs tests.

Par ailleurs, des modèles plus simples tels que les modèles en translog permettent d'obtenir des résultats similaires et de tirer des conclusions comparables aux modèles en Box-Cox. En particulier, les estimations des coûts marginaux ainsi que le signe et l'importance des coefficients sont comparables dans ces modèles. Parmi ces modèles, le translog respecte la non-linéarité de la relation entre coût et trafic évoquée précédemment. Par conséquent, la complexité additionnelle apportée par l'utilisation des modèles en Box-Cox ne semble pas être justifiée (nous revenons plus bas plus en détail sur la pertinence du modèle translog).

Enfin, la difficulté d'interpréter l'ampleur des coefficients de Box-Cox augmente le risque qu'une erreur de spécification ne soit pas remarquée (dans cette itération ou dans d'autres itérations des calculs).

### Modèles linéaire et en log-log

Nous estimons que les données suggèrent qu'il existe un risque de mauvais étalonnage du tarif si le coût marginal devait être estimé à l'aide des modèles linéaire ou en log-log.

La part des observations présentant une valeur nulle n'implique pas ici nécessairement un risque de biais si l'estimation est réalisée en remplaçant les valeurs nulles par des nombres très faibles. Ce remède rend les données appropriées à l'estimation avec des formes logarithmiques fonctionnelles.

Cependant, les modèles les plus simples, linéaires et log-log, ne produisent pas de résultats plausibles. Les résultats du modèle log-log sont significativement en dehors de la fourchette des résultats obtenus pour toutes les autres modèles testées par SNCF Réseau, leurs conseils ou l'Arafer. C'est également le cas pour les coûts marginaux relatifs au trafic fret estimés avec une fonction linéaire.

Nous avons donc examiné les mérites de différentes formes fonctionnelles pouvant accommoder une forme de non-linéarité. Nous sommes arrivés à la conclusion que l'exécution de modèles non-linéaires produisant des résultats

plus sensibles sans enfreindre les principes de transparence et simplicité exposés dans nos remarques préliminaires est possible.

### Modèles en translog

Les résultats des modèles translog (en particulier les modèles TL2 et TL5, qui se distinguent au sein de cette famille au regard de différents critères) s'inscrivent au milieu de la fourchette de résultats obtenus pour l'ensemble des modèles non linéaires (BT, BC, BCI, et plus particulièrement pour les variantes de ces modèles qui ressortent du tableau récapitulatif des résultats). Ceci suggère que le recours à des modèles en translog ne conduit pas à un risque élevé de surestimation ou de sous-estimation du tarif.

Nous soulignons que les coefficients des régressions en translog doivent être examinés plus avant pour confirmer leur caractère raisonnable. En particulier, il serait souhaitable d'établir que:

- les effets marginaux des autres variables explicatives ont le signe attendu et un ordre de grandeur raisonnable,
- les coefficients pour les variables d'intérêt, en particulier le trafic, sont conjointement statistiquement significatifs lorsque les termes d'interaction et les termes d'ordre supérieur sont pris en compte.

Nous notons que les coefficients des modèles en translog sont plus difficiles à interpréter que dans les modèles linéaires ou log-log. Cette caractéristique est similaire aux modèles Box-Cox. Cependant, les calculs nécessaires pour interpréter les coefficients des modèles en translog sont habituellement automatisés dans un logiciel d'économétrie standard facilement accessible à un large public. Ce n'est pas le cas pour les modèles en Box-Cox, où l'utilisation du logiciel et des techniques nécessaires sont à la portée d'un public beaucoup plus réduit.

Parmi ces deux modèles, le modèle TL2 (ou une variante du modèle translog affichant un degré de complexité similaire à TL2) pourrait être préféré au modèle TL5 pour les raisons suivantes:

- Le modèle TL5 fait intervenir de nombreux termes quadratiques (8) et termes d'interaction (36) dont la pertinence dans le modèle d'estimation de coûts d'entretien semble ne pas pouvoir être justifiée intuitivement.
- Le modèle TL2 permet une interprétation relativement simple des coefficients et permet de modéliser une relation non-linéaire entre les coûts et les trafics de fret et de voyageurs, tout en ne faisant intervenir que deux termes quadratiques et un terme d'interaction.
- Une large majorité des termes d'interaction du modèle TL5 ne sont pas statistiquement significatifs. Comme énoncé plus haut, les problèmes liés à la multicollinéarité sont plus probables pour les modèles complexes et il est probable que celle-ci vienne tirer à la hausse les écarts types des coefficients de régression.

## Recommandation

Pour ces raisons, nous ne recommandons pas l'utilisation de la forme fonctionnelle Box-Cox comme modèle central pour estimer le coût marginal d'entretien. Au lieu de cela, nous privilégions l'utilisation de modèles plus simples tels que translog.

Nous notons que si certains des modèles de translog rapportés ont des propriétés souhaitables, il peut être nécessaire de les affiner pour arriver à une estimation plus précise des coûts marginaux. Comme suggéré par SNCF Réseau, une estimation raisonnable peut impliquer la moyennisation des résultats pour plus d'un modèle. Néanmoins, nous recommandons l'utilisation du modèle TL2 parmi les modèles présentés pour les raisons énoncées plus haut. Nous notons aussi que des tests de post-estimation plus approfondis de ce modèle ainsi que des améliorations éventuelles devraient être envisagés pour consolider la construction tarifaire.

Enfin, nous réitérons que les modèles en Box-Cox peuvent fournir, lors de l'actualisation des estimations en vue des prochains exercices tarifaires, un contrôle de robustesse des résultats obtenus pour les modèles plus simples. Si le modèle Box-Cox aboutissait à l'avenir à des résultats raisonnables et robustes au regard de plusieurs critères de choix de modèles mais éloignés des résultats obtenus par le translog, ceci devrait constituer un point d'alerte et appeler des approfondissements.

## 6 ANALYSE DE FRONTIER ECONOMICS – DISTINCTION PAR SOUS-RESEAU

L'Arafer a également demandé à Frontier d'évaluer s'il convenait d'estimer les coûts marginaux d'entretien pour l'ensemble du réseau ou, alternativement, d'estimer séparément les coûts marginaux pour différentes parties du réseau en séparant l'échantillon (voir partie 3.7).

### 6.1 Principes

Dans cette partie nous exposons les considérations générales qui ont conduit notre analyse de la question posée.

La redevance de circulation diffère par catégorie de train mais pas par sous-réseau. Ainsi, au regard de la structure de la grille tarifaire, la désagrégation n'est pas nécessaire pour calibrer les redevances.

En revanche, la désagrégation en sous-réseaux doit être envisagée s'il existe un risque que la mise en commun des données relatives aux différents sous-réseaux fausse l'estimation du coût marginal. Une méthode générale pour apprécier ce risque consiste à réaliser l'estimation au niveau agrégé et puis désagrégé, et ensuite à établir si les coefficients sont statistiquement significativement différents.

Le fait que les modèles agrégés et désagrégés produisent des coefficients différents peut indiquer que la relation sous-jacente entre coût et trafic n'est pas la même dans les différentes parties du réseau. Cependant, un tel résultat ne constitue pas une justification suffisante pour la désagrégation en sous-réseaux. Plusieurs raisons peuvent justifier de conserver une approche agrégée dans un tel cas:

- Lorsqu'il a été clairement établi dans la pratique qu'il n'existe pas de différences sous-jacentes dans la relation entre coût, trafic et autres variables pour les différents sous-réseaux.
- Lorsque la qualité des données ne permet pas d'estimer le modèle de façon fiable pour les sous-réseaux. Ce critère peut être évalué en fonction du degré de variabilité des données dans les sous-échantillons, de la cohérence des coefficients (signe, ordre de grandeur) de la significativité statistique des résultats et des résultats des tests post-estimation.
- Lorsque la différence observée dans les estimations n'est pas une conséquence directe de la différence entre les types de réseau, mais que la désagrégation reflète l'effet d'une autre variable corrélée à la fois au type de réseau et au trafic.
- Lorsque les coûts marginaux obtenus à partir de modèles basés sur des sous-réseaux ne sont pas plausibles ou très éloignés des résultats obtenus dans la littérature sur les coûts marginaux d'entretien.

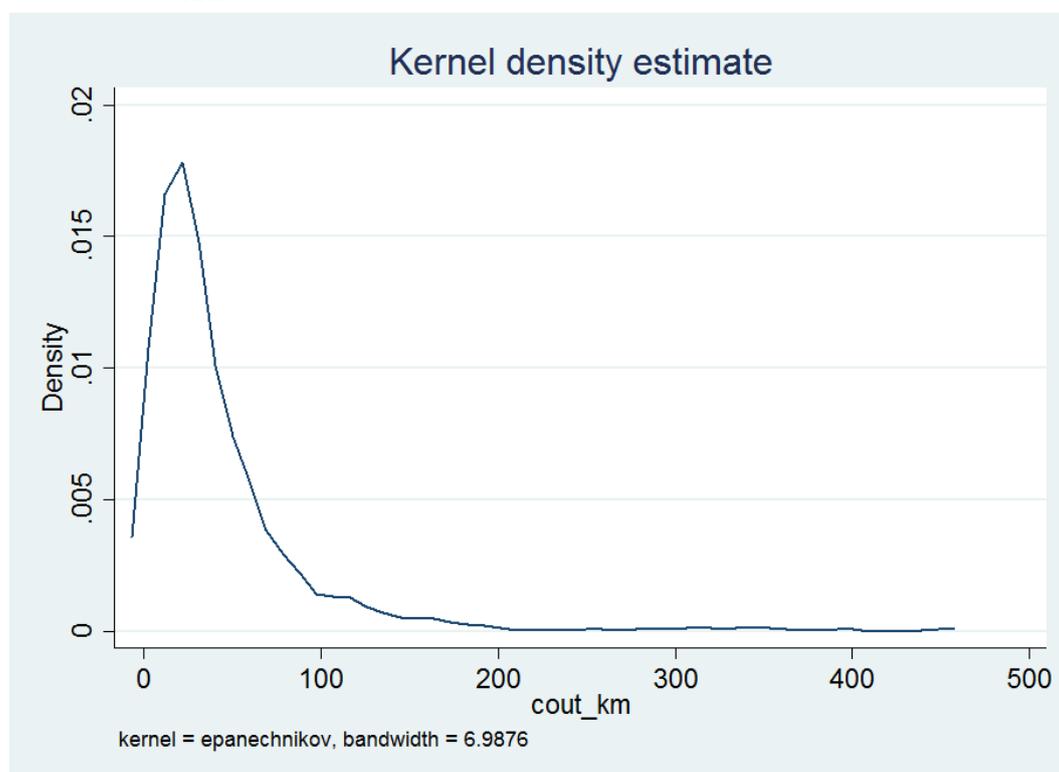
## 6.2 Comprendre la relation a priori entre UIC, trafic et coûts

Dans un premier temps nous présentons les éléments pratiques recueillis en vue d'apprécier la relation entre UIC, trafic et coûts.

### 6.2.1 Distribution des coûts

La Figure 17 présente une estimation en noyaux de la densité de la distribution des coûts d'entretien. La distribution est unimodale, et la grande majorité des observations correspondent à des coûts par km inférieurs à 100 000 €. Cependant, la distribution présente une queue droite relativement longue, avec des coûts supérieurs à 400 000 € / km pour certaines sections.

**Figure 17** Estimation en noyaux de la densité des coûts d'entretien par km



Source: Services de l'Arafer

### 6.2.2 UICs et trafic

Les segments de voie sont attribués aux catégories UIC en fonction du trafic fictif journalier (voir partie 2 pour la définition du trafic fictif). Les catégories UIC sont donc par construction corrélées au trafic. Néanmoins, il existe des chevauchements clairs entre les UIC en termes de niveaux réels de trafic.

Figure 18 Trafic journalier de trains de voyageurs (en tonnes brutes déclarées) par UIC

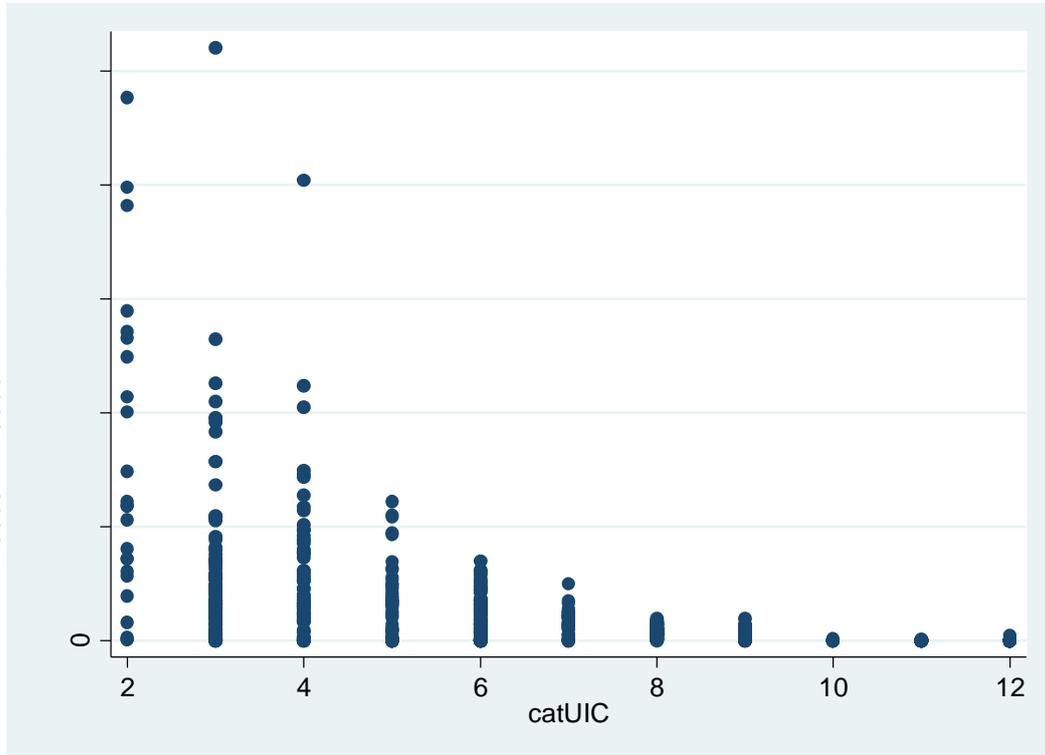
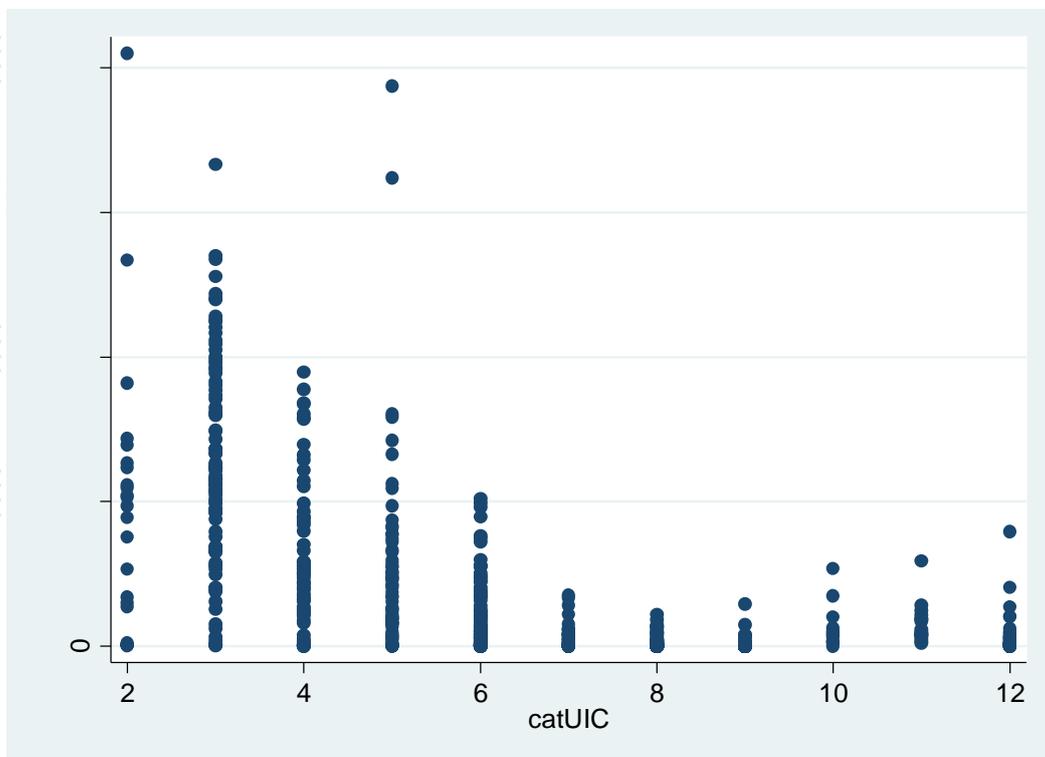


Figure 19 Trafic journalier de trains de fret (en tonnes brutes déclarées) par UIC



### 6.2.3 UIC et coûts

Les données d'entretien reflètent l'entretien réel et englobent la maintenance préventive et la maintenance corrective.

L'impact des UIC sur la planification de l'entretien préventif ne ressort pas clairement des échanges avec SNCF Réseau; nous comprenons que les règles de métier sont très spécifiques et plus complexes que les règles de renouvellement.

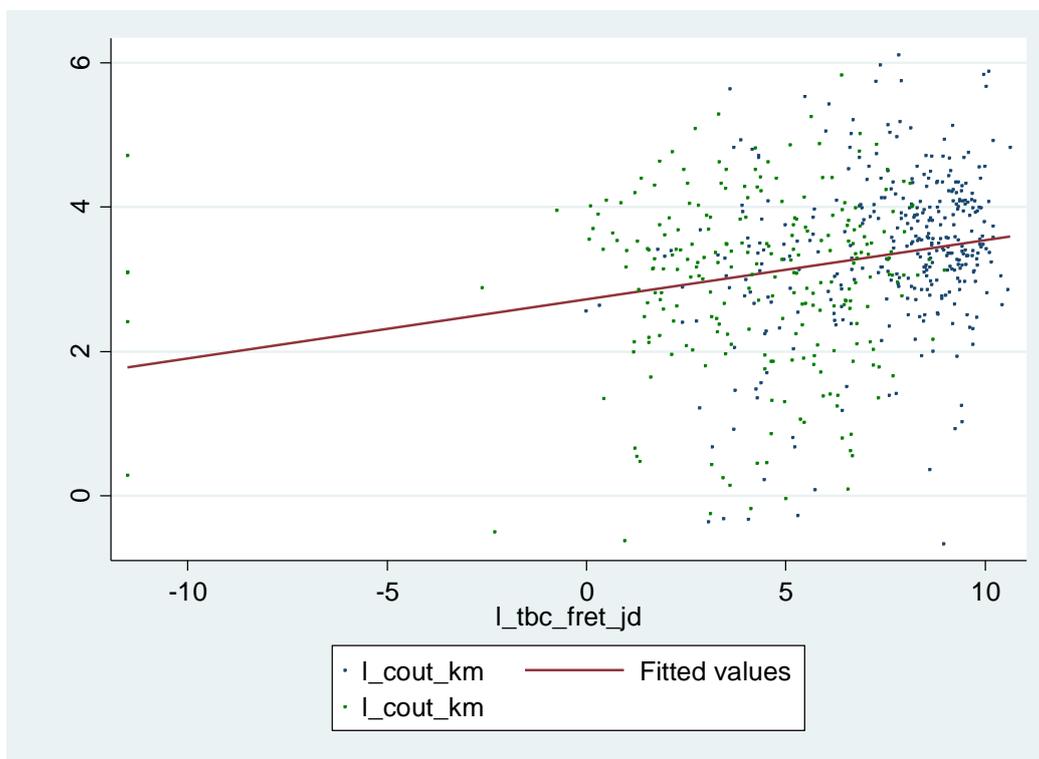
D'après ces mêmes échanges, il n'y aurait pas non plus de raison de penser que l'entretien correctif serait lié à la catégorisation par UIC des segments.

Dans l'ensemble, les éléments soumis dans le cadre de l'étude ne donnent pas de raison de penser, avant de réaliser les analyses économétriques, que la relation le trafic et les coûts d'entretien serait différente selon les catégories UIC.

## 6.3 Représentations graphiques

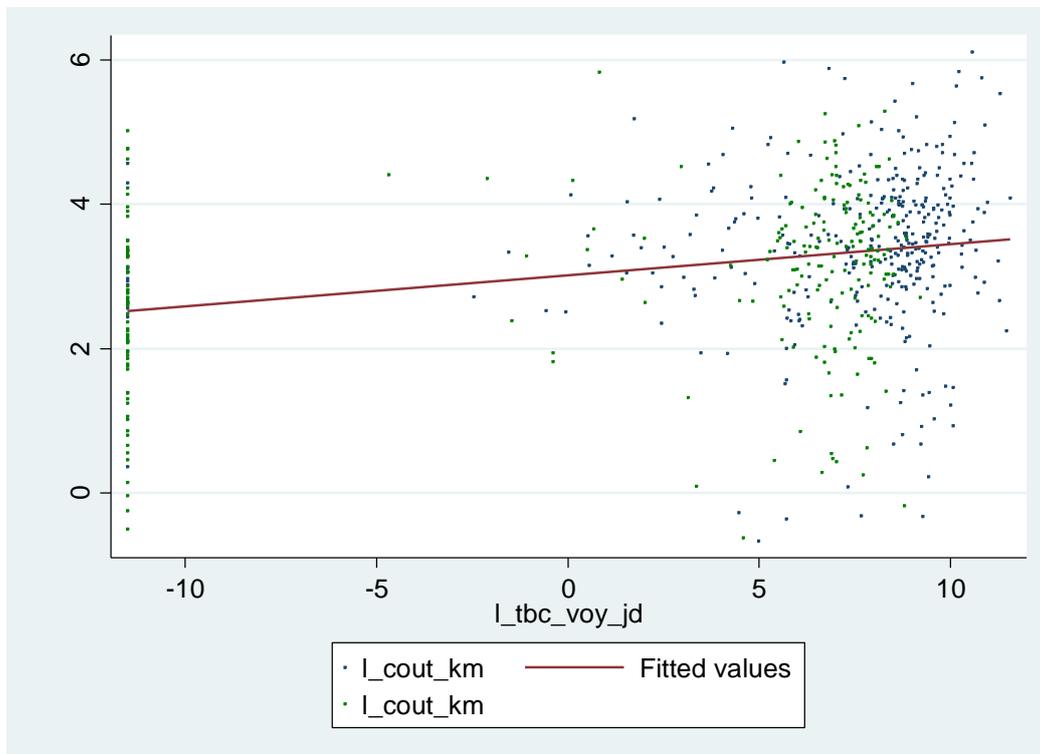
Dans cette partie nous étudions si la visualisation graphique de l'ensemble des données semble justifier une distinction entre sous-réseaux.

**Figure 20** Coûts d'entretien par km en fonction du trafic fret sur les UIC 2-6 (bleu) et 7-9 (vert)



Source: Services de l'ARAFER

**Figure 21** Coûts d'entretien par km en fonction du trafic voyageurs sur les UIC 2-6 (bleu) et 7-9 (vert)



Source: Services de l'ARAFER

Visuellement, ces graphiques ne donnent pas de raison de penser que la relation entre le trafic et le coût d'entretien est différente pour les réseaux structurant et capillaire. En effet, les lignes de régression ajustées ne semblent pas particulièrement inadaptées pour les observations vertes (réseau capillaire) ou bleues (réseau structurant) considérées séparément<sup>26</sup>. De plus, dans la plupart des zones du graphique, nous pouvons voir un mélange de points verts et bleus. Autrement dit, les deux types de réseau se chevauchent à la fois en termes de fourchettes de coûts et de trafic qu'elles couvrent.

<sup>26</sup> Notons que ceci pourrait être vérifié en traçant des lignes de régression ajustées pour les deux sous-réseaux.

## 6.4 Résultats économétriques

### Mise en œuvre de la désagrégation

Il existe plusieurs façons de modéliser la variation de la relation entre coûts et trafic par type de réseau, parmi lesquelles:

- L'inclusion d'une variable dichotomique pour chaque catégorie d'UIC,
- La distinction de sous-réseaux, tels que le réseau structurant (UIC 2 à 6) vs le réseau capillaire (UIC 7 à 9) comme l'ont testée les services de l'Arafer. La modélisation en distinguant les sous-réseaux peut se faire grâce à
  - des variables dichotomiques pour les sous-réseaux,
  - ces mêmes variables dichotomiques et des termes d'interaction entre les variables dichotomiques et les variables de trafic,
  - ces mêmes variables dichotomiques et des termes d'interaction entre les variables dichotomiques et toutes les autres variables explicatives<sup>27</sup>.

Les services de l'Arafer ont étudié l'impact de la désagrégation sur les coûts d'entretien marginaux. Les résultats de cette analyse sont présentés ci-dessous.

---

<sup>27</sup> Notons que le fractionnement de l'échantillon entre structurant et capillaire serait équivalent à dupliquer le nombre de variables dans le modèle en introduisant une variable dichotomique pour l'un des sous-réseaux et les termes d'interaction entre cette variable dichotomique et toutes les autres variables de la régression.

Figure 22 Résultats des estimations par sous-réseau des services de l'Arafer

Tableau 11. Entretien de la VOIE : résultats des estimations par sous réseaux

	Modèle 1 Structurant	Modèle 2 Capillaire	Modèle 3 Réseau Mixte	Modèle 4 Dédié Fret	Modèle 5 Capillaire Mixte	Modèle 6 Ensemble
<b>Parametre</b>						
Lambda	0.152***	0.185***	0.185***	.269***	0.277***	0.184***
<b>Coefficients des variables transformées</b>						
TBC fret (divers et hlp inclus)	0.079***	0.039*	0.049***	0.023	0.023	0.037***
TBC voyageur	0.059***	0.040	0.046***	-	0.034	0.067***
Densite de traverse	1.081	0.431	-0.112	0.085	0.004	0.237
Vitesse max (h)	0.172	0.218	0.212	0.273	0.229	0.217**
Age du rail	0.004	-0.060**	-0.004	-0.018	-0.006	-0.001
Appareils de voie	0.358***	-0.130	0.225**	-0.352	-0.423	0.253***
<b>Coefficients des variables non transformées</b>						
Pct en courbe	0.008**	0.014**	0.009**	0.011*	0.015*	0.010***
Pct LRS	-0.016***	-0.020***	-0.017***	-0.295***	-0.024***	-0.020***
LGV	-1.577***	-1.000	-1.936***	-2.241**	-2.193*	-0.809***
Dum Fret	-	-0.972	-0.737	-1.499	-1.403	-1.460**
Dum Voyageur	0.476	-0.575	-0.464	-	-2.139	-0.532*
Dum Adv	1.853***	-0.780	0.714	-1.802*	-2.097**	0.724**
Constante	-12.506	-2.810	4.742	-6.884	3.727	-0.790

Source : ARAFER.

Note : bien qu'elles ne soient pas présentées dans ce tableau de résultats, les indicatrices régionales et les indicatrices associées aux variables transformées prenant des valeurs nulles ont été incluses dans les modèles .

Significativité : \*\*\*99% \*\* 95% \* 90%.

Tableau 12. Entretien de la VOIE : résultats des estimations par sous réseaux

Cm en €/kTBC-km	Modèle 1 Structurant	Modèle 2 Capillaire	Modèle 3 Réseau Mixte	Modèle 4 Dédié Fret	Modèle 5 Capillaire Mixte	Modèle 6 Ensemble
Coût marginal fret	0.809	4.906	0.684	4.322	4.536	0.623
Coût marginal voy	0.553	1.620	0.625	-	1.877	0.696
Coût marginal total	0.453	1.448	0.397	-	1.156	0.274
Elasticité fret	0.26	0.24	0.17	0.23	0.24	0.15
Elasticité voy	0.18	0.08	0.16	-	0.10	0.17
Elasticité totale	0.15	0.07	0.10	-	0.06	0.07

Source : ARAFER.

Source: ARAFER

- Nous notons que des conclusions limitées peuvent être tirées de ces résultats parce que:
- Les résultats ne sont comparables qu'avec le modèle BC1, qu'Ecoplan décide de ne pas retenir. En effet, l'estimation d'un modèle désagrégé utilisant d'autres formes fonctionnelles Box-Cox (comme les modèles retenus BC4 et BCI4) est impossible sur les logiciels utilisés par les services de l'Arafer. Or, les estimations pour ce modèle BC1 diffèrent sensiblement des modèles retenus par SNCF Réseau/Ecoplan (BT4, BC4 et BCI4).

- La façon dont le coût marginal total est déduit des résultats du modèle économétrique, et sa relation avec les coûts marginaux estimés pour le trafic voyageurs et fret séparément n'est pas claire à nos yeux (nous nous attendions à ce qu'il se situe entre les deux). Par conséquent notre analyse s'est concentrée sur les estimations du coût marginal du trafic fret et voyageurs séparément (et non le coût marginal pour l'ensemble du trafic total).
- Toutefois, nous observons que:
- Pour le trafic fret, le coût marginal du réseau capillaire est nettement supérieur au coût marginal estimé selon toute autre spécification et supérieur aux ordres de grandeur référencés dans la littérature.
- Pour le trafic de voyageurs, le coût marginal du réseau capillaire est également plus élevé que celui du réseau structurant mais dans une moindre mesure.
- Les coefficients pour le trafic fret et de voyageurs ne sont pas significatifs statistiquement pour le réseau capillaire.

## 6.5 Conclusion

Nous présentons ici notre recommandation sur la question de la désagrégation du réseau pour les coûts d'entretien en suivant les principes énoncés en introduction.

Tout d'abord, il n'existe aucune preuve claire qui étaye les différences sous-jacentes de la relation entre le coût et le trafic en fonction du type de réseau. En particulier:

- nous n'avons pas reçu de preuve pratique (par opposition à une démonstration économétrique) d'un lien entre la catégorisation UIC et la relation entre le trafic et le coût (par exemple preuve appuyée sur les politiques d'entretien de SNCF Réseau); et
- des représentations graphiques simples des coûts d'entretien (en log) différenciées entre les réseaux structurant et capillaire ne suggèrent pas une relation différenciée entre les coûts d'entretien et le trafic entre les deux groupes.

En d'autres termes, rien n'indique qu'une variation dans la relation entre les coûts et le trafic selon le sous-réseau considéré soit liée aux catégories UIC autrement que par l'intermédiaire de la composante trafic qui définit ces catégories en premier lieu.

Deuxièmement, il n'est pas évident qu'il soit possible d'estimer de façon fiable un modèle désagrégé. En particulier, une analyse non-approfondie des résultats du modèle appliqué sur l'échantillon désagrégé suggère une perte considérable de significativité statistique des variables de trafic pour le réseau capillaire (et un niveau inattendu de coûts marginaux).

À ce stade, nous ne recommandons donc pas de désagréger l'échantillon entre les réseaux structurants et capillaires pour estimer les coûts marginaux d'entretien du réseau ferroviaire.

## RESULTATS ISSUS DES RECOMMANDATIONS DE FRONTIER ECONOMICS

Le tableau ci-dessous présente les coûts marginaux estimés par les services de l'Arafer suite à l'application des recommandations énoncées ci-dessus.

Le coût marginal est estimé selon le modèle en translog TL2, appliqué à l'ensemble du réseau, et ce pour la voie, les Adv et la signalisation<sup>28</sup>.

Les résultats font état d'une baisse par rapport aux estimations qui figurent en annexe 6.1.1 du projet de DRR 2018 en date de publication du présent rapport.

Activité	Coût marginal d'entretien, en €2018/train-km
<b>TAGV sur LC - US</b>	<b>0.658</b>
<b>TAGV sur LC - UM</b>	<b>1.170</b>
<b>TAGV sur LGV – US</b>	<b>0.382</b>
<b>TAGV sur LGV – UM</b>	<b>0.676</b>
<b>Autres trains grandes lignes</b>	<b>1.014</b>
<b>TER</b>	<b>0.651</b>
<b>TRANSILIEN</b>	<b>0.855</b>
<b>FRET</b>	<b>1.005</b>
<b>HLP Fret</b>	<b>0.379</b>

<sup>28</sup> Hors caténaies, qui font l'objet d'une redevance à part, la RCE.

## 7 RECOMMANDATIONS D'EVOLUTIONS FUTURES DU MODELE

Nous comprenons que SNCF Réseau a apporté un certain nombre d'améliorations aux modèles de coûts élaborés lors des précédents exercices de construction tarifaire. Malgré les progrès réalisés, nous estimons qu'il existe des pistes potentielles pour améliorer les modèles existants à l'avenir. Ces pistes découlent d'observations et d'échanges tenus dans le cadre de l'expertise qui fait l'objet de ce rapport, bien qu'elles dépassent le champ strict des deux questions posées et traitées précédemment.

### Données – variables explicatives

Il subsiste actuellement un risque de biais dû à l'omission dans les spécifications retenues de certaines variables dont la pertinence a été établie dans la littérature sur les coûts marginaux d'entretien des infrastructures ferroviaires. Les résultats de la modélisation économétrique pourraient fournir des prévisions plus précises si ces variables pertinentes étaient incluses comme variables explicatives dans le modèle. Dans certains cas, un travail préalable de collecte des données correspondante est nécessaire, dont nous comprenons qu'il serait techniquement réalisable. Ces variables sont notamment:

- La vitesse réelle. Le jeu de données compilé par SNCF ne contient que la vitesse maximale théorique de circulation sur chaque section de voie. Cependant, les principes d'ingénierie et la littérature suggèrent que la vitesse réelle, plus que la vitesse maximale, est le principal facteur d'usure et, par conséquent, entraîne des coûts plus élevés.
- Le poids réel des trains. Les données de trafic en kTBC-km mobilisées dans le modèle correspondent au tonnage déclaré par les entreprises ferroviaires au moment de la réservation des sillons. Des écarts peuvent intervenir entre ce tonnage déclaré et le tonnage constaté, qui constitue le facteur influant réellement sur les besoins d'entretien des voies. Il serait souhaitable pour la qualité de l'analyse de substituer des données constatées de trafic aux données déclaratives actuellement utilisées.
- Prix des facteurs de production. Il convient d'examiner la possibilité que les coûts constatés sur le réseau reflètent des variations régionales des prix des facteurs de production. En outre, si les travaux d'estimation venaient à s'appuyer sur des données pluriannuelles, il conviendrait de prendre en compte la variation des prix des facteurs de production au fil du temps.

### Données – cadre temporel

L'un des principaux défauts de l'échantillon utilisé pour estimer les coûts de marginaux est de n'inclure qu'une année de données. Ceci enfreint l'utilisation des techniques économétriques de panel. Dans le modèle actuel, les variables de contrôle sont introduites pour prendre en compte le fait que les coûts sont en partie déterminés par des caractéristiques de l'infrastructure indépendantes du

trafic. Cette prise en compte est potentiellement moins fine que dans un modèle de panel, qui distinguerait d'une part entre les variations de coûts dues aux variations de trafic y compris d'une année sur l'autre, et d'autre part les variations dues aux autres caractéristiques qui, elles, sont constantes d'une année à l'autre. Cette approche est mise en œuvre et recommandée dans une grande partie de la littérature académique. Il est impératif que SNCF Réseau garantisse la continuité de la méthode de collecte annuelle des données mobilisées dans le modèle afin de permettre la construction d'un ensemble de données de panel.

### Modélisation économétrique

Les travaux actuels de SNCF Réseau et des services de l'Arafer ont déjà mobilisé de nombreuses techniques économétriques différentes. Cependant, des méthodes alternatives devraient être envisagées qui seraient adaptées aux problématiques du cas d'espèce. En effet, en accord avec les principes présentés en partie 4, des techniques sophistiquées ne doivent être introduites qu'une fois qu'il est clair que (i) les données présentent des caractéristiques particulières qui doivent être traitées et (ii) les modèles simples ne traitent pas les caractéristiques particulières des données de manière satisfaisante. Dans le cas présent, les techniques de panel pourraient être particulièrement pertinentes. Comme expliqué plus haut, la disponibilité des données de panel permettrait de mettre en œuvre des techniques d'économétrie pour mieux distinguer l'impact du trafic de celui des caractéristiques des sections de voie sur les coûts.

### Structure tarifaire

Dans le cadre du projet de DRR 2018 publié le 9 décembre 2016, la redevance de circulation est établie en euro par train-km et différenciée pour neuf types de train.

Cela implique que, à partir du coût marginal en euro par kTBC-km estimé par segment de voie et AdV, SNCF Réseau détermine (1) d'abord un coût marginal en euro par kTBC-km sur l'ensemble du réseau (pondéré par le trafic de chaque section du réseau), et (2) ensuite une redevance en euro par train-km à l'aide d'hypothèses sur le poids moyen des trains dans chacune des neuf catégories.

La moyennisation nuit à l'efficacité du signal envoyé par la redevance aux entreprises ferroviaires, emportant plusieurs risques:

- Distorsion des incitations pour les entreprises ferroviaires à utiliser le réseau le plus efficacement possible (par exemple, optimisation du choix de l'équipement pour minimiser le poids du train), ce qui entraîne ultimement une augmentation des coûts d'infrastructure portée par le consommateur final
- Discrimination à l'égard de certains trains et entreprises ferroviaires (par exemple pour les trains les plus légers au sein d'un type).

Dans tous les exercices de tarification, une certaine moyennisation est nécessaire, sinon la structure tarifaire peut rapidement devenir trop complexe. Cependant, nous identifions certains leviers pour améliorer l'efficacité des signaux envoyés par la redevance de circulation sans imposer une complexité excessive à la structure tarifaire.

- Une option serait de définir la redevance de circulation en euro par kTBC-km. Le coût marginal par kTBC-km est un résultat intermédiaire du processus actuel de modélisation des coûts et aucun ajustement de la méthode ne serait donc nécessaire pour l'obtenir.
- Cependant, comme noté ci-dessus, nous comprenons que les données actuelles de tonnage sont déclarées par les entreprises ferroviaires lors de la réservation de capacité. Il serait préférable de recueillir des données réelles de tonnage afin de réduire les incitations des entreprises ferroviaires à distordre leurs déclarations de tonnage. Nous comprenons également que la mesure du tonnage réel, qui nécessite des évolutions des systèmes d'information, serait également nécessaire pour faire respecter l'obligation nouvellement imposée pour des raisons de sécurité aux entreprises ferroviaires de déclarer leur tonnage réel (obligation transposée de la réglementation de la Commission Européenne).
- Définir la redevance de circulation en euro par kTBC-km est une approche envisageable parmi plusieurs pour renforcer l'efficacité du signal économique. Elle peut être mise en avant car le calcul du coût marginal en euro par kTBC-km est une étape intermédiaire du processus de modélisation actuel. Cependant, la redevance de circulation pourrait aussi être différenciée en fonction du poids par essieu ou d'autres caractéristiques techniques des trains, comme c'est le cas dans d'autres pays.
- Enfin, nous notons que, si les données de vitesse réelle étaient disponibles et incluses dans la modélisation comme recommandé ci-dessus, il conviendrait d'envisager une structure tarifaire basée à la fois sur les kTBC-kilomètres et la vitesse (en définissant par exemple, et pour limiter la complexité des grilles tarifaires, des fourchettes de vitesse réelle).

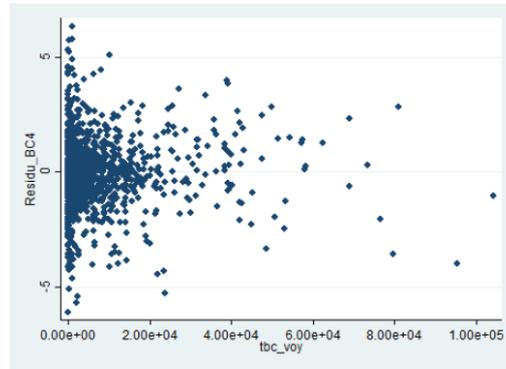
# ANNEXE A ANALYSES ADDITIONNELLES DE SNCF RESEAU

## A.1 Diagrammes de dispersion des résidus

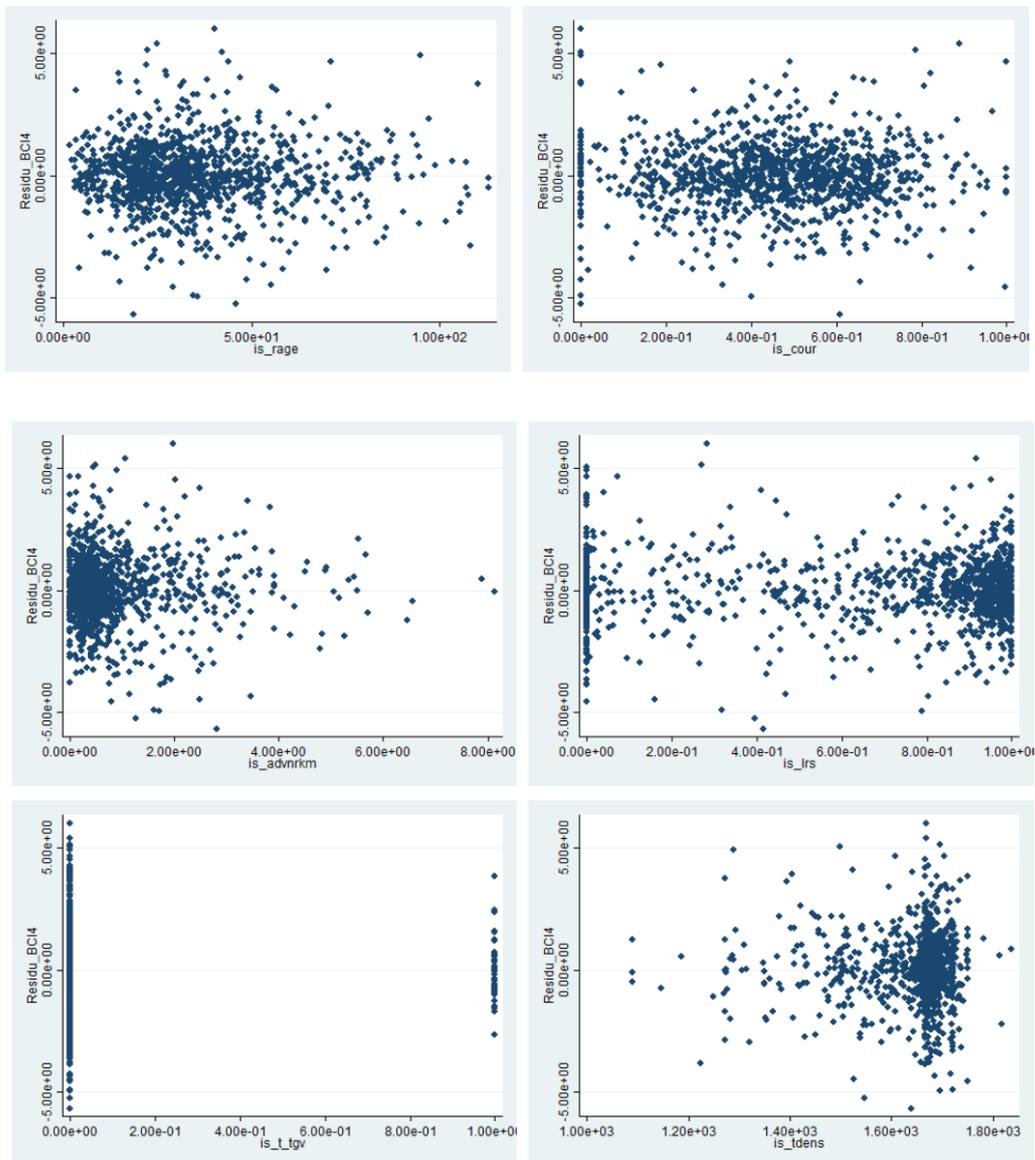
BC4 model

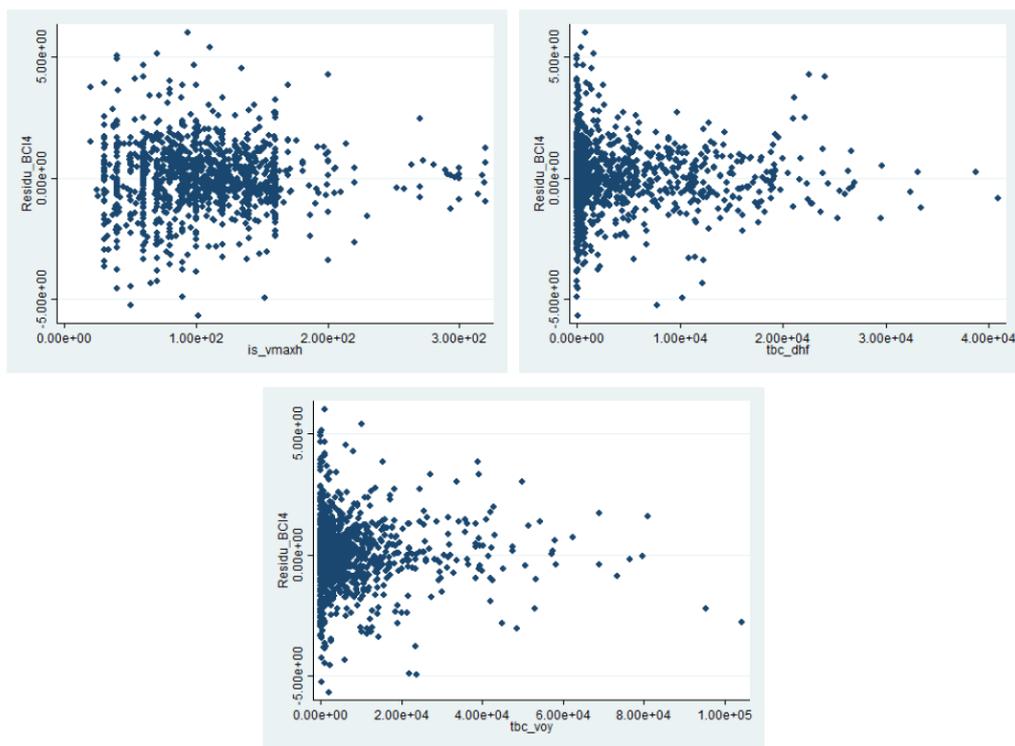


# ESTIMATION DES COUTS MARGINAUX D'ENTRETIEN DU RESEAU FERRE NATIONAL



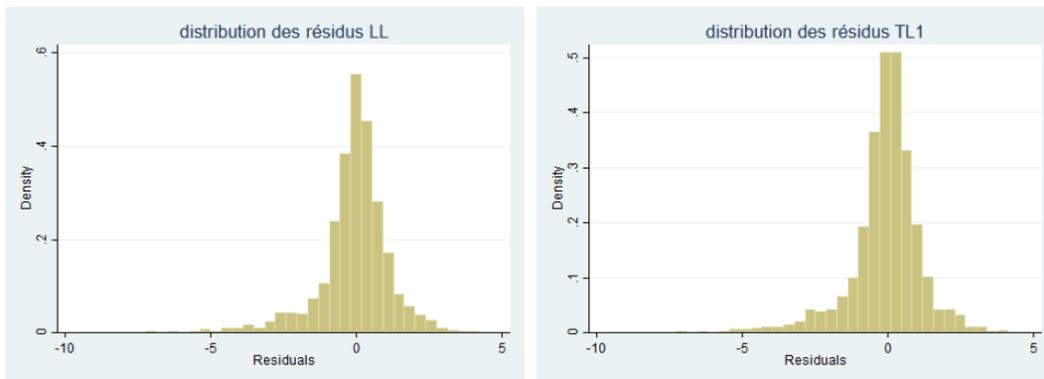
BC14 model



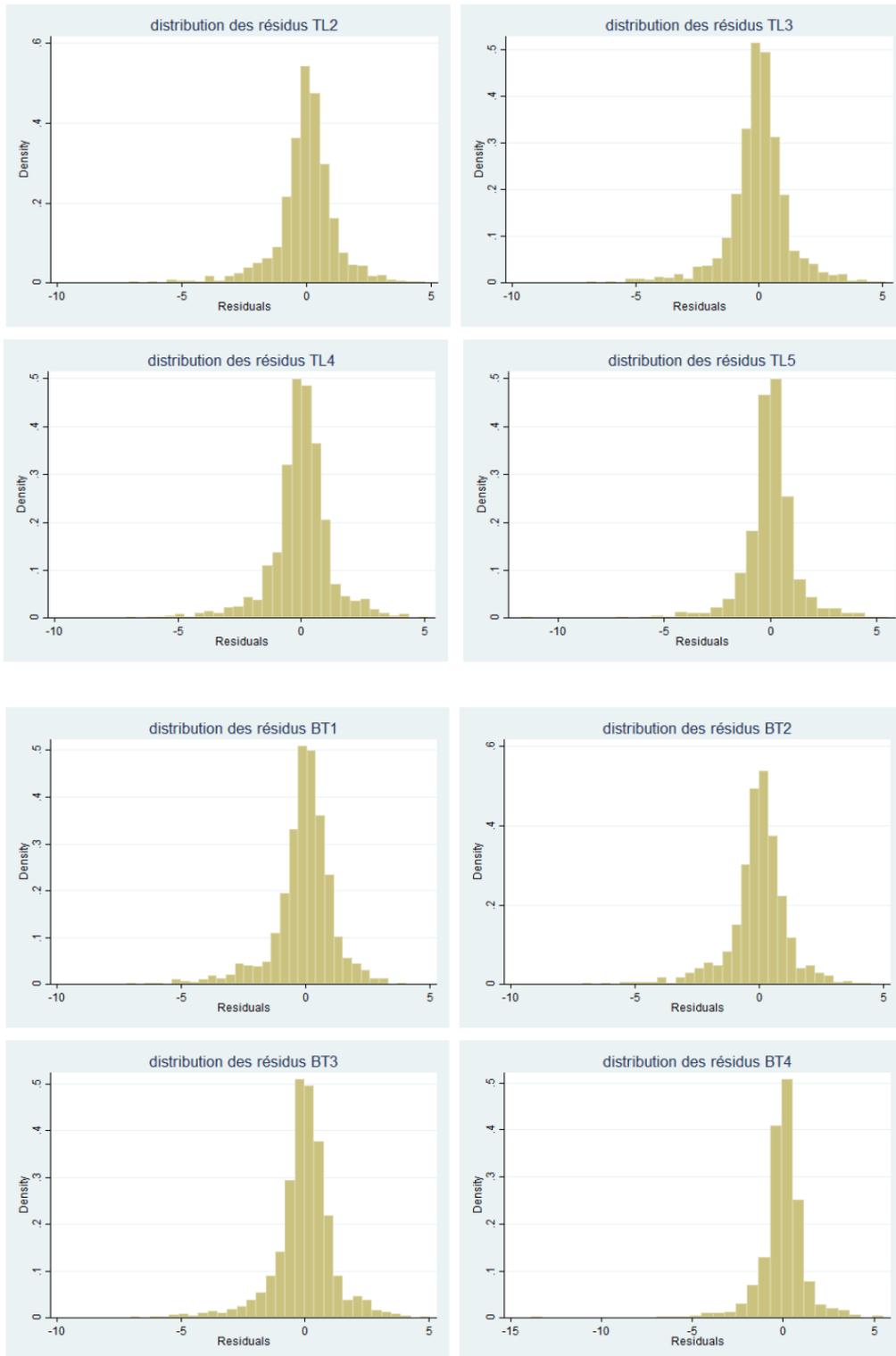


## A.2 Histogrammes des résidus

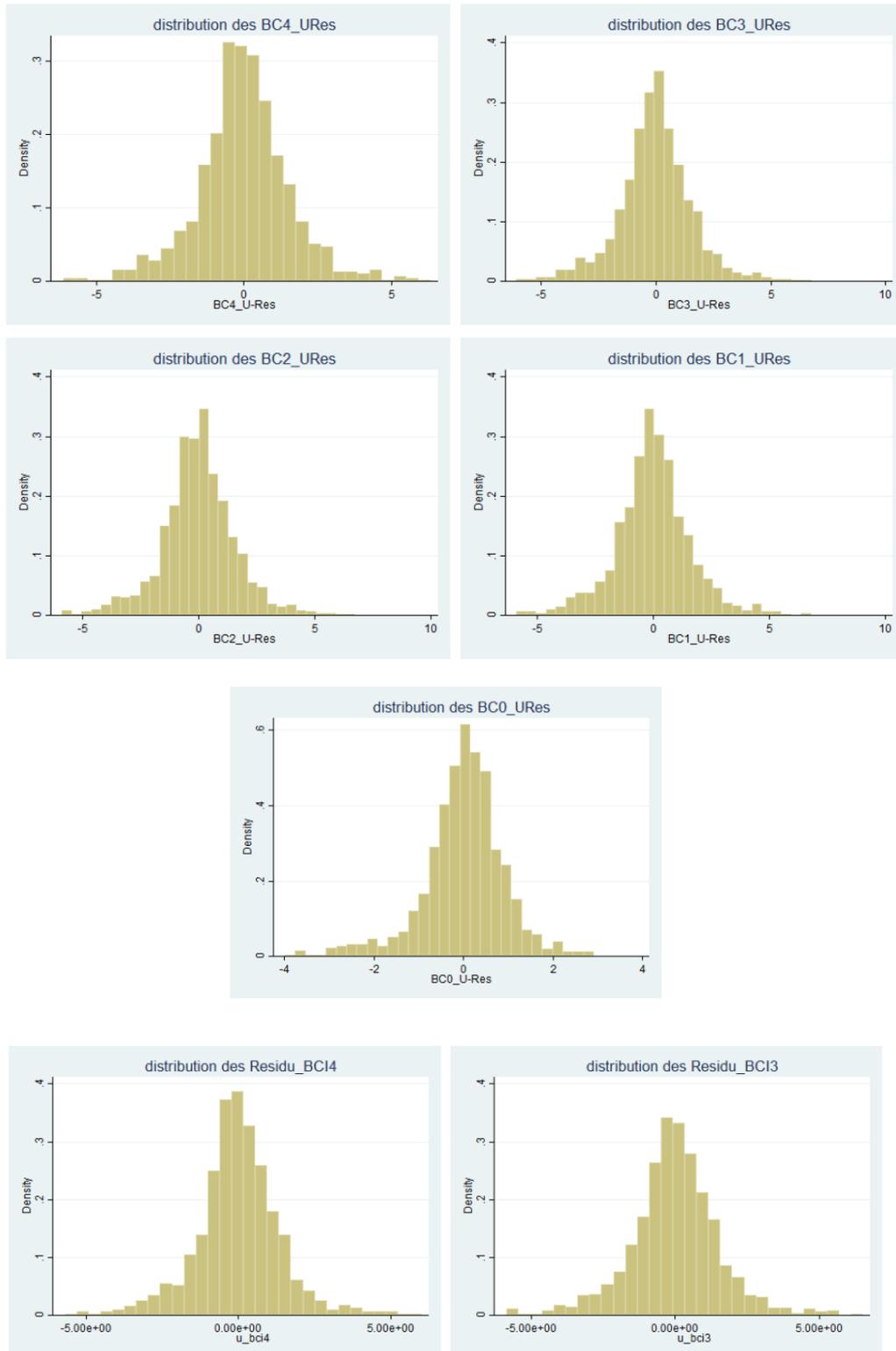
Histograms of the residuals

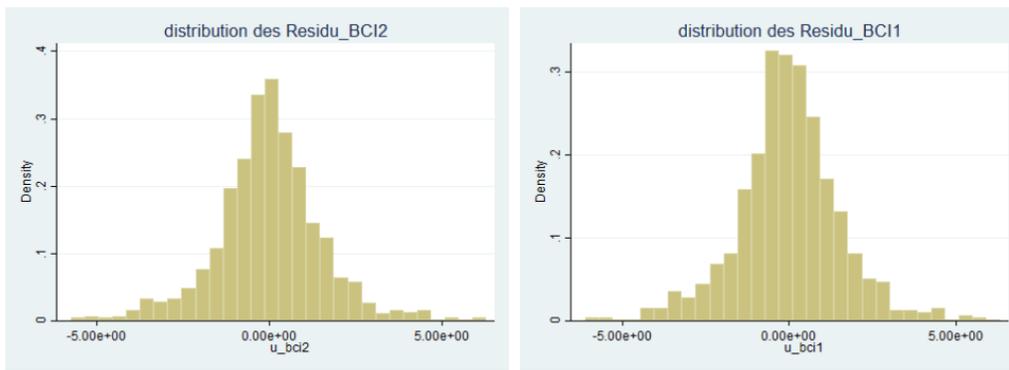


# ESTIMATION DES COÛTS MARGINAUX D'ENTRETIEN DU RESEAU FERRE NATIONAL



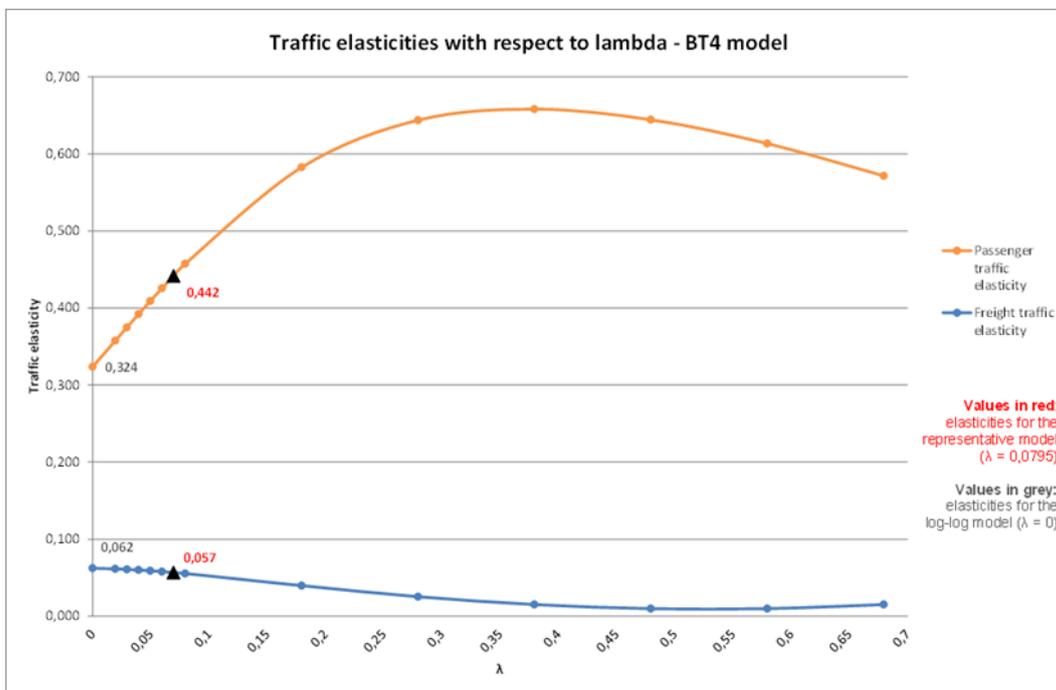
# ESTIMATION DES COÛTS MARGINAUX D'ENTRETIEN DU RESEAU FERRE NATIONAL



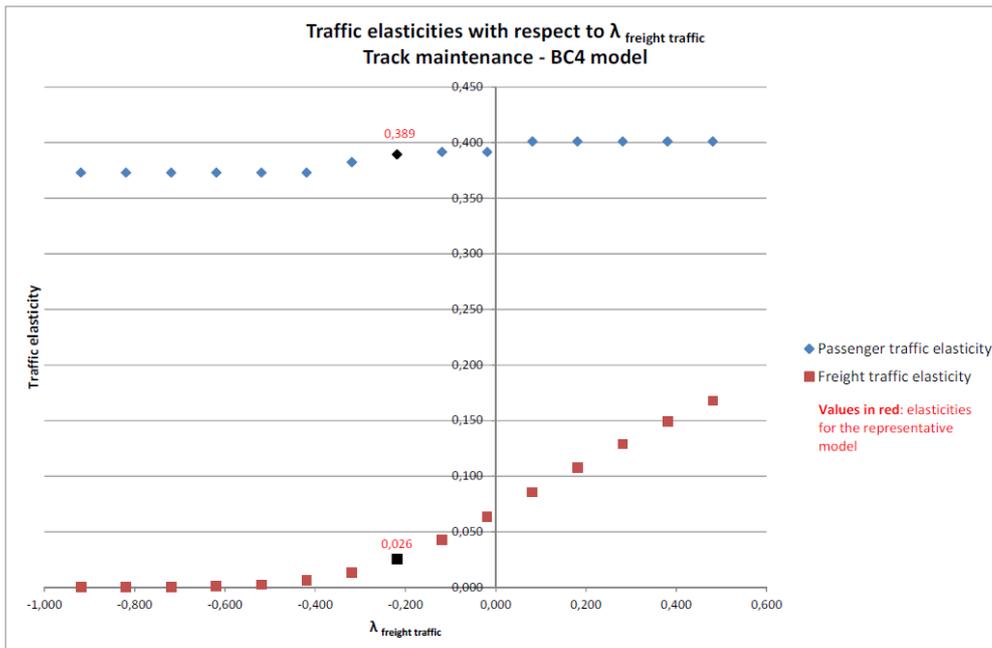
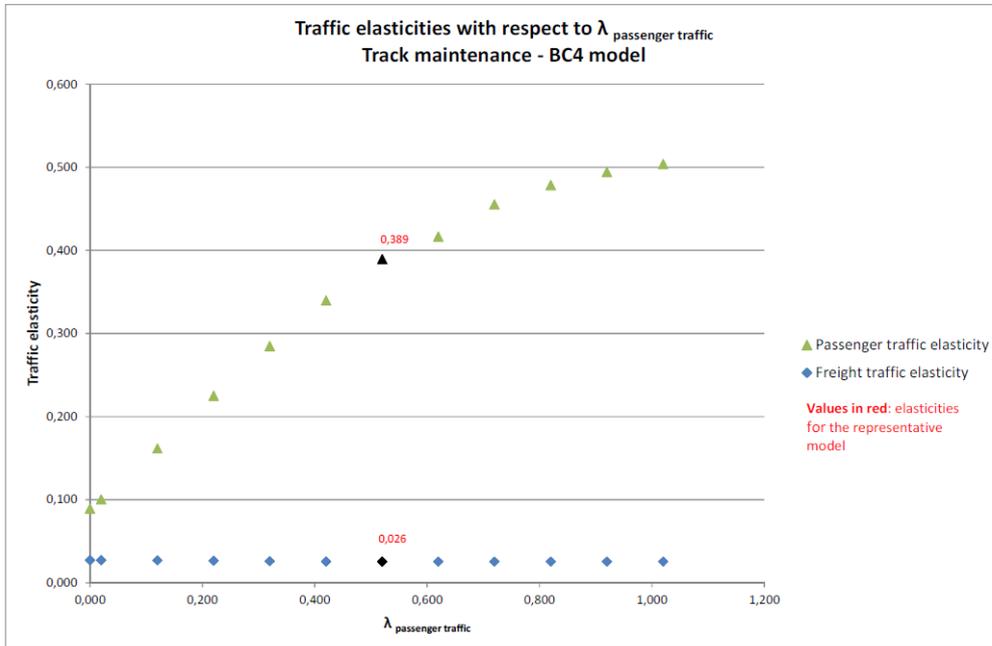


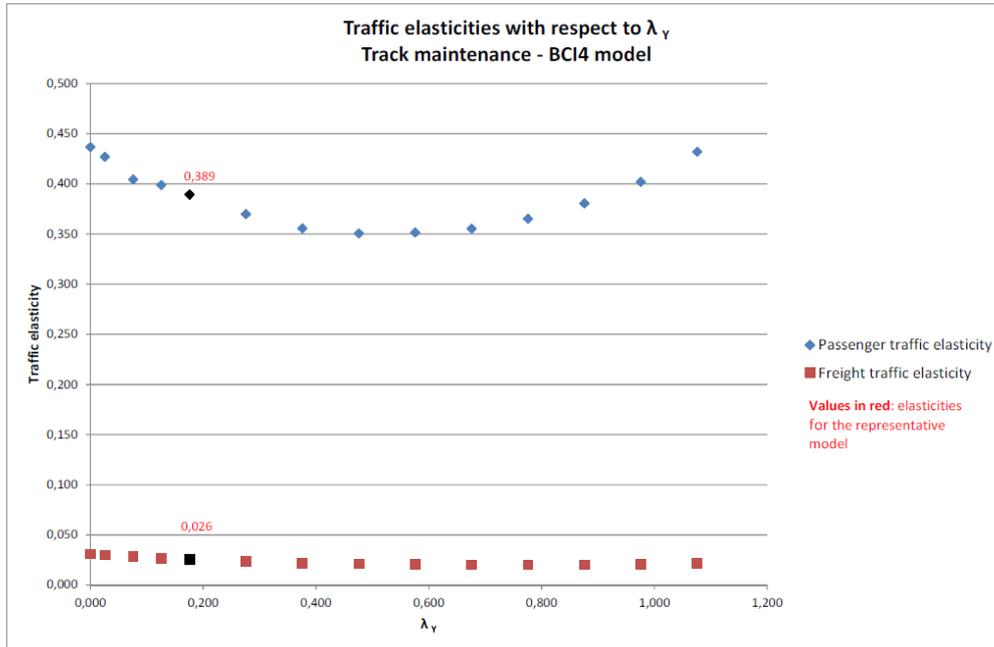
## A.3 Graphiques de sensibilité aux paramètres de transformation Box-Cox

### A.3.1 Modèle BT4



### A.3.2 Modèle BC4





### A.3.3 Modèle BCI4

