

ESTIMATION DES COUTS MARGINAUX DE RENOUVELLEMENT 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 | 4 |
| 2 | Modélisation de SNCF Réseau | 6 |
| 2.1 | Données | 6 |
| 2.2 | Approche de modélisation | 8 |
| 2.3 | Principaux résultats | 10 |
| 3 | Analyses des services de l'Arafer | 12 |
| 3.1 | Analyse des données | 12 |
| 3.2 | Analyse de sensibilité au choix de la forme fonctionnelle | 13 |
| 3.3 | Analyse de sensibilité au choix des variables explicatives | 13 |
| 3.4 | Analyse de sensibilité au choix de forme de la variable de trafic du modèle | 14 |
| 3.5 | Distinction du coût marginal de renouvellement par sous-réseau | 14 |
| 4 | Analyse de Frontier Economics – Principes généraux | 16 |
| 4.1 | Principes de tarification de l'accès à l'infrastructure ferroviaire | 16 |
| 4.2 | Bonnes pratiques de modélisation économétrique | 16 |
| 4.3 | Approche de choix d'un modèle | 17 |
| 5 | Analyse de Frontier Economics – Choix de la forme fonctionnelle | 18 |
| 5.1 | Contexte | 18 |
| 5.2 | Comprendre les propriétés des données | 19 |
| 5.3 | Choix du modèle | 21 |
| 5.4 | Stabilité des résultats entre les modèles | 23 |
| 5.5 | Validité des hypothèses | 24 |
| 5.6 | Sensibilité des résultats | 27 |
| 5.7 | Conclusion et recommandation | 29 |
| 6 | Analyse de Frontier Economics – Distinction par sous-réseau | 32 |
| 6.1 | Principes | 32 |
| 6.2 | Comprendre la relation <i>a priori</i> entre UIC, trafic et coûts | 33 |
| 6.3 | Représentations graphiques | 35 |
| 6.4 | Résultats économétriques | 37 |
| 6.5 | Conclusion | 41 |
| 7 | Recommandations d'évolutions futures du modèle | 44 |
| | Annexe A Résultats additionnels pour les modèles par sous-réseau | 47 |
| | Annexe B Coefficient de variation par UIC | 49 |

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 2003¹ précise quant à lui certains des principes auxquels se conforme SNCF Réseau dans sa proposition de redevances².

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 ferré³.

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 associés⁴.

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 de renouvellement 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 de renouvellement
- Sur la désagrégation de l'analyse des coûts de renouvellement entre réseau structurant et réseau capillaire.

¹ Modifié depuis par le Décret n°2015-1040 du 20 août 2015

² Voir notamment articles 29, 30

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

⁴ 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

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

2 MODELISATION DE SNCF RESEAU

En date du 8 septembre 2015, SNCF Réseau a transmis aux services de l'ARAFER le rapport « Estimation des coûts marginaux de renouvellement – Méthodologie et résultats ». Celui-ci présente les premières estimations de SNCF Réseau des coûts marginaux de renouvellement de la voie et des appareils de voie (AdV) sur le réseau qu'il exploite. Après un premier échange avec les services de l'Arafer, ce rapport a été complété afin de tenir compte des questions et remarques formulées par l'Autorité.

Cette partie retranscrit les éléments saillants de ce rapport modifié.

2.1 Données

Le périmètre de l'étude de SNCF Réseau concerne uniquement le renouvellement de la voie et des appareils de voie (AdV) des lignes conventionnelles du réseau. Le renouvellement des lignes à grande vitesse est exclu au même titre que le renouvellement des actifs de signalisation et des caténaires.

L'échantillon est constitué de 102 526 observations pour les sections de voies et 23 499 observations pour les AdVs.

SNCF Réseau estime qu'utiliser des données constatées sur les dépenses de renouvellement n'est pas envisageable pour deux raisons:

- Il n'existe pas de base de données structurée présentant les dépenses de renouvellement de façon localisée sur le réseau avec une granularité suffisamment fine.
- Quand bien même une base de données adaptée existerait, le renouvellement d'une section de voie ou d'un AdV est relativement peu fréquent et une série de données sur les dépenses de renouvellement d'une section ferait donc apparaître une majorité d'observations nulles et ferait appel à des modélisations innovantes que SNCF Réseau considère encore trop peu éprouvées pour être utilisées.

Pour remédier au problème d'indisponibilité de données, SNCF Réseau propose la construction de chroniques d'investissements de renouvellement par segment de voie ou AdV à partir de l'outil STR, développé par le métier Maintenance et Travaux.

Cet outil permet d'établir pour chaque segment ou AdV une prévision de l'ensemble des opérations de renouvellement qu'il faudra théoriquement réaliser et de leurs coûts jusqu'à l'année 2300. Pour ce faire, l'outil STR s'appuie sur des données sur les installations (données patrimoniales datant du 1^{er} janvier 2014), les niveaux d'utilisation et de sollicitation de l'infrastructure (données portant sur la période 2000-2013) et les règles de métier de déclenchement théorique des opérations de régénération.

Dans le cadre de notre mission, il est utile de préciser que les règles de métier de renouvellement sont largement dépendantes de la catégorisation UIC des segments de voie (voir annexe).

CATEGORISATION UIC

Les sections de voie du réseau géré par SNCF Réseau sont classifiées en groupes UIC. Cette classification repose sur le tonnage dit « fictif », calculé selon la formule suivante:

$$Tf = S \times Tv + Km \times Tm + Kt \times Tt$$

avec:

- Tv = tonnage journalier voyageurs exprimé en tonnes brutes remorquées,
- Tm = tonnage journalier marchandises exprimé en tonnes brutes remorquées,
- Tt = tonnage journalier des engins de traction exprimé en tonnes,
- Km = coefficient égal à 1.15, et pour les voies supportant un trafic prépondérant d'essieu de 20 tonnes, 1.30,
- Kt = coefficient égal à 1.40,
- S = coefficient qui pourra prendre différentes valeurs entre 1 et 1.25 en fonction de la vitesse de la section de ligne concernée.

Les groupes UIC reposent sur les classes de tonnage fictif suivantes:

| Groupe UIC | Tranche de trafic fictif |
|------------|--------------------------|
| 1 | > 120 000 |
| 2 | 85 000 - 120 000 |
| 3 | 50 000 - 85 000 |
| 4 | 28 000 - 50 000 |
| 5 | 14 000 - 28 000 |
| 6 | 7 000 - 14 000 |
| 7 | 3 500 - 7 000 |
| 8 | 1 500 - 3 500 |
| 9 | < 1500 |

Etant donnée leur définition basée sur le trafic fictif, les groupes UIC sont largement corrélés au trafic en tonnage réel.

Dans l'outil STR, ces groupes constituent la principale différenciation des politiques de maintenance et de renouvellement d'une section à l'autre. Les règles métier qui s'appliquent au renouvellement des constituants de voie pour chaque UIC sont présentées dans l'annexe A.

L'outil STR permet de générer des données sur le long terme, fondées sur les connaissances techniques des ingénieurs de SNCF Réseau telles que retranscrites dans l'outil STR, mais ne résout pas le problème de nullité d'une grande partie des observations.

Afin de résoudre ce problème, SNCF Réseau calcule une annuité économique moyenne de renouvellement. Cette démarche permet d'estimer le besoin annuel moyen de régénération, soit le coût de renouvellement annuel d'un kilomètre de voie ou d'un AdV à long terme.

L'annuité est calculée pour chaque segment et AdV, entre l'année 0 et l'année de la dernière régénération, et en prenant compte un taux d'actualisation de 4,5%⁵.

Même si l'outil STR utilise des données de trafic sur la période 2000-2013 pour construire des chroniques de renouvellement sur près de 300 ans, la série de donnée résultante qui est utilisée pour l'analyse économétrique reste transversale. En effet, une annuité unique par segment ou AdV est calculée, ce qui rend impossible la mise en œuvre de techniques économétriques de panel.

Ces annuités constituent la série de données de base des coûts de renouvellement. Le jeu de données est ensuite complété par plusieurs séries de données de potentielles variables explicatives des coûts de renouvellement. Ces variables sont listées dans la partie suivante.

2.2 Approche de modélisation

SNCF Réseau estime un modèle économétrique afin de déterminer les variables ayant un impact sur les annuités de renouvellement ainsi que l'élasticité des coûts de renouvellement au trafic.

La variable dépendante du modèle est l'annuité de renouvellement de chaque section, exprimée en euros par km pour les sections de voie et en euros par AdV pour les AdV.

Forme fonctionnelle

Trois formes fonctionnelles ont été testées par SNCF Réseau: linéaire, log-log et Box-Cox. La forme fonctionnelle Box-Cox est plus générale dans le sens où elle englobe les formes fonctionnelles linéaires ($\lambda=1$) et log-log ($\lambda=0$).

Variables explicatives

L'outil STR détermine l'annuité de renouvellement de chaque section de voie et AdV. Les variables explicatives prises en compte par SNCF Réseau sont donc pour la plupart celles qui sont structurantes dans la détermination des annuités par l'outil STR.

Les variables suivantes ont été envisagées:

- le trafic en tonnage circulé,
- les variables techniques suivantes pour les sections de voies: variables de profil de rail, variables de types de traverses, variable de type de pose,
- les variables techniques suivantes pour les AdV: variables de type d'AdV, variable de type de traverse, variables de type de tangente,
- la variable de zone dense,
- l'âge des composants,
- les groupes UIC,
- la longueur de la section pour les sections de voie.

⁵ Le taux d'actualisation fait l'objet d'analyses desensibilités analysées par les services de l'Arafer mais ceci n'est pas inclus dans le champ de notre étude.

Spécificités du modèle Box-Cox

Les modèles en Box-Cox font intervenir des paramètres de transformation de données en plus des coefficients de régression de chaque variable. Ces paramètres généralement nommés λ et θ sont déterminés par un logiciel de façon à maximiser la log-vraisemblance du modèle. De plus, la détermination des paramètres des transformations Box-Cox et des coefficients de la régression est simultanée.

Différentes restrictions peuvent être imposées sur les paramètres de transformation Box-Cox (par exemple, un paramètre λ identique pour toutes les variables ou au contraire, un paramètre distinct pour chaque variable de la régression). Dans cette étude, SNCF Réseau impose un paramètre λ commun pour toutes les variables explicatives et un paramètre θ distinct pour la variable dépendante – l’annuité de renouvellement.

Notons par ailleurs que les variables dichotomiques, soient toutes les variables techniques ainsi que la variable de zone dense, ne sont pas sujettes à des transformations dans les modèles en log-log et Box-Cox.

De plus, lors de l’estimation de modèles en Box-Cox, certaines fonctionnalités ne sont pas disponibles sur STATA (tests post-estimation notamment).

Traitement des résultats

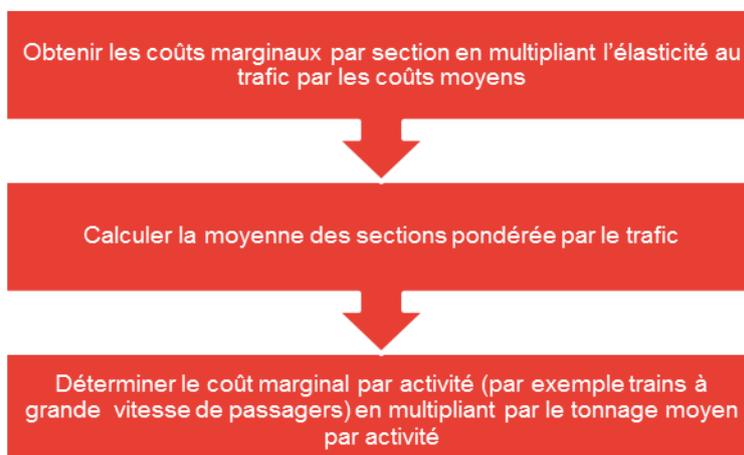
Une fois le modèle final choisi, les résultats de la régression doivent être convertis en élasticités au trafic afin de déterminer le coût marginal moyen de renouvellement. Pour le modèle Box-Cox retenu, l’élasticité n’est pas constante et est donc calculée pour chaque section de voie et AdV séparément.

L’élasticité au trafic de chaque section ou AdV est ensuite utilisée pour calculer le coût marginal en multipliant l’élasticité au trafic par le coût unitaire (au km) moyen de renouvellement. Ce coût unitaire moyen est basé sur la valeur des annuités calculées par le modèle STR.

Une moyenne pondérée par le trafic est ensuite calculée pour obtenir le coût unitaire marginal moyen de renouvellement pour les sections de voie et pour les AdV. Ce coût marginal est exprimé en €2012/kilotonne-kilomètre.

Dans le cadre du projet de DRR 2018 publié le 9 décembre 2017, 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 tonne-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 Etapes de calcul des résultats de régression à la redevance de circulation



Source: *Frontier Economics*

2.3 Principaux résultats

La forme fonctionnelle Box-Cox est retenue par SNCF Réseau. SNCF Réseau motive ce choix par la plus haute log-vraisemblance des résultats obtenus avec cette forme fonctionnelle. Un seul modèle est retenu (par opposition à la modélisation des coûts d'entretien pour lequel la moyenne des résultats de trois modèles est retenue).

Les variables suivantes ont été retenues dans la spécification finale du modèle :

- le trafic en tonnage circulé,
- les variables techniques suivantes pour les sections de voies: variables de profil de rail, variables de types de traverses, variable de type de pose,
- les variables techniques suivantes pour les AdV: variables de type d'AdV, variable de type de traverse, variables de type de tangente,
- la variable de zone dense.

En revanche, SNCF Réseau considère que plusieurs variables ne devraient pas être incluses dans le modèle:

- L'âge des composantes est exclu. Selon SNCF Réseau, il n'influence que la date de déclenchement de la première opération et pas le rythme de renouvellement. De plus, l'inclusion de ces variables dans les régressions augmente l'ajustement des modèles aux données mais les signes des coefficients en deviennent difficilement interprétables.
- Les groupes UIC car:
 - ils sont le résultat d'une fonction multilinéaire des tonnages circulés (tonnages fictifs) causant un problème de multicollinéarité,
 - leur intégration entraîne une diminution de l'impact direct du trafic sur les coûts, aboutissant à des coûts marginaux extrêmement faibles, jugés incohérents avec les ordres de grandeur attendus⁶.

⁶ Nous revenons plus loin sur la question de la prise en compte des UIC dans le modèle.

- La longueur des sections. SNCF Réseau estime que l'impact de la longueur d'une section sur les coûts est pris en compte de façon adéquate en utilisant les coûts par km en variable dépendante. Ceci implique des rendements constants en fonction des km (absence d'économies d'échelles), hypothèse sur laquelle nous revenons plus loin.
- Pour la voie courante, dans le modèle Box-Cox retenu:
 - La variable de tonnage a comme attendu un impact significativement positif.
 - Les coefficients des variables techniques sont cohérents avec les durées de vie relatives des différentes catégories de rail, des différents types de traverses et des différents types de pose.
 - La variable de zone dense affecte l'annuité de renouvellement à la hausse comme prévu.
 - SNCF Réseau estime que la qualité d'ajustement du modèle et la cohérence des coefficients s'expliquent notamment par le fait que le modèle est estimé sur des données simulées et non constatées.

Des résultats similaires sont obtenus pour le modèle des coûts des AdV.

La Figure 2 présente les estimations de coûts marginaux de renouvellement obtenues à partir des régressions retenues pour les sections de voie et les AdV.

Figure 2 Résultats d'estimation des coûts marginaux de renouvellement

| | Voie courante | AdV | Total |
|---|---------------|-------|-------|
| Coût marginal en € 2012/kilotonne-km | 1.524 | 0.151 | 1.675 |

Source: SNCF Réseau, Estimation des coûts marginaux de renouvellement, page 32

Les coûts marginaux calculés dans l'étude de SNCF Réseau sont significativement plus faibles que ceux obtenus lors des estimations précédentes. En effet, le coût marginal moyen total est en baisse de 41.66%.

3 ANALYSES DES SERVICES DE L'ARAFER

A la suite d'échanges entre les services de l'Arafer et de SNCF Réseau, le rapport a été modifié pour tenir compte des remarques et commentaires des services de l'Autorité.

Egalement, dans le but de vérifier la reproductibilité des résultats obtenus par SNCF Réseau et de favoriser l'efficacité des échanges contradictoires entre le régulateur et le gestionnaire d'infrastructure, les services de l'Arafer ont demandé à SNCF Réseau la transmission des données désagrégées permettant la modélisation des coûts de renouvellement.

En date du 6 mars 2016, les services de l'Arafer ont émis un document visant à exposer les principales analyses conduites par les services à partir des données transmises par SNCF Réseau.

Cette partie retranscrit les éléments saillants de l'analyse des services de l'Arafer, et 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.

3.1 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 pour les sections de voie:

- Moyenne, écart-type, minimum et maximum des variables de coûts de renouvellement par km, de coûts de renouvellement par section, de longueur de voie, de tonnage, de tonnage journalier, d'âge du rail et d'âge des traverses.
- La répartition des 49 901 km de voie du réseau en voie de ligne courante (LC) et ligne à grande vitesse (LGV).
- La répartition par groupe UIC :
 - des 45 210 km de voie courante,
 - des dépenses théoriques moyennes de renouvellement de la voie par an sur une période de 300 ans,
 - des tonnages annuels,
 - des segments selon leur type de pose de rail,
 - des segments selon leur catégorie de profil de rail,
 - des segments selon leur catégorie de type de transverse,
 - des segments selon leur classification en zone dense.

Les services de l'Arafer retranscrivent également une analyse de corrélation des variables réalisée par SNCF Réseau. Il en ressort que :

- Le tonnage moyen annuel est fortement corrélé à l'annuité kilométrique actualisée de renouvellement. En revanche, lorsque l'on décompose l'analyse

de corrélation du trafic avec les coûts de renouvellement par UIC, la corrélation s'estompe et devient même négative pour certaines UIC.

- Certaines caractéristiques techniques du réseau sont également corrélées entre elles et avec le trafic ou les groupes UIC. Par exemple, la variable d'âge du rail est positivement corrélée avec l'âge des traverses.

Pour les AdV, les mêmes statistiques descriptives sont généralement présentées. De plus, l'analyse de corrélation montre que le tonnage moyen annuel ainsi que les groupes UIC sont fortement corrélés à l'annuité kilométrique actualisée de renouvellement.

3.2 Analyse de sensibilité au choix de la forme fonctionnelle

Le rapport de SNCF Réseau ne présentant initialement que les résultats complets du modèle de coûts pour la forme fonctionnelle Box-Cox, les services de l'Arafer ont demandé à SNCF Réseau de partager les résultats complets des régressions en log-log et en linéaire. Les résultats de ces régressions sont présentés dans le rapport des services de l'Arafer.

Les Figure 3 et Figure 4 présentent l'élasticité au trafic et le coût marginal de renouvellement des sections de voie et des AdV respectivement obtenus en procédant aux trois régressions avec les mêmes variables explicatives. Notons également que les variables explicatives sont toutes significatives dans les trois modèles pour les sections de voie et pour les AdV.

Figure 3 Elasticité et coût marginal obtenus pour les sections de voie

| | Box-Cox | Linéaire | Log-log |
|---------------------------------------|---------|----------|---------|
| Elasticité | 0.142 | 0.100 | 0.137 |
| Coût marginal (en €2012/kilotonne-km) | 1.524 | 1.234 | 1.526 |

Source: Arafer, Refonte de la tarification 2018: document de travail sur l'estimation des coûts marginaux de renouvellement, page 23

Figure 4 Elasticité et coût marginal obtenus pour les AdV

| | Box-Cox | Linéaire | Log-Log |
|---------------------------------|---------|----------|---------|
| Elasticité | 0.079 | 0.071 | 0.055 |
| Coût marginal (en €2012/AdV-km) | 0.304 | 0.303 | 0.248 |

Source: Arafer, Refonte de la tarification 2018: document de travail sur l'estimation des coûts marginaux de renouvellement, page 33

3.3 Analyse de 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.

- Pour les sections de voie, les services de l'Arafer concluent que:

- Les variables techniques, de zone dense, d'âge des constituants, de longueur de section sont significatives statistiquement lorsque elles sont incluses dans le modèle. Cependant, leur inclusion a relativement peu d'influence sur les paramètres de transformation Box-Cox (λ et θ), sur l'élasticité au trafic et sur le coût marginal de renouvellement.
- L'inclusion des groupes UIC dans la régression change fondamentalement les résultats. Les paramètres de transformations Box-Cox sont très différents de ceux du modèle retenu par SNCF Réseau. On observe également que la quasi-totalité de l'effet du trafic sur les coûts de renouvellement est capturé par les variables dichotomiques UIC.
- Pour les AdV, les services de l'Arafer concluent que :
 - Le signe des coefficients et la valeur des paramètres de transformation Box-Cox sont plus sensibles à l'inclusion et à l'exclusion de certaines variables.
 - On observe une sensibilité de l'élasticité au trafic et du coût marginal de renouvellement à l'inclusion et à l'exclusion de certaines variables.

3.4 Analyse de sensibilité au choix de forme de la variable de trafic du modèle

Les services de l'Arafer testent également la robustesse du modèle à l'inclusion de variables non-linéaires (quadratiques et cubiques). Pour cela, la forme fonctionnelle log-log est utilisée car des termes quadratiques et cubiques ne peuvent pas être inclus dans un modèle Box-Cox.

Pour les sections de voie, l'inclusion d'une variable de trafic quadratique entraîne une augmentation des coûts marginaux estimés de 7% et l'inclusion de variables de trafic quadratique et cubique entraîne une diminution des coûts marginaux estimés de 16,4%. Les services de l'Arafer concluent que malgré le fait que les variables sont fortement significatives, les coûts marginaux obtenus restent semblables à ceux retenus par SNCF Réseau. Pour les AdV, ils concluent que certaines variables quadratiques et cubiques sont significatives mais dans tous les cas leur impact sur l'élasticité au trafic et le coût marginal est faible.

3.5 Distinction du coût marginal de renouvellement par sous-réseau

Les services de l'Arafer proposent de prendre en compte une estimation alternative du coût marginal de renouvellement pour laquelle on procéderait à des régressions distinctes pour différents sous-réseaux. Cette proposition est justifiée par une différenciation selon les groupes UIC de la durée de vie théorique des actifs, du référentiel de régénération et du coût unitaire du GOPEQ. L'une des distinctions proposées est celle entre le réseau structurant (UIC 2 à 6) et le réseau capillaire (UIC 7 à 9).

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

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

Figure 5 Résultats des régressions pour les sections de voie par sous-réseau

| | Réseau structurant (UIC 2 à 6) | Réseau capillaire (UIC 7 à 9) |
|--------------|---|---|
| Box-Cox | Elasticité = 0.073 MC = 0.618 €2012/kilotonne-km | NA NA |
| Log-linéaire | Elasticité = 0.068 MC = 0.596 €2012/kilotonne-km | Elasticité = 0.005 MC = 0.329 €2012/kilotonne-km |

Source: Arafer, Refonte de la tarification 2018: document de travail sur l'estimation des coûts marginaux de renouvellement, p.30

Figure 6 Résultats des régressions pour les AdV par sous-réseau

| | Réseau structurant (UIC 2 à 6) | Réseau capillaire (UIC 7 à 9) |
|--------------|---|---|
| Log-linéaire | Elasticité = 0.067 MC = 0.229 €2012/kilotonne-km | Elasticité = 0.014 MC = 0.572 €2012/kilotonne-km |

Source: Arafer, Refonte de la tarification 2018: document de travail sur l'estimation des coûts marginaux de renouvellement, p.39-40

Pour les segments de voie, les résultats des régressions pour les sous-réseaux montrent une élasticité et des coûts marginaux significativement plus faibles que pour l'ensemble du réseau.

Pour les AdV, les résultats sont plus volatiles selon les types de distinctions de sous-réseaux mais on observe de manière générale des coûts marginaux plus faible pour le fret, plus importants pour les UIC à faible trafic et comparables à ceux de l'ensemble du réseau pour les UIC à trafic moyen et important.

Ces résultats soulèvent des questions techniques qui seront examinées par la suite dans ce rapport.

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 de circulation 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 circulation⁷.

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 - les parties prenantes doivent:

⁷ 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.

- 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 ;
- Pouvoir répliquer les résultats en utilisant des outils qui sont accessibles au public et utilisés par une communauté assez large de spécialistes ;
- Être capables d'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 raisonnables 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 Box-Cox

Le modèle sélectionné par SNCF Réseau repose sur des transformations Box-Cox des variables dépendantes et explicatives. Nous rappelons ci-dessous les principaux éléments de justification fournis par SNCF Réseau pour le choix d'un modèle en Box-Cox, car nous nous y référons à plusieurs reprises dans le reste de cette partie.

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. Celles-ci incluent:

- 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 raisonnables⁸,
- La cohérence avec la littérature sur les coûts ferroviaires,
- La cohérence avec l'approche utilisée lors des précédents exercices de détermination des redevances.
- Le traitement du problème de nombreuses observations avec des valeurs nulles lorsque celui-ci se pose (ce dont on confirmera ci-dessous que cela n'est pas le cas ici).

Autres formes fonctionnelles

Dans son premier rapport sur les coûts de renouvellement, SNCF Réseau a testé la sensibilité à d'autres formes fonctionnelles linéaires et logarithmiques et indique que ces modèles aboutissent à une log-vraisemblance inférieure à celle obtenue pour des modèles en Box-Cox équivalents. Dans son deuxième rapport, SNCF Réseau rapporte les coefficients, les élasticités et les coûts marginaux des modèles linéaires et log-log. SNCF Réseau n'a pas estimé de modèle translog. Les résultats correspondants sont disponibles dans le rapport des services de l'Arafer pour certaines spécifications du modèle.

⁸ 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.

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.

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. Ce point a donc été étudié dans le cadre de l'étude (bien que ne comptant pas parmi les points mis en avant SNCF Réseau).

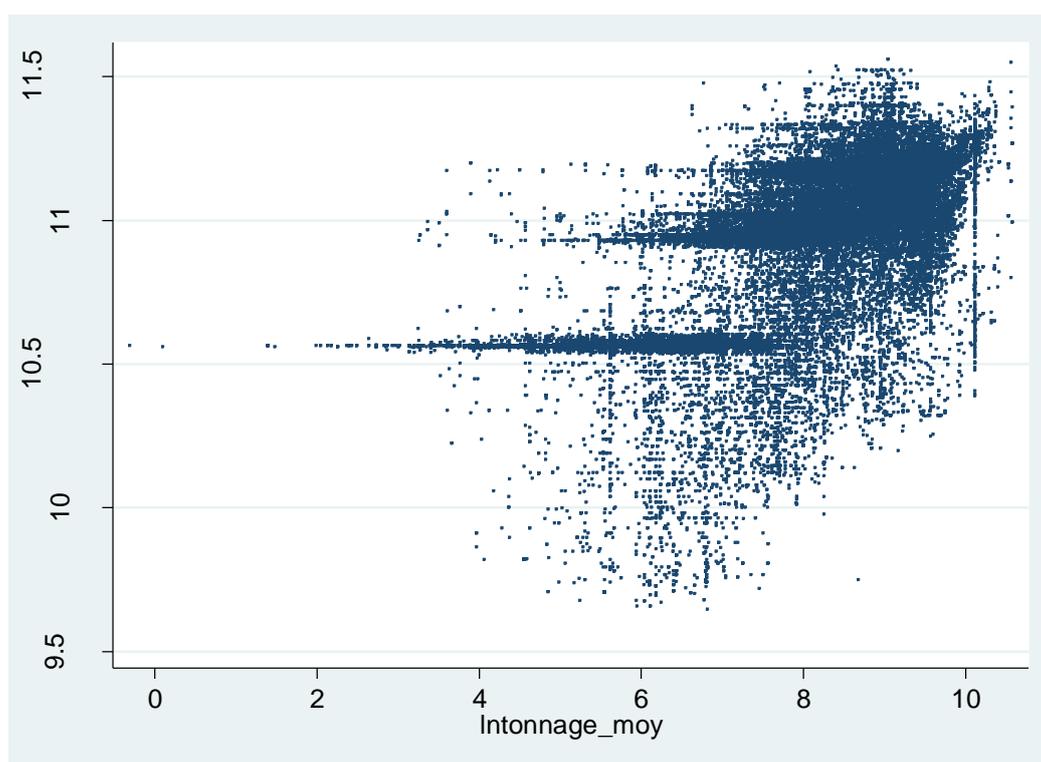
D'après les éléments transmis dans le cadre de l'étude, on ne constate la présence d'aucune valeur nulle pour les variables non-dichotomiques dans l'ensemble des données (variable indépendante, ce qui est dû au fait que les données sont simulées, et variables explicatives, notamment trafic). Nous confirmons que la présence de zéros dans le jeu de données ne peut pas être invoquée comme raison de préférer un modèle Box-Cox au cas d'espèce.

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 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 de renouvellement et le trafic.

La figure ci-dessous présente un diagramme de dispersion entre le logarithme des coûts de renouvellement (pour la voie) et le logarithme du trafic. Le graphique suggère une corrélation positive entre ces deux variables. De plus, la relation entre le trafic et le coût semble moins forte pour des niveaux de trafic plus faibles.

Figure 7 Annuité de renouvellement par km en fonction du trafic en tonnes (en log-log)



Source: Services de l'Arafer

Ces éléments suggèrent une relation non-linéaire entre le log du trafic et le log des coûts de renouvellement. Cette relation non-linéaire pourrait être la conséquence:

- D'une interaction avec une variable explicative elle-même corrélée au trafic. Dans ce cas, la relation entre le trafic et les coûts de renouvellement pourrait être linéaire après avoir contrôlé l'effet de cette variable sur l'estimation. La partie suivante de ce rapport traite de ce dernier point. En particulier, elle examine si cette non-linéarité peut être une conséquence de l'influence du type de section ou de la longueur de voie sur les coûts.
- D'une relation causale non-linéaire entre le trafic et les annuités de renouvellement, c'est-à-dire d'un impact du trafic sur les coûts de renouvellement qui ne serait pas constant selon les niveaux de trafic. Dans ce cas, une forme fonctionnelle permettant de modéliser une relation non-linéaire entre le log du trafic et le log des coûts est nécessaire.

Plusieurs modèles permettent de prendre en compte des relations non linéaires. Ces modèles diffèrent les uns des autres et certains en englobent d'autres. Pour déterminer lequel représente la réponse la plus adéquate pour refléter la non-

linéarité, il convient de se fonder sur les propriétés statistiques des données ainsi que sur les principes énoncés dans la section précédente.

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 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 transformation en Box-Cox. 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-Cox les effets marginaux sont des fonctions complexes de l'ensemble des variables du modèle, restreignant 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. Par conséquent, il est plus difficile d'identifier des résultats potentiellement emprunts d'erreurs ou de comparer les coefficients entre les modèles.
- Manque de transparence : 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.

- Proportionnalité : SNCF Réseau et ses conseillers 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 a fondé son 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:

- 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 prennent quant à eux cet arbitrage en compte explicitement.

Les critères d'information Akaike (AIC) et le critère d'information bayésien (BIC) comptent parmi les critères 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.

D'après la figure ci-dessous, nous pouvons conclure que le modèle translog performe mieux que le modèle log-log selon les critères AIC et BIC.

En revanche, l'AIC et le BIC calculés pour les modèles en log-log et translog (tels qu'ils nous ont été rapportés) ne sont pas comparables à ceux calculés pour les modèles linéaires et Box-Cox parce que leur variable dépendante est transformée différemment.

Figure 8 Log-vraisemblance et critères d'information Akaike et bayésien

| | Linéaire | Log-Log | Translog* | Box-Cox |
|-------------------|------------|------------|-----------|------------|
| Log-vraisemblance | -1,094,340 | -1 086 634 | 29,605 | -1,081,409 |
| AIC | 2,188,703 | 2,173,292 | -59,184 | 2,162,821 |
| BIC | 2,188,818 | 2,173,406 | -59,060 | 2,162,840 |

Source: 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.*

- 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. Nous notons que le problème de sur-spécification intervient lorsque la spécification est trop complexe par rapport à la taille de l'échantillon. Nous considérons que ce risque est faible ici compte tenu de la taille de l'échantillon.

5.4 Stabilité des résultats entre les modèles

SNCF Réseau et les services de l'Arafer ont estimé des régressions supplémentaires qui permettent de comparer les résultats du modèle en Box-Cox avec des spécifications alternatives. Nous analysons ces résultats dans la suite de cette partie.

Les résultats présentent quelques différences.

- Pour les sections de voie, les formes fonctionnelles Box-Cox et log-log aboutissent à un coût marginal très similaire (1,52 €/kTBC-km). Le modèle linéaire pointe vers un coût marginal inférieur (1,23 €/kTBC-km). Le modèle translog suggère un coût marginal légèrement supérieur (1,60 €/kTBC-km).
- Pour les AdV, les formes fonctionnelles Box-Cox, linéaire et translog aboutissent à un coût marginal très similaire (0,15-0,16 €/kTBC-km). Le modèle en log-log pointe vers un coût marginal inférieur (0,13 €/kTBC-km).

- Le modèle Box-Cox aboutit ainsi à un coût marginal total de 1,67 €. En utilisant un modèle linéaire, logarithmique ou translog, le coût marginal s'inscrirait dans la fourchette de 1,39 à 1,75 €/kTBC-km.

Figure 9 Coût marginal (en €2012/kTBC-km) par modèle

| | Linéaire | Log-Log | Translog | Box-Cox |
|------------------|----------|---------|----------|---------|
| Sections de voie | 1.23 | 1.52 | 1.60 | 1.52 |
| AdV | 0.16 | 0.13 | 0.15 | 0.15 |
| Total | 1.39 | 1.65 | 1.75 | 1.67 |

Source: ARAFER

Comme mentionné ci-dessus, SNCF Réseau souligne que les modèles en translog peuvent présenter certains inconvénients comme la perte de degrés de libertés en raison du nombre de termes à estimer et des résultats contre-intuitifs. En particulier, dans une partie de la littérature sur les coûts ferroviaires, les modèles en translog ont abouti à des estimations de l'élasticité au trafic décroissantes avec celui-ci. Cependant, il semblerait que ceci n'est pas une préoccupation au cas d'espèce. De fait, le terme quadratique est positif et statistiquement significatif, indiquant une élasticité croissante avec le trafic.

Dans l'ensemble, les résultats fournis par le modèle Box-Cox ne sont pas sensiblement différents de ceux des autres modèles. Le coût marginal total du modèle en Box-Cox se situe entre le modèle en log-log et le modèle en translog.

On peut en déduire que les résultats de l'estimation en Box-Cox ne suggèrent pas que le coût marginal aurait été mal calibré (que ce soit à la hausse ou à la baisse) en utilisant des modèles plus simples. La similitude des résultats réduit le risque réglementaire de fixation d'un coût marginal significativement incorrect. Nous estimons donc qu'il est d'autant plus difficile de justifier le recours à une forme fonctionnelle complexe telle que Box-Cox.

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.

Test de validité des hypothèses

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 SNCF Réseau d'effectuer plusieurs tests des modèles, 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).

Nous pouvons tirer les conclusions suivantes des résultats des tests sur les modèles linéaires, log-log et translog tels que rapportés par les services de l'Arafer⁹, ainsi que des tests de multicolinéarité Belsley-Kuh-Welsch fournis par SNCF Réseau pour tous les modèles :

- De l'hétéroscédasticité est détectée 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.
- Le test de réinitialisation de Ramsey amène à conclure que des variables ont été omises dans tous les modèles testés par les services de l'Arafer (à noter que le test n'a pas été réalisé sur le modèle en Box-Cox).
- Le test de Belsley-Kuh-Welsch ne suggère pas de préoccupations de colinéarité pour les formes fonctionnelles linéaires et logarithmiques. Dans le modèle translog, nous n'observons pas de multicollinéarité au-delà de celle qui intervient par construction (entre la variable de trafic linéaire et la variable de trafic quadratique par exemple). Les résultats pour le modèle en Box-Cox n'indiquent pas de problèmes potentiels de multicollinéarité.
- La répartition des résidus est asymétrique et sa platitude (mesurée par le Kurtosis) ne correspond pas à celle d'une distribution normale pour les modèles (ceci n'a pas été évalué pour le modèle Box-Cox). Ceci indique que les erreurs ne sont pas normalement distribuées.

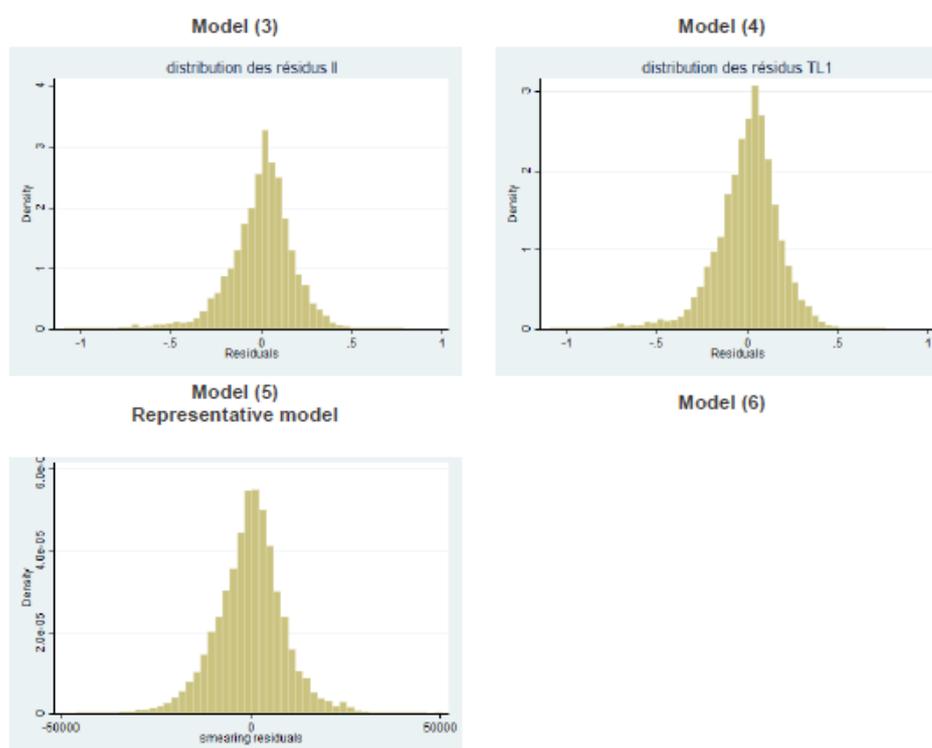
Nous notons que le non-respect des hypothèses énoncées plus haut peut être dû à des problématiques d'ordre économétrique ou bien aux caractéristiques des données sous-jacentes. Dans ce deuxième cas de figure, il se peut qu'aucune forme fonctionnelle ou spécification de modèle ne permette de respecter les hypothèses. Pour cette raison, le non-respect des hypothèses ne doit pas empêcher de poursuivre les analyses d'un modèle, 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.

⁹ Les services de l'Arafer n'ont pas pu réaliser les tests pour les régressions en Box-Cox. Les conclusions concernent uniquement les modèles linéaires, log-log et translog.

Analyse qualitative graphique

Étant donné que les tests ne pointent pas vers l'un des modèles en particulier, les hypothèses ne semblent être valides pour aucun des modèles testés, nous nous tournons vers une comparaison plus qualitative des fonctions de densité des résidus, à partir des représentations graphiques ci-dessous, transmises par SNCF Réseau.

Figure 10 Distribution des résidus pour le modèle en log-log (model 3), translog (model 4) et Box-Cox (model 5)



Source: SNCF Réseau

Les graphiques pour les modèles 3-4-5 suggèrent des performances similaires des modèles (évaluées qualitativement). Dans l'ensemble, le non-respect de l'hypothèse de normalité des résidus ne semble pas si tranché que les tests peuvent suggérer. On note que la spécification Box-Cox semble afficher des queues de distribution plus normales.

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, 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 ces modèles, 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.

Ainsi, nous considérons que des modèles simples peuvent être préférés aux modèles Box-Cox en présence d'invalidité des hypothèses des modèles parce que ceux-ci peuvent être 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-Cox¹⁰.

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 (λ et θ) 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 notons que, si nous considérons que cet exercice est valable, il n'a pas été possible de le mettre en œuvre compte tenu de sa complexité technique et des délais courts disponibles.

¹⁰ Par exemple, les estimations par les moindres carrés pondérés (WLS), fréquemment utilisées dans la littérature, permettent de traiter certains problèmes d'hétéroscédasticité.

Sensibilité à l'inclusion de la variable longueur

SNCF Réseau a décidé de tenir compte de l'influence de la longueur de la voie sur les coûts totaux de renouvellement 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 longueur¹¹. Ce choix diffère de l'approche retenue dans une grande partie de la littérature, et cela 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 conseillers pour ce choix est que la segmentation est strictement technique (elle est définie de sorte à ce que chaque segment soit homogène en terme d'armement). SNCF Réseau s'attend donc à ce que la longueur des tronçons n'influence pas les coûts unitaires par kilomètre.

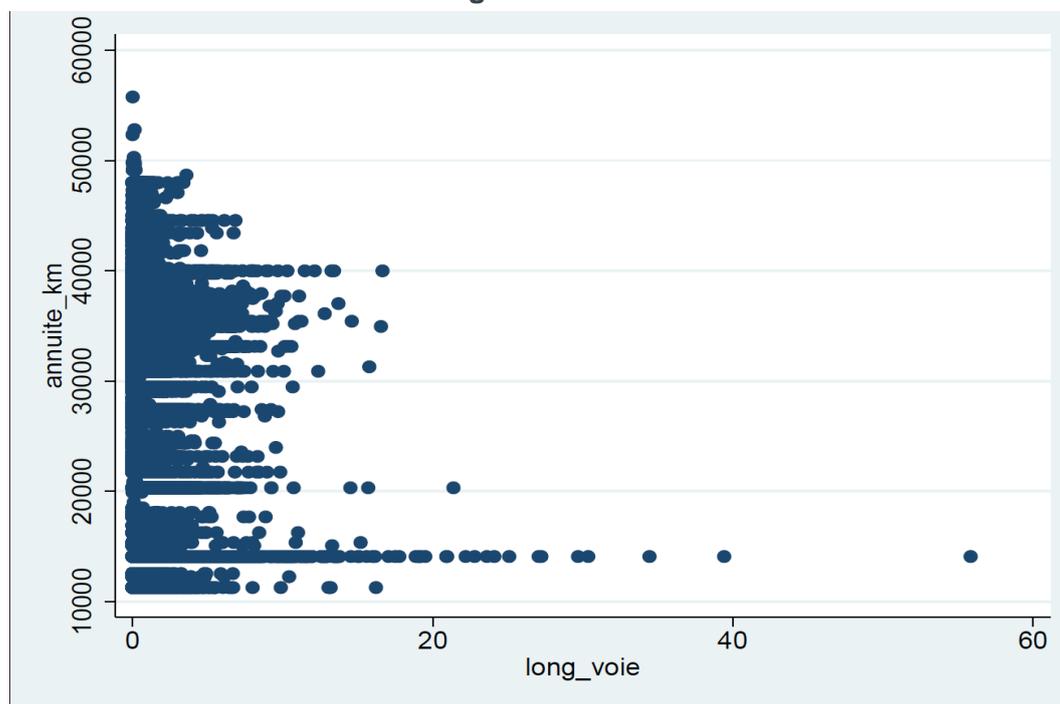
Nous estimons néanmoins qu'il convient de vérifier le caractère strictement proportionnel de la relation entre les coûts et la longueur dans les données. En effet, nous considérons concevable que les coûts par kilomètre ne soient au cas d'espèce pas constants avec la longueur de la section. (Par exemple, la longueur de section à travers le réseau aurait pu influencer la conception de l'outil STR et donc indirectement les annuités de régénération. SNCF Réseau a précisé dans le cadre de l'étude que ce n'est pas le cas dans l'outil utilisé pour construire les chroniques de renouvellement.

Des éléments empiriques peuvent également permettre d'appréhender la relation entre la longueur et le coût:

- 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. Dans le graphique ci-dessous, il est également possible d'examiner la dispersion des coûts pour différentes longueurs de segments de voie. Si la dispersion n'est pas uniforme, elle peut suggérer que le fait de ne pas inclure la longueur dans la régression peut conduire à un biais d'omission de variable. Nous considérons que le graphique ci-dessous ne pointe pas de façon univoque vers des rendements d'échelle non-constants.

¹¹ Cette approche équivaut en effet à introduire la longueur sous la forme d'une variable explicative, mais en forçant la fixation du coefficient de régression à 1 pour cette variable.

Figure 11 Diagramme de dispersion des coûts par km de section de voie en fonction de la longueur des voies



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 est statistiquement significative pour les modèles log-log, translog et Box-Cox¹². Cependant, la variable n'est pas statistiquement significative dans le modèle linéaire. Enfin, l'inclusion de la longueur de section comme variable explicative ne modifie pas de façon significative l'élasticité au trafic et le coût marginal et ce pour tous les modèles.

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

5.7 Conclusion et recommandation

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 de 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:

¹² Pour le modèle en Box-Cox, la significativité est évaluée pour l'inclusion de la variable dans sa forme originale, c'est-à-dire sans y appliquer une transformation Box-Cox.

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, la prévalence de valeurs nulles ne constitue pas un problème dans le cas présent, étant donné les caractéristiques des données (aucune valeur nulle en dehors des variables dichotomiques).

En revanche, les données semblent bien présenter une relation non linéaire entre les coûts et le 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 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-intuitifs¹³. De plus, la forme fonctionnelle translog présente des avantages 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 plus simples 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) et que les modèles logarithmiques au regard des critères d'informations AIC et BIC (ils ne peuvent être comparées à cet égard au modèle translog).

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.

¹³ En particulier on ne trouve pas le résultat problématique d'une décroissance de l'élasticité au trafic avec le trafic.

Par ailleurs, des modèles plus simples tels que les modèles en log-log ou 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 eux, 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.

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

Recommandation

Pour ces raisons, nous ne recommandons pas l'utilisation de la forme fonctionnelle Box-Cox comme modèle central pour estimer le coût marginal de renouvellement. Au contraire, nous privilégions l'utilisation de modèles plus simples tels que les formes fonctionnelles log-log et translog.

Enfin, nous réitérons que le modèle en Box-Cox peut fournir, lors de l'actualisation des estimations en vue des prochains exercices tarifaires, un contrôle de cohérence 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 éloigné 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 de renouvellement pour l'ensemble du réseau ou, alternativement, d'estimer séparément les coûts marginaux pour différentes parties du réseau en séparant l'échantillon

6.1 Principes

Dans cette partie nous exposons les considérations générales qui ont guidé 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 marginal¹⁴. 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 de 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.

¹⁴ Dans le projet de DRR 2018 du 9 décembre 2016, SNCF Réseau explique que « (pour les sections du réseau appartenant aux groupes UIC 7 à 9, le coût marginal de renouvellement est fixé à 0. » Cette décision relève d'un arbitrage lié aux modalités de financement des dépenses encourues sur les segments de voie correspondants. Nous considérons que cette décision ne justifie pas en soi une séparation des données dans les analyses économétriques..

- 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 de renouvellement.

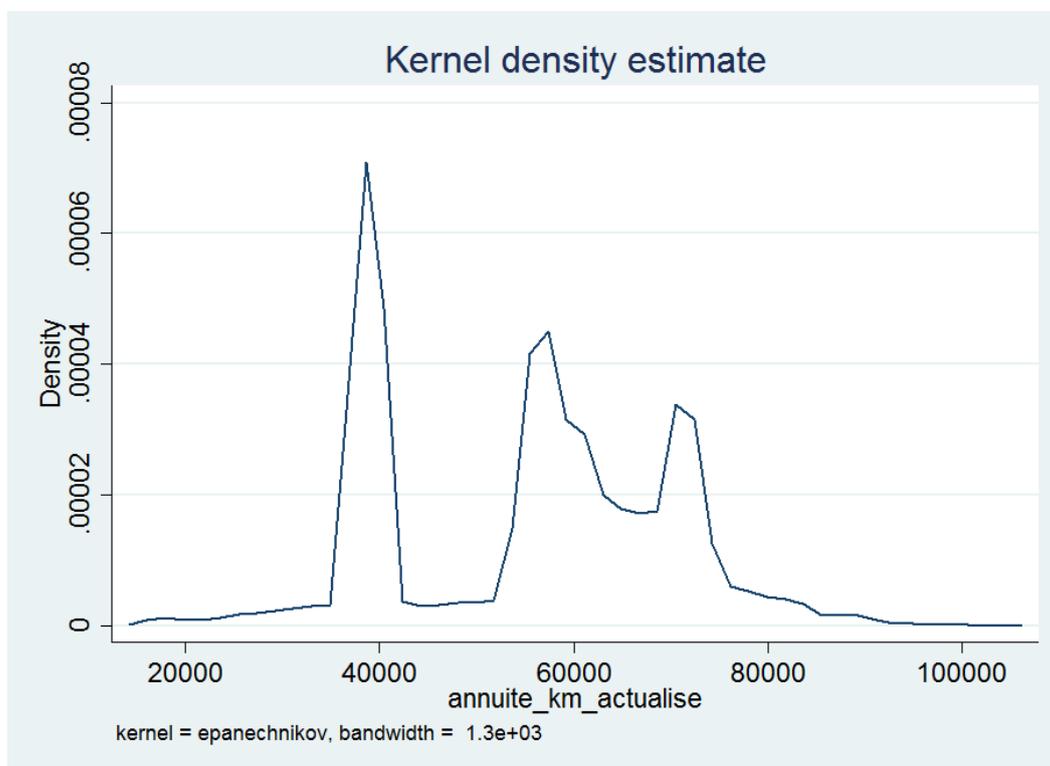
6.2 Comprendre la relation *a priori* entre UIC, trafic et coûts

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 12 présente une estimation à noyau de la densité de la distribution des coûts de renouvellement. La répartition est tri-modale, ce qui laisse supposer que les sections de voie peuvent avoir des profils de coûts substantiellement différents au sein de l'échantillon, soulevant la question suivante: les variables explicatives du modèle choisi peuvent-elles expliquer cette variation? Si non, la distribution suggérerait qu'il est nécessaire de distinguer entre sous-réseaux, chacun ayant une relation différente entre le trafic et les coûts.

Figure 12 Estimation à noyaux de la densité de l'annuité de coûts de renouvellement

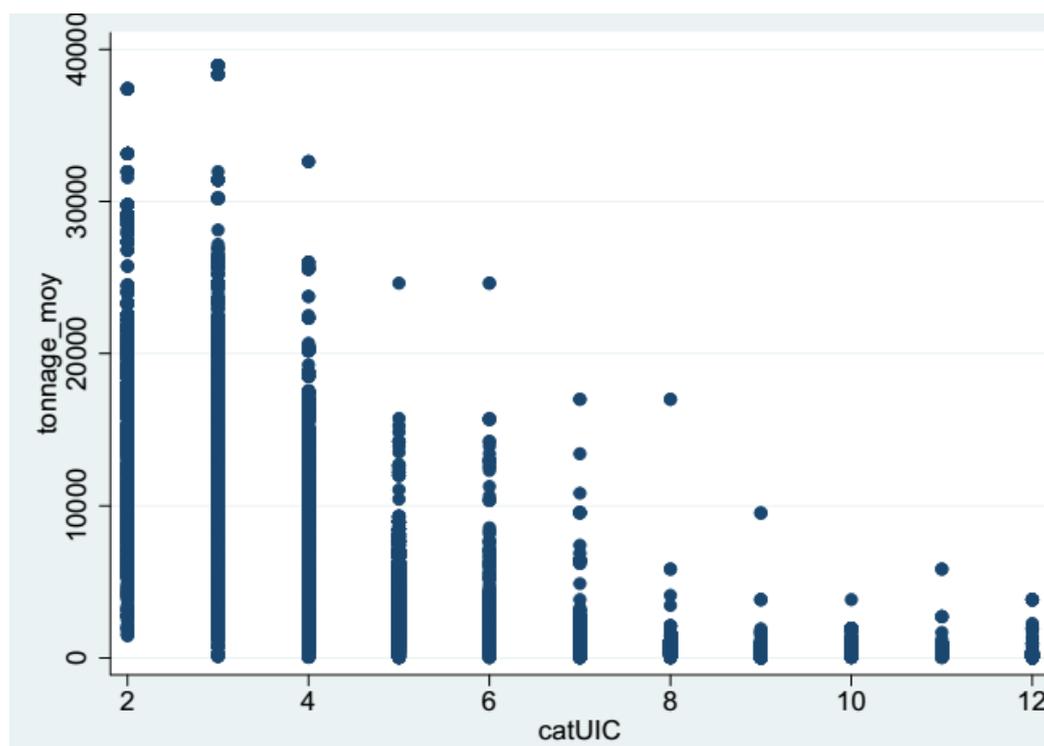


Source: Services de l'Arafer

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 13 Trafic journalier (en tonnes brutes déclarées) par UIC



Le modèle désagrégé ne serait pas approprié si les sous-échantillons n'affichaient qu'une variabilité limitée en termes de niveaux de trafic. Nous notons qu'il existe une variabilité suffisante des niveaux de trafic au sein de plusieurs sous-groupes UIC, et a fortiori au sein des UIC 2-6.

6.2.3 UICs et coûts

Les données de coûts de renouvellement sont simulées en suivant les règles de l'outil STR.

Dans l'outil STR, les règles de renouvellement dépendent d'un critère UIC. Les segments des UIC 1 à 4 sont traités de façon uniforme. Les segments des UIC 5 à 6 suivent quant à eux une autre politique de renouvellement. L'outil STR ne fait pas référence aux UIC 7 à 9. Nous comprenons que les UIC 7 à 9 seront traités de la même manière que l'UIC 6 et par conséquent, que l'UIC 5 également.

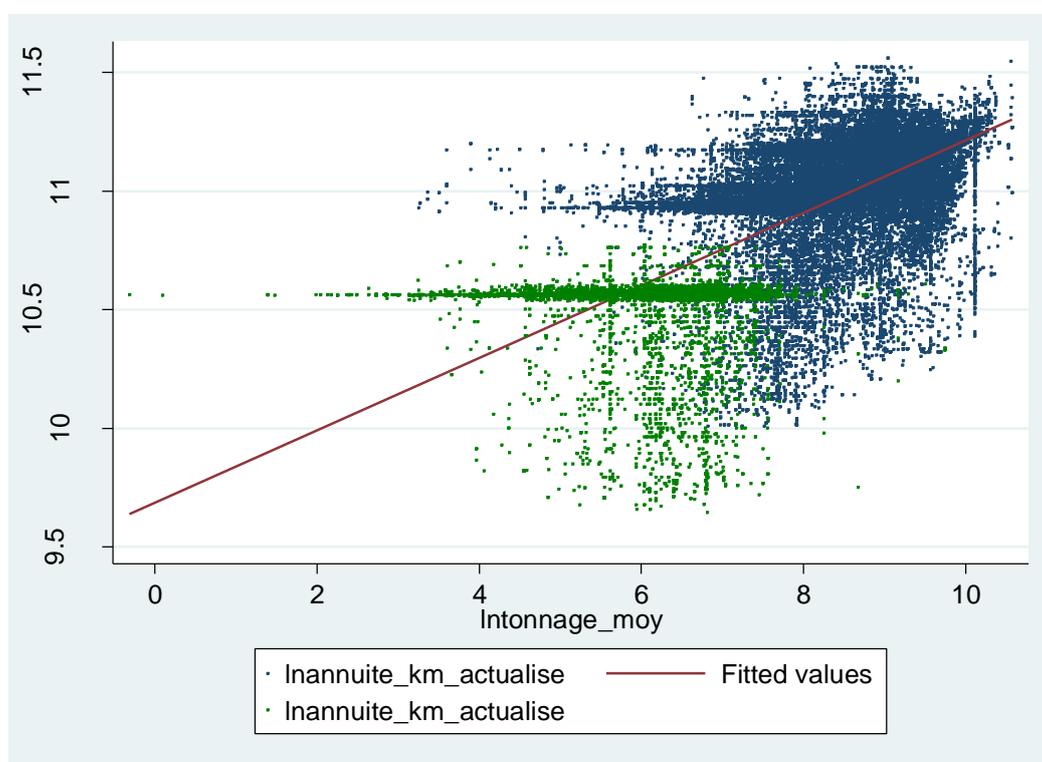
Nous notons enfin que l'outil STR ne fait pas explicitement référence au trafic réel comme déterminant des programmes et dépenses de renouvellement, d'après les informations qui nous ont été transmises. Il est donc probable qu'une relation de causalité relie le trafic aux coûts de renouvellement, mais que cette

relation de causalité peut être observée dans le cadre STR principalement via un effet de second ordre à travers la variable intermédiaire UIC. Cependant, étant donné que les catégories UIC sont basées sur le trafic fictif et non sur le trafic réel, l'influence du trafic sur le coût serait le résultat combiné de l'influence du trafic réel sur le trafic fictif d'abord, puis du trafic fictif sur les coûts de renouvellement.

6.3 Représentations graphiques

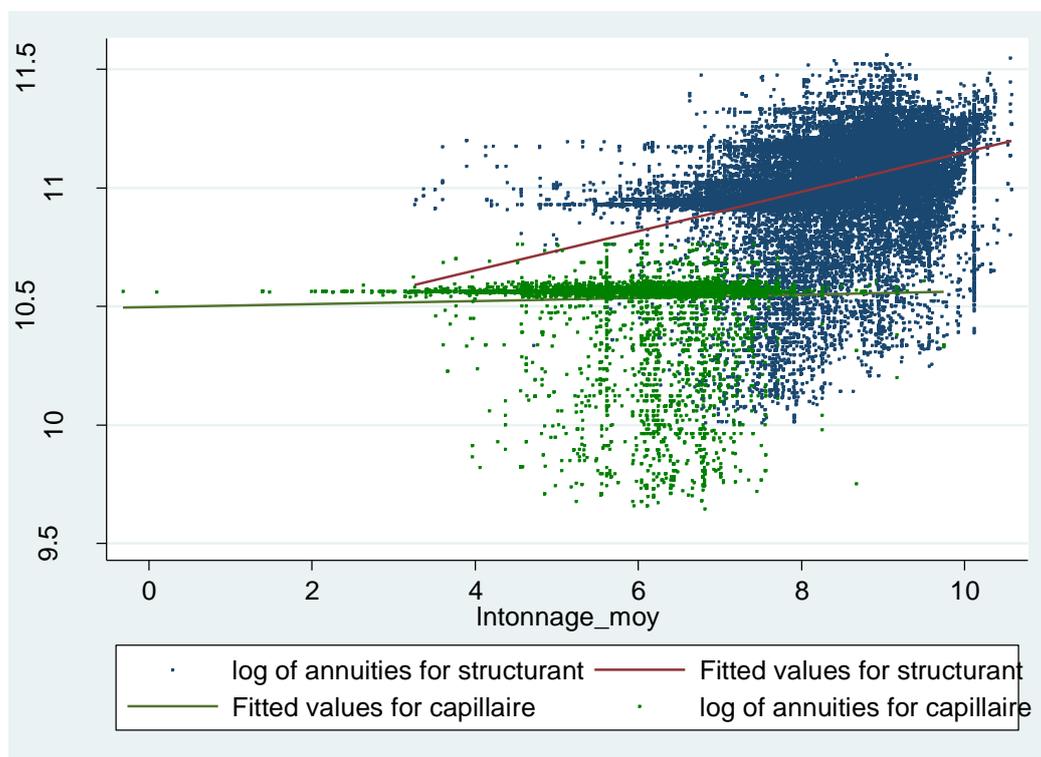
Dans cette partie nous étudions si la visualisation graphique de l'ensemble des données semble justifier une distinction entre sous-réseaux.

Figure 14 Annuités de renouvellement au km en fonction du trafic sur les UIC 2-6 (bleu) et 7-9 (vert)



Source: Services de l'ARAFER

Figure 15 Annuités de renouvellement au km en fonction du trafic sur les UIC 2-6 (bleu) et 7-9 (vert)



Source: Services de l'ARAFER

- Les observations pour les UIC 2-6 (bleu) et les UIC 7-9 (vert) semblent suivre des tendances différentes. Premièrement, le niveau des coûts est plus bas pour les UIC 7-9. Deuxièmement, le degré de corrélation entre coût et trafic apparaît plus fort dans les catégories UIC 2-6.
- Alors que le réseau «structurant» (UIC 2-6) et le réseau «capillaire» (UIC 7-9) se chevauchent sur la dimension trafic, il y a très peu de chevauchement entre les points verts et bleus sur la dimension coûts.
- Visuellement, la ligne de régression qui est positionnée sur l'ensemble de l'échantillon semble ne pas convenir aux points verts. En revanche, elle ne semble pas nécessairement inadaptée aux points bleus. Lorsque des lignes de régressions sont estimées pour les sous-réseaux, on observe une ligne très différente pour le réseau capillaire de celle tracée pour l'ensemble du réseau. Cette ligne est pratiquement horizontale, indiquant une très faible corrélation des annuités de renouvellement avec le trafic. La ligne de régression ajustée au réseau structurant est également légèrement moins pentue mais la différence avec la ligne de régression de l'ensemble du réseau est moins marquée.

Ces observations graphiques suggèrent que la relation entre les coûts de trafic et de renouvellement est différente pour les deux sous-réseaux. Toutefois, il faut faire preuve de prudence à l'encontre des conclusions tirées de ces observations. La différence observée dans les corrélations des variables n'implique pas nécessairement une différence dans la relation causale entre le trafic et le coût.

6.4 Résultats économétriques

MISE EN ŒUVRE DE LA DESAGREGATION

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 testé 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 explicatives¹⁵.

6.4.1 Résultats des services de l'Arafer

Les services de l'Arafer ont étudié l'impact de la désagrégation sur les coûts marginaux de renouvellement. Des modèles en Box-Cox et en log-log ont été estimés. Il n'a pas été possible d'exécuter un modèle en Box-Cox pour le réseau capillaire en raison d'une non-convergence.

Les résultats sont les suivants:

Figure 16 Coût marginal estimé (€/kTBC-km)

| | | Réseau entier | Structurant | Capillaire |
|-----------------|---------|---------------|-------------|-----------------|
| Section de voie | Box-Cox | 1.524 | 0.618 | Non-convergence |
| | Log-Log | 1.527 | 0.596 | 0.329 |
| AdV | Box-Cox | 0.248 | 0.229 | 0.572 |

Source: Services de l'ARAFER

Figure 17 Elasticité au trafic estimée

| | | Réseau entier | Structurant | Capillaire |
|-----------------|---------|---------------|-------------|-----------------|
| Section de voie | Box-Cox | 0.145 | 0.073 | Non-convergence |
| | Log-log | 0.137 | 0.068 | 0.05 |
| AdV | Box-Cox | 0.055 | 0.067 | 0.014 |

Source: Services de l'ARAFER

Pour les AdV, le résultat de l'estimation pour l'ensemble du réseau se situe entre les résultats des estimations pour le réseau structurant et capillaire. Étant donné

¹⁵ 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.

que le réseau structurant affiche un niveau de trafic moyen, l'estimation moyenne pondérée entre les deux sous-réseaux peut ne pas être sensiblement différente de celle de l'ensemble du réseau.

Dans le cas des sections de voie, l'estimation pour le réseau entier donne un résultat beaucoup plus élevé que pour les deux sous-réseaux. L'écart entre les résultats agrégés et désagrégés du modèle est cohérent avec la répartition graphique des données ci-dessus.

Cependant, sur la base du graphique, un coût marginal significativement inférieur pouvait être attendu pour le réseau capillaire, mais pas nécessairement pour le réseau structurant (la ligne de régression ajustée dans le graphique ne semble pas très différente de la ligne obtenue pour les points bleus seulement).

6.4.2 Résultats de SNCF Réseau

SNCF Réseau a estimé le modèle Box-Cox pour les coûts de renouvellement afin de tester la possibilité d'une distinction entre les groupes d'UIC. Les modèles suivants sont présentés:

- Séparément pour les groupes UIC 2-6 (modèle 6 dans les résultats ci-dessous),
- Avec une variable dichotomique pour les groupes UIC 2 à 6 (modèle 7 dans les résultats ci-dessous),
- Avec une variable dichotomique pour les groupes UIC 2 à 5. Le raisonnement derrière ce choix de séparation est d'utiliser une variable dichotomique plus en ligne avec les hypothèses de renouvellement que nous avons utilisées (modèle 8 dans les résultats ci-dessous),
- Avec trois variables dichotomiques basées sur l'agrégation des groupes UIC (2-4, 5-6, 7-9AV). STATA n'a pas été en mesure d'estimer ce modèle,
- Avec des termes d'interaction entre la variable dichotomique du groupe UIC 2 à 6 et le trafic. STATA n'a pas été en mesure d'estimer ce modèle,
- Avec des termes d'interaction entre les variables dichotomiques des groupes UIC (chaque groupe indépendamment) et le trafic. STATA n'a pas pu estimer ce modèle.

Figure 18 Analyse de désagrégation par SNCF Réseau (1/2)

| | Level-level | Level-level with UIC dummies | Log-log | Translog - log(traffic) ² |
|--------------------------------------|--------------------|------------------------------|--------------------|--------------------------------------|
| | (1) | (2) | (3) | (4) |
| Sample | UIC 2-9 | UIC 2-9 | UIC 2-9 | UIC 2-9 |
| Box-Cox parameters | | | | |
| Lambda | 1 | 1 | 0 | 0 |
| Thêta | 1 | 1 | 0 | 0 |
| Coefficients | | | | |
| Transformed variables | | | | |
| Tonnage (TBC) | 1,234*** | 1462916*** | 0,137*** | 0,0375*** |
| Tonnage (TBC) x Tonnage (TBC) | - | - | - | 0,00680*** |
| Non transformed variables | | | | |
| Rail category 1 | 2723.5*** | 1593.23*** | 0.0356*** | 0.0223*** |
| Rail category 3 | -9032.4*** | -2991.813*** | -0.133*** | -0.133*** |
| Rail category 4 | -11571.3*** | -2712.919*** | -0.123*** | -0.133*** |
| Dummy for Long welded rail | 2764.8*** | -200.2733*** | -0.0169*** | -0.0140*** |
| Sleeper category 1 | 3180.7*** | 2300.062*** | 0.0545*** | 0.0575*** |
| Sleeper category 2 | 7475.2*** | 4337.908*** | 0.130*** | 0.132*** |
| Sleeper category 3 | 5863.4*** | 3848.054*** | 0.0979*** | 0.0953*** |
| Sleeper category 5 | 5011.9*** | 2447.743*** | 0.0779*** | 0.0774*** |
| Sleeper category 6 | 4855.6*** | 3223.721*** | 0.105*** | 0.105*** |
| Dense area | 1927.9*** | -1278.505*** | 0.0113*** | 0.00890*** |
| UIC 3 | - | -778.0582*** | - | - |
| UIC 4 | - | 1797.18*** | - | - |
| UIC 5 | - | -6918.821*** | - | - |
| UIC 6 | - | -11901.54*** | - | - |
| UIC 7AV | - | -26582.75*** | - | - |
| UIC 8AV | - | -26238.02*** | - | - |
| UIC 9AV | - | -26732*** | - | - |
| UIC 7SV | - | -26608.27*** | - | - |
| UIC 8SV | - | -27091.46*** | - | - |
| UIC 9SV | - | -26091.6*** | - | - |
| Constant | 45318.0*** | 64023.7*** | 9.781*** | 10.14*** |
| Log-vraisemblance | - 1 094 340 | -1 058 660 | - 1 086 634 | (*) |
| Marginal cost (€2012/kTBC-km) | 1.234 | 0.146 | 1.527 | 1.632 |
| Elasticity | 0.192 | 0.023 | 0.137 | 0.160 |

(*) : though STATA did estimate the model without any difficulty, we got issues to get the log-likelihood value.

Source: SNCF Réseau

Figure 19 Analyse de désagrégation par SNCF Réseau (2/2)

| | Represent. model | Represent. model Sample : UIC 2-6 only | Represent. model + dummy 2-6 | Represent. model + dummy 2-5 |
|--|---------------------|---|---------------------------------------|---------------------------------------|
| | (5) | (6) | (7) | (8) |
| Sample | UIC 2-9 | UIC 2-6 | UIC 2-9 | UIC 2-9 |
| Paramètres | | | | |
| Lambda | 0.0920*** | 0.0999** | 0.373*** | 0.0339* |
| Thêta | 0.833*** | 1.508*** | 0.618*** | 0.853*** |
| Coefficients des variables explicatives | | | | |
| Variable transformée | | | | |
| Tonnage (TBC) | 591.4*** | 518220.9*** | 2.532*** | 632.4*** |
| Variables non transformées | | | | |
| Rail category 1 | 262.7*** | 810775.2*** | 43.71*** | 281.8*** |
| Rail category 3 | -989.9*** | -2154849.5*** | -67.35*** | -874.1*** |
| Rail category 4 | -846.7*** | -1515638.8*** | -45.99*** | -910.0*** |
| Dummy for Long welded rail | -114.1*** | -92751.5*** | -13.55*** | -30.72*** |
| Sleeper category 1 | 410.5*** | 665279.9*** | 29.88*** | 550.7*** |
| Sleeper category 2 | 982.7*** | 1405586.8*** | 68.29*** | 1153.9*** |
| Sleeper category 3 | 815*** | 1470353.3*** | 75.78*** | 871*** |
| Sleeper category 5 | 665.2*** | 1010244.7*** | 45.61*** | 716.6*** |
| Sleeper category 6 | 813.3*** | 1286785.1*** | 57.82*** | 862.2*** |
| Dense area | 40.57*** | -272372.8*** | -8.43*** | -108.1*** |
| Dummy UIC 2-6 | - | - | 258.6*** | - |
| Dummy UIC 2-5 | - | - | - | 2405.6*** |
| Constante | 3597.5*** | 3958424.3*** | 1008.8*** | 0.0339* |
| Log-vraisemblance | - 1 081 409 | - 764 864 | - 1 066 944 | - 1 073 046 |
| Marginal cost (€2012/kTBC-km) | 1.524 | 0.618 | 0.717 | 0.825 |
| Elasticity | 0.134 | 0.075 | 0.082 | 0.069 |

Some additional comments on the results:

- + All the models performed on the whole sample without any UIC dummies show close results, with marginal costs above 1.200 €/kTBC-km.
- + The four models (2), (6), (7) and (8), with uic dummies or for which we reduced the sample give different results with lower marginal costs. These models lead to elasticity that does not seem to be in line with expert judgement about renewal elasticity (too low) nor with the literature (see below).

Source: SNCF Réseau

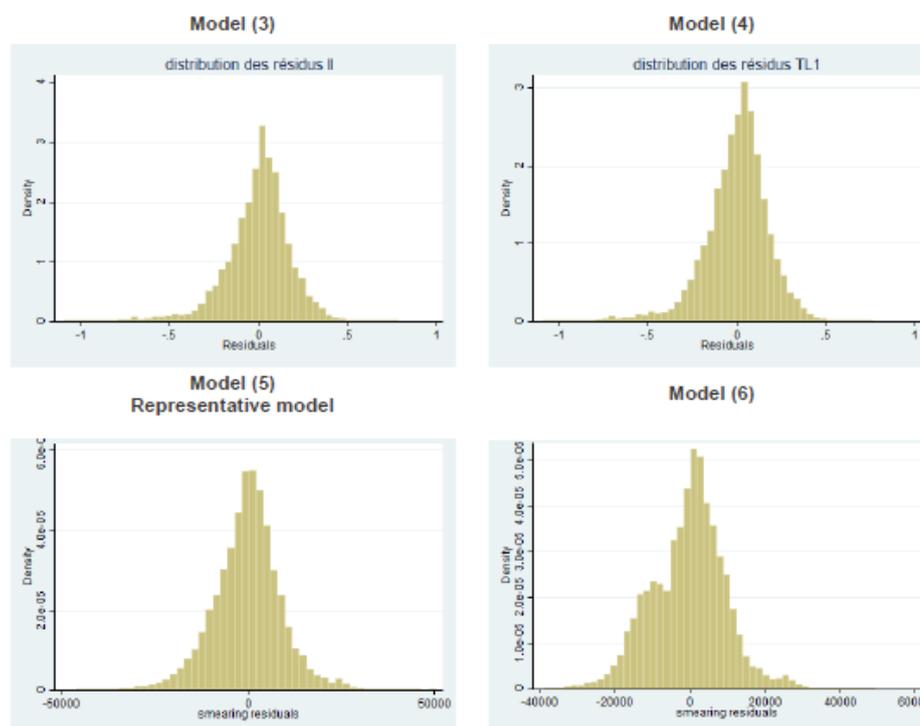
La significativité statistique de la variable dichotomique UIC 2-6 dans le modèle 7 et de la variable dichotomique UIC 2-5 dans le modèle 8 confirment l'hypothèse selon laquelle l'estimation du modèle sur l'ensemble de l'échantillon de données risque de mal refléter la relation entre le trafic et les coûts des différents groupes UIC. Cependant, les résultats des modèles 7 et 8 présentés par SNCF Réseau ne permettent pas de déduire des estimations d'élasticité et de coût marginal pour les sous-réseaux. La valeur du coût marginal présentée au bas du tableau correspond en effet au coût marginal moyen sur l'ensemble du réseau.

A partir des résultats du modèle 6 en revanche, on obtient un coût marginal, estimé séparément sur le réseau structurant ; celui-ci est nettement inférieur à celui estimé sur l'ensemble du réseau. Ceci est cohérent avec les conclusions tirées du diagramme de dispersion ci-dessus. Les résultats confirment en effet que la relation entre le coût et le trafic pourrait être différente pour les sections

des catégories UIC 2-6 par rapport aux sections des catégories UIC 7-9. Cependant, l'ampleur de la différence est inattendue.

En outre, nous notons que SNCF Réseau a produit des histogrammes des résidus pour les modèles désagrégés. Ces graphiques suggèrent que les résidus ne sont pas distribués normalement¹⁶. Le modèle 6 présente en outre une asymétrie marquée et une potentielle multimodalité, signalant un non-respect clair de l'hypothèse de normalité.

Figure 20 Représentation graphique des résidus



Source: SNCF Réseau

Comme le souligne SNCF Réseau, STATA n'a pas pu estimer d'autres spécifications. Il s'agit d'un inconvénient de la spécification Box-Cox qui empêche de formuler une conclusion définitive sur ce point.

6.5 Conclusion

Nous présentons ici nos recommandations sur la question de la désagrégation du réseau pour les coûts de renouvellement en suivant les principes énoncés en introduction.

Tout d'abord, il semble y avoir des différences sous-jacentes claires dans la relation entre le coût et le trafic en fonction du type de réseau. Cette observation s'appuie sur deux éléments:

¹⁶ Par rapport à une distribution normale, diminution rapide vers les queues de distribution et donc moindre présence d'une portion concave concentrant la majorité des observations.

- En termes pratiques, les règles de l'outil STR indiquent que les politiques de renouvellement diffèrent entre les UIC 2-4 et les UIC 5-6 (voir **Error! Reference source not found.**).
- La répartition graphique des données montrent des profils nettement différents dans la relation entre le coût et le trafic pour le réseau structurant et le réseau capillaire.

Nous notons que les politiques de renouvellement de SNCF Réseau jettent quelques doutes sur le fait que le fractionnement de l'échantillon entre les UIC 2-6 d'une part et les UIC 7-9 d'autre part serait nécessairement l'approche appropriée pour refléter ces variations dans l'estimation du coût marginal. En particulier, il est possible que la répartition la plus appropriée de l'échantillon soit comprise entre les UIC 2-4 et les UIC 5-9.

Deuxièmement, il n'est pas évident qu'il soit possible d'estimer de façon fiable un modèle désagrégé. En particulier, l'échantillon correspondant aux catégories UIC 7-9 peut souffrir d'un nombre relativement faible d'observations et d'une fourchette plus étroite de niveaux de trafic.

Troisièmement, nous reconnaissons qu'il existe un risque que la classification des types de réseaux via les catégories UIC capte indirectement l'effet du trafic et affecte par conséquent l'estimation des coûts marginaux. Cependant, les données brutes suggèrent qu'il existe une différence sous-jacente dans les tendances observées au sein des sous-échantillons.

Quatrièmement, les résultats désagrégés sont considérablement plus faibles que la limite inférieure de ceux rapportés dans les revues de littérature de SNCF Réseau et des services de l'Arafer. Nous notons qu'il serait nécessaire de tester en profondeur les propriétés statistiques et de la plausibilité des résultats des modèles désagrégés fournis par les services de l'Arafer pour éclaircir ce point.

En plus des résultats des modèles désagrégés par sous-réseaux présentés plus haut dans cette section, les services de l'Arafer ont produit d'autres estimations basées sur la forme fonctionnelle translog. Les résultats sont présentés dans l'0. Ces estimations supplémentaires n'ont pas donné de résultats plausibles. En outre, les distributions de résidus et les tests de post-estimation suggèrent que les résultats de cette modélisation ne sont pas robustes.

Ainsi, une désagrégation des données sous forme de sous-échantillons semble pertinente ; cependant, les estimations actuelles du coût marginal dans chacun des sous-échantillons ne sont pas satisfaisantes. Nous recommandons de séparer l'échantillon uniquement si un modèle produisant des résultats satisfaisants pouvait être estimé. Par conséquent, nous ne recommandons pas à ce stade la mise en œuvre de la désagrégation du réseau.

RESULTATS ISSUS DES RECOMMANDATIONS DE FRONTIER ECONOMICS

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

Le coût marginal est estimé par le modèle translog (avec la variable quadratique de trafic), pour la voie et les appareils de voie. Il convient de noter que les coûts de renouvellement pour les LGV n'ont pas fait l'objet de nouvelles estimations.

Le modèle est estimé sur l'ensemble du réseau, sans distinction par sous-réseau. Le coût marginal est ensuite déduit selon la méthode de SNCF Réseau qui différencie entre les UIC 2 à 6, pour lesquelles le coût marginal retenu reflète les résultats de la modélisation, et les UIC 7 à 9, pour lesquelles un coût marginal de renouvellement nul est retenu comme expliqué dans le corps du rapport.

Les résultats font état d'une légère hausse 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 de renouvellement, en €2018/train-km | |
|------------------------------|---|-----------|
| | UIC 2 à 6 | UIC 7 à 9 |
| TAGV sur LC - US | 0.715 | 0.00 |
| TAGV sur LC - UM | 1.520 | 0.00 |
| TAGV sur LGV – US | 2.090 | |
| TAGV sur LGV – UM | 4.405 | |
| Autres trains grandes lignes | 1.001 | 0.00 |
| TER | 0.375 | 0.00 |
| TRANSILIEN | 0.785 | 0.00 |
| FRET | 1.775 | 0.00 |
| HLP Fret | 0.375 | 0.00 |

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 recommandations 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 stricte 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 de renouvellement 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 modèle¹⁷. Dans certains cas, un travail préalable de collecte des données correspondantes 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 tonne-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 pluri-annuelles, il conviendrait de prendre en compte la variation des prix des facteurs de production au fil du temps.

Données – variable dépendante

L'un des principaux inconvénients de la base de données pour les coûts de renouvellement est que les données ne sont pas réelles. En effet, les données

¹⁷ La pertinence de ces variables peut être limitée par les modalités actuelles de construction des chroniques de renouvellement. Il conviendrait donc en particulier de les intégrer en cas de modélisation à partir de données constatées ou d'évolution des règles de simulation.

sont le résultat d'une modélisation des coûts de renouvellement par l'outil STR en fonction des caractéristiques des sections de voie et des politiques de renouvellement de SNCF Réseau. Idéalement, la base de données contiendrait les coûts réels, car ceux-ci peuvent différer des prévisions du cadre STR. Ceci est également conforme avec les recommandations de la Commission Européenne¹⁸. Cependant, nous comprenons que ceci ne soit pas possible à court terme ; en revanche des évolutions de l'outil STR et de la simulation des données pourraient être bénéfiques. Par exemple, les règles de métier actuelles semblent se baser uniquement sur des catégories de trafic fictif. En effet les niveaux de coût de renouvellement montrent très peu de dispersion au sein des catégories d'UIC malgré le fait que certaines sections de voie ont des niveaux tout à fait différents de trafic réel. Si tel est le cas, l'intégration du trafic réel comme entrée dans l'outil STR améliorerait la mesure dans laquelle la base de données pourrait permettre de mesurer l'effet d'une variation de trafic.

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 2012 par kilotonne-km estimé par segment de voie et AdV, SNCF Réseau détermine (1) d'abord un coût marginal en euro 2012 par kilotonne-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 basée 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 2012 par kilotonne-km. Le coût marginal par kilotonne-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.

¹⁸ Règlement d'exécution (UE) 2015/909 de la Commission du 12 juin 2015 concernant les modalités de calcul du coût directement imputable à l'exploitation du service ferroviaire

- 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 2012 par kilotonne-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 2012 par kilotonne-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 juridictions.
- 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 kilotonnes-kilomètres et la vitesse (en définissant par exemple, et pour limiter la complexité des grilles tarifaires, des fourchettes de vitesse réelle).

ANNEXE A RESULTATS ADDITIONNELS POUR LES MODELES PAR SOUS-RESEAU

Résultats

Les figures ci-dessous présentent d'avantages d'estimations de coûts marginaux de renouvellement basées sur différentes séparations du réseau.

Figure 21 Estimations des coûts marginaux de renouvellement de la voie pour différents sous-réseaux

| Sous réseaux : | Observations | Coût marginal (€/kTBC-km) | Elasticité |
|----------------|--------------|---------------------------|------------|
| Réseau complet | 102526 | 1.629 | 0.144 |
| UIC 2-6 | 72664 | 0.6196 | 0.0695 |
| UIC 7-9 | 29862 | 0.3939 | 0.0068 |
| UIC 2-4 | 40669 | 0.0047 | -0.00003 |
| UIC 5-9 | 61857 | 3.771 | 0.1434 |
| UIC 5-6 | 31995 | 0.8971 | 0.047 |

Source: Services de l'Arafer

Figure 22 Estimation des couts marginaux de renouvellement des Adv pour différents sous-réseaux

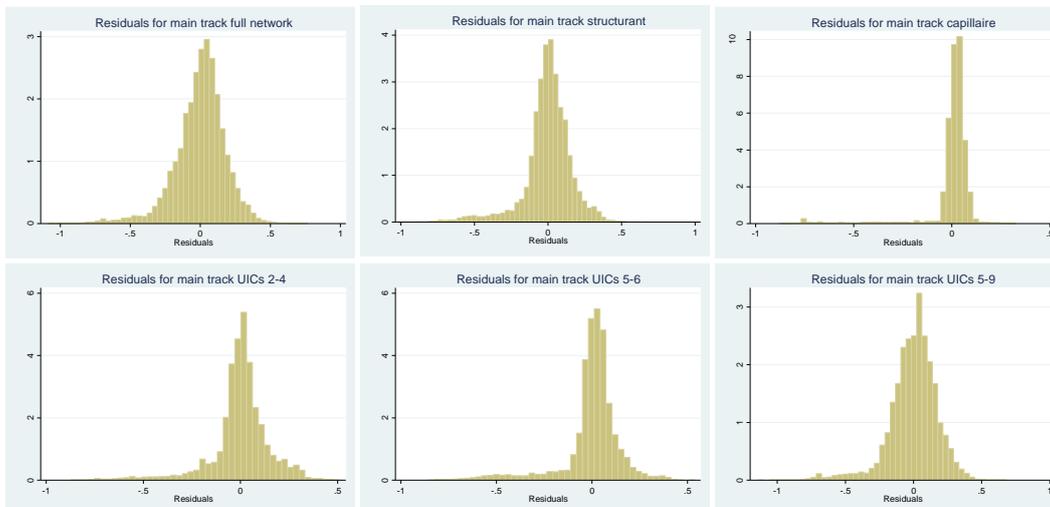
| Sous réseaux : | Observations | Coût marginal (€/kTBC-km) | Elasticité |
|----------------|--------------|---------------------------|------------|
| Réseau complet | 23499 | 0.1546 | 0.0655 |
| UIC 2-6 | 17422 | 0.1461 | 0.0797 |
| UIC 7-9 | 6077 | 0.3135 | 0.015 |
| UIC 2-4 | 10220 | 0.0751 | 0.0544 |
| UIC 5-9 | 13279 | 0.1529 | 0.0251 |
| UIC 5-6 | 7202 | 0.098 | 0.0265 |

Source: Services de l'Arafer

Résidus

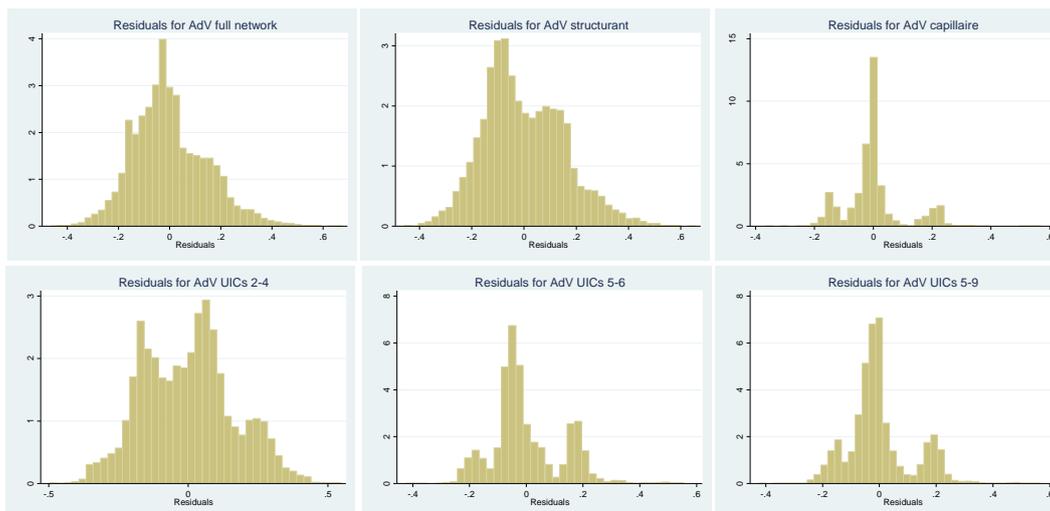
Les figures ci-dessous présentent la distribution des résidus de modèles des coûts de renouvellement pour différents sous-réseaux.

Figure 23 Distribution des résidus pour les modèles de coûts de renouvellement de la voie par sous-réseau



Source: *Serices de l'Arafer*

Figure 24 Distribution des résidus pour les modèles de coûts de renouvellement des AdV par sous-réseau



Source: *Services de l'Arafer*

ANNEXE B COEFFICIENT DE VARIATION PAR UIC

La figure ci-dessous présente le coefficient de variation des valeurs de coûts et de trafic au sein d'un UIC. Le coefficient de variation est défini par le ratio de l'écart type à la moyenne.

La figure montre que la dispersion des coûts au sein d'une catégorie UIC est très limitée. En revanche, la dispersion du trafic est considérablement plus large. Ces résultats suggèrent que le trafic réel joue un rôle limité dans l'estimation des coûts de renouvellement au sein de l'aoutil STR.

Figure 25 Coefficients de variation des coûts de renouvellement et des du trafic par UIC

| UIC | Coefficient de variation | |
|-----|--------------------------|--------|
| | Coûts | Trafic |
| 2 | 10.5% | 40.2% |
| 3 | 8.7% | 42.2% |
| 4 | 14.2% | 47.2% |
| 6 | 9.5% | 49.1% |
| 7AV | 9.1% | 52.4% |
| 7SV | 9.0% | 55.6% |
| 8AV | 9.2% | 54.8% |
| 8SV | 4.3% | 70.4% |
| 9AV | 9.1% | 74.5% |
| 9SV | 3.6% | 114.8% |

Source: Services de l'Arafer et Frontier Economics

