

Document de travail :

**Etude économétrique sur des
déterminants de la ponctualité des
trains de voyageurs en France
depuis 1954**

Alexandre Barbusse

FEVRIER 2022



AQST
AUTORITÉ
DE LA QUALITÉ DE SERVICE DANS LES TRANSPORTS

SOMMAIRE

1	INTRODUCTION	4
2	METHODOLOGIE	5
2.1	Démarche méthodologique et objectifs	5
2.2	Données utilisées	7
2.2.1	Données sur la ponctualité des services ferroviaires depuis 1954	7
2.2.2	Données sur les déterminants de la ponctualité	11
2.3	Forme des modèles statistiques testés et implications statistiques	35
2.3.1	Forme des modèles statistiques testés	35
2.3.2	Implications statistiques	36
3.	RESULTATS	37
3.1	Note de lecture des résultats des tests statistiques	37
3.2	Résultats de la modélisation statistique	40
3.2.1	Ponctualité des trains régionaux de province à 5 minutes :	40
3.2.2	Ponctualité des trains régionaux d'Ile-de-France à 5 minutes :	42
3.2.3	Ponctualité des trains Grandes Lignes à 15 minutes :	44
3.2.4	Ponctualité globale (pondérée du nombre de circulations par service)	50
3.2.5	Synthèse des résultats	53
4.	CONCLUSION	56
	ANNEXES	58
	Annexe 1 : Modèles de parc du matériel roulant utilisés	58
	Modèle de parc des locomotives électriques entre 1954 et 1983	58
	Modèle de parc des locomotives Diesel entre 1954 et 1983	59
	Modèle de parc des automotrices électriques entre 1954 et 1983	60
	Modèle de parc des automotrices thermiques (autorails) entre 1954 et 1983	61
	Modèle de parc des locotracteurs entre 1954 et 2008	62
	Modèle de parc des turbotrans thermiques entre 1970 et 1983	64
	Modèle de parc des voitures remorquées TER entre 1954 et 1983	65
	Modèle de parc des voitures remorquées Transilien entre 1954 et 1983	66
	Annexe 2 : Modèles de parc du réseau ferré utilisés	67

Modèle de parc des lignes ferroviaires du RFN entre 1954 et 1995	67
Modèle de parc des lignes des catégories UIC 2-4 entre 1954 et 1995	69
Modèle de parc des lignes des catégories UIC 5-6 entre 1954 et 1995	71
Modèle de parc des lignes des catégories UIC 7-9 (Avec Voyageurs) entre 1954 et 1995	73
Modèle de parc des lignes ferroviaires régionales d’Ile-de-France entre 1954 et 2019	75
Modèle de parc des LGV entre 1981et 1995	78
Annexe 3 : Résultats des modèles utilisés pour préciser l’effet de l’évolution des effectifs de la SNCF sur la ponctualité des trains depuis 1954	79
Modèle utilisant le niveau des effectifs 5 années auparavant	79
Modèle utilisant le niveau moyen des effectifs au cours des 5 années précédentes	79

1 INTRODUCTION

La présente étude interroge l'effet de l'évolution entre 1954 et 2019 de certains déterminants supposés de la ponctualité des trains (nombre de jours de grèves, volume des effectifs du transporteur, âge moyen du matériel roulant, âge moyen du réseau ferré, intensité d'utilisation des lignes ferroviaires, niveau du trafic en voyageurs-km) sur la ponctualité des trains par service en France.

D'après les données issues des mémentos statistiques de la SNCF, la ponctualité de l'ensemble des services ferroviaires s'est fortement dégradée depuis 1954 en France.

Afin d'apporter des éléments d'explications à ce constat, des séries chronologiques décrivant l'évolution des déterminants supposés de la ponctualité des trains ont été reconstituées à partir de données issues de différentes sources, et de modèles de parcs du matériel roulant et des infrastructures ferroviaires. Ensuite, des modèles statistiques ont été implémentés à l'aide du logiciel R pour tester la significativité statistique de l'impact de ces variables sur l'évolution de la ponctualité des trains en France par services entre 1954 et 2019.

2 METHODOLOGIE

2.1 Démarche méthodologique et objectifs

L'AQST s'est procurée des versions numériques des mémentos statistiques de la SNCF de 1955 à 2018¹. Ils contiennent des données annuelles sur la ponctualité des trains en France par services ferroviaires : trains Grandes Lignes, trains régionaux de province – correspondant aux actuels services TER - et trains de la banlieue de Paris et d'Ile-de-France, correspondant aux actuels services Transilien. En effectuant un travail d'harmonisation des seuils de retard à l'arrivée des trains à partir de données provenant de différentes sources, il a été possible de reconstituer l'évolution de la ponctualité des trains en France depuis 1954 :

- à 5 minutes pour les trains régionaux de province et pour les trains d'Ile-de-France ;
- à 15 minutes pour les trains Grandes Lignes.

Il apparaît que la ponctualité de l'ensemble des services ferroviaires s'est fortement dégradée depuis 1954 en France.

Dans le but de savoir si cette dégradation peut en partie s'expliquer par l'évolution de certains déterminants supposés de la ponctualité (comme l'âge moyen des voies ferroviaires par exemple) des données de séries chronologiques sur l'évolution de ces facteurs ont été récoltées à partir de différentes sources, et notamment des mémentos statistiques de la SNCF depuis 1955².

Les séries chronologiques portant sur l'âge moyen du matériel roulant et l'âge moyen des infrastructures depuis 1954 étaient parfois incomplètes car les données n'étaient pas renseignées dans les mémentos statistiques de la SNCF sur certaines périodes. Afin de compléter ces séries chronologiques, des modèles de parcs ont été réalisés pour fournir une estimation de l'évolution de l'âge moyen du matériel roulant ou des infrastructures ferroviaires lorsque les données réelles étaient manquantes. Ils ont été calibrés à partir des premières années où les données réelles étaient disponibles.

Ensuite, une approche graphique a permis de visualiser si les tendances d'évolution des séries chronologiques de la ponctualité depuis 1954 par service et des déterminants supposés de cette ponctualité étaient similaires ou manifestement différentes.

¹ Les mémentos statistiques de la SNCF numérisés depuis 1955 ont été récupérés grâce au travail de Maxime Gaillard, stagiaire à l'AQST en 2017

² Une partie des séries chronologiques regroupant les données contenues dans les mémentos statistiques de la SNCF sur divers déterminants supposés de la ponctualité ont été constituées par Sira SIBY, stagiaire à l'AQST en 2018

Enfin, des modèles économétriques simples ont été implémentés pour décrire et interpréter la corrélation éventuelle entre l'évolution de la ponctualité depuis 1954 par service et l'évolution d'un déterminant supposé de cette ponctualité.

2.2 Données utilisées

2.2.1 Données sur la ponctualité des services ferroviaires depuis 1954

- **Ponctualité des services Grandes Lignes à 15 minutes :**

Les services Grandes Lignes correspondent aux actuels services Intercités et TGV. Avant les années 1990, ces services correspondaient aux « trains rapides et express ».

Le seuil retenu pour harmoniser les données de ponctualité à l'arrivée de ces services est 15 minutes.

Les données utilisées couvrant la période 1954 à 2008 sont issues des mémentos statistiques de la SNCF. Les données pour les années 2017 à 2019 sont issues de la base de données de l'Autorité de régulation des transports (ART).

Pour estimer les valeurs des taux de retard à l'arrivée à 15 minutes des services Grandes Lignes entre 2009 et 2016, une moyenne pondérée des taux des TGV et des trains Intercités a été calculée. La pondération se base sur la part de ces services dans le total annuel des circulations de trains Grandes Lignes de 2015 d'après l'ART :

Service	Part dans les circulations Grandes Lignes en 2015 (ART)
TGV	68%
Trains Intercités	32%

Pour estimer les taux de retard à l'arrivée à 15 minutes pour les services TGV et Intercités entre 2009 et 2016, des coefficients multiplicateurs ont été utilisés selon la nature de la donnée de ponctualité disponible et le seuil utilisé :

Service	Période	Seuil de la donnée disponible	Coefficient multiplicateur passage à 15 min	Source données utilisées coefficient multiplicateur
TGV et Intercités	2009 – 2010 puis 2014 - 2016	Composite 5-10-15	0,67	ART : Taux de retard à 15 min 2017 - 2019 AQST : Taux de retard seuil composite 2017 - 2019
Intercités	2011 - 2013	10 min	1/1,42	ART : Taux de retard à 10 min et à 15 min 2017 - 2019
TGV	2011 - 2013	Composite 5-10-15	0,67	ART : Taux de retard à 15 min 2017 - 2019 AQST : Taux de retard seuil composite 2017 - 2019

- **Ponctualité des trains régionaux de province à 5 minutes :**

Les trains régionaux de province correspondent aux actuels services TER. Avant la fin des années 1990, ces services étaient désignés comme « services régionaux de voyageurs » (SRV), et avant le milieu des années 1980 comme « services omnibus » ou « trains omnibus ».

Le seuil retenu pour harmoniser les données de ponctualité à l'arrivée de ces services est 5 minutes.

Les données utilisées couvrant la période 1976 à 2006 sont issues des mémentos statistiques de la SNCF. Les données pour les années 2017 à 2019 sont issues de la base de données de l'Autorité de régulation des transports (ART).

Pour estimer les taux de retard à l'arrivée à 5 minutes pour les trains régionaux de province avant 1976, un coefficient multiplicateur a été utilisé :

Service	Période	Seuil de la donnée disponible	Coefficient multiplicateur passage à 5 min	Source données utilisées coefficient multiplicateur
Trains régionaux de province	1954 - 1976	15 min	4,44	ART : Taux de retard des trains TER par seuil en 2017 et modélisation exponentielle

- **Ponctualité des trains d'Ile-de-France à 5 minutes :**

Les trains d'Ile-de-France aux actuels services RER et Transilien. Dans les années 1990, ces services étaient désignés comme « services régionaux d'Ile-de-France », et avant les années 1990, comme « trains de la banlieue parisienne » ou « trains de la banlieue de Paris ».

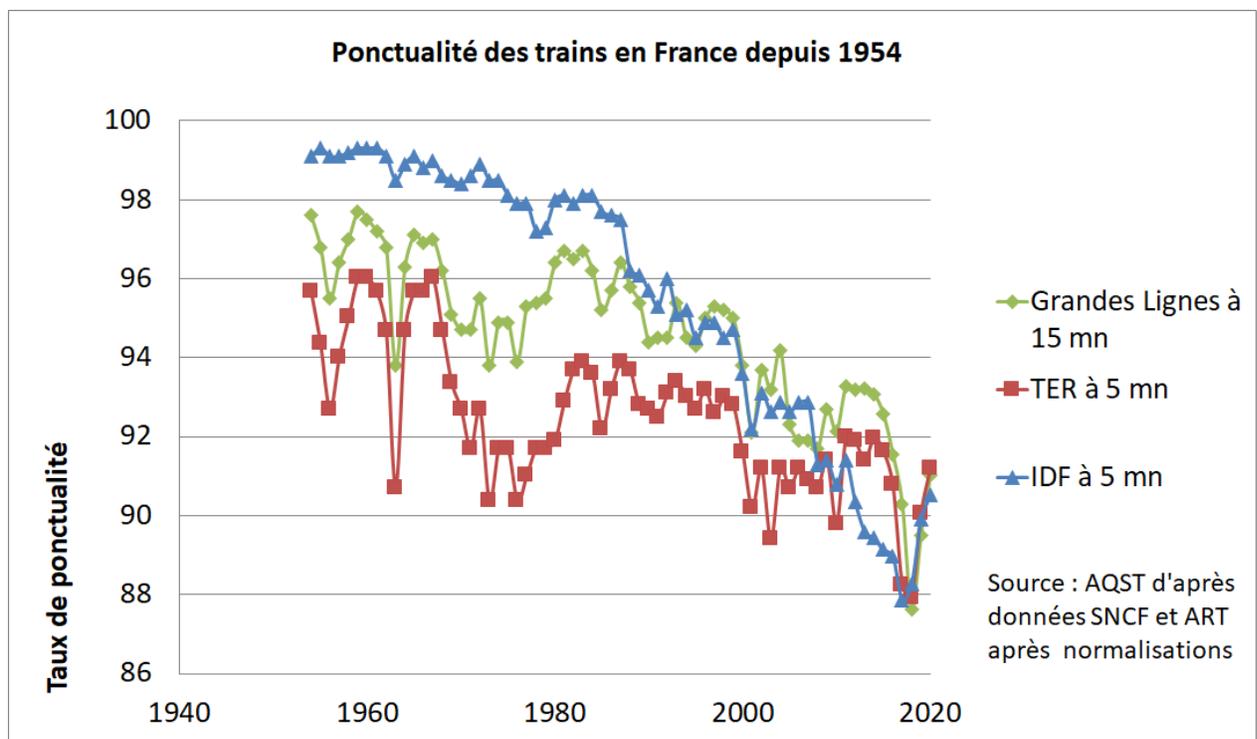
Le seuil retenu pour harmoniser les données de ponctualité à l'arrivée de ces services est 5 minutes.

Les données utilisées couvrant les périodes 1954 à 2002 et 2008 à 2011 sont issues des mémentos statistiques de la SNCF. Les données pour les années 2017 à 2019 sont issues de la base de données de l'ART.

Pour estimer les taux de retard à l'arrivée à 5 minutes pour les trains d'Ile-de-France, de 2003 à 2007 puis entre 2012 et 2016, des coefficients multiplicateurs ont été utilisés selon la nature de la donnée de ponctualité disponible et le seuil utilisé :

Service	Période	Seuil de la donnée disponible	Coefficient multiplicateur passage à 5 min	Source données utilisées coefficient multiplicateur
Trains régionaux d'Ile-de-France	2003 – 2007	5 min en période de pointe	1/1,33	SNCF : taux de retard à 5 min en période de pointe et toute la journée sur la période 1991-2002 (utilisation du ratio moyen sur la période)
Trains régionaux d'Ile-de-France	2012 – 2016	Indicateur Ile-de-France Mobilités retard des voyageurs à 5 min	1/1,077	AQST : retard voyageurs à 5 min selon l'indicateur Ile-de-France Mobilités en 2011 et 2017 SNCF : retard des trains à 5 min en 2011 ART : retard des trains à 5 min en 2017 (utilisation du ratio moyen 2011, 2017)

L'évolution de la ponctualité à l'arrivée des trains depuis 1954 par service a ainsi pu être tracée selon les seuils retenus :



Depuis 1954, les taux de retards des trains ont été multipliés par près de 10 en IDF, par 4 pour les trains Grandes Lignes et par 2 pour les trains régionaux de province.

A noter toutefois que compte tenu de la profondeur des données, de 1954 à 2020, l'évolution couvre un large spectre de méthodes de mesures de la ponctualité. Au cours de cette période, un système de mesure déclaratif manuel a laissé place à un système par balise (brehat), aujourd'hui complété par des localisation GPS. Aussi, l'exhaustivité et la précision de la mesure se sont améliorées au fil du temps.

- **Ponctualité globale pondérée du nombre de circulations par service :**

Un indicateur de ponctualité globale des trains de voyageurs, pondéré par le nombre de circulations des trains de voyageur par service, a ensuite été calculé. L'intérêt est d'attribuer à chaque service son poids dans le total des circulations de trains.

Pour construire cet indicateur, la méthode suivante a été employée :

- Nous avons récupéré les données sur le nombre moyen journalier de circulations par service depuis 1983 issues des mémentos statistiques de la SNCF. A partir d'hypothèses détaillées ci-après, nous avons estimé ce nombre moyen journalier de circulations par service sur la période 1983 – 2019 ;
- Ensuite nous avons calculé le total des circulations ponctuelles en multipliant pour chaque service les circulations précédemment calculées par la ponctualité de ce service, puis en additionnant les circulations ponctuelles par service ;
- Enfin, l'indicateur de ponctualité a été obtenu en divisant le total des circulations ponctuelles par le total des circulations.

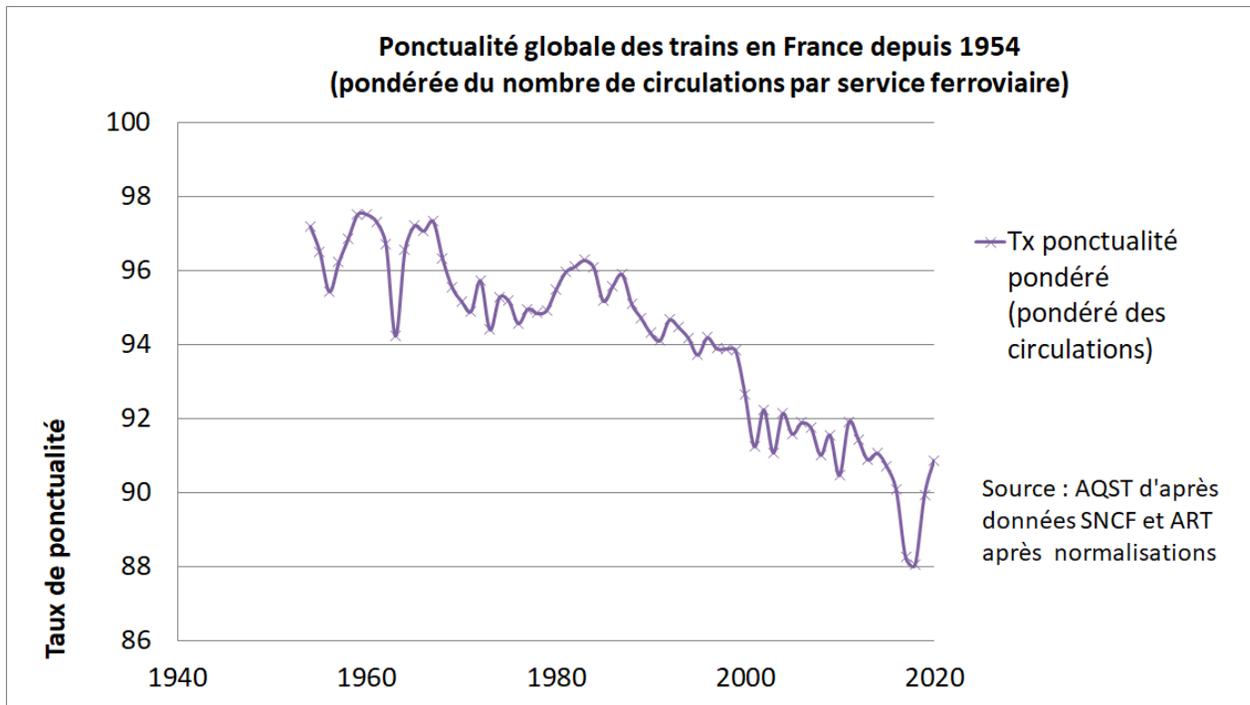
Pour estimer l'évolution du nombre moyen journalier de circulations de trains Grandes Lignes et de trains régionaux de province depuis 1983, nous avons émis l'hypothèse d'un ratio nombre de trains-km/nombre de circulations constant depuis 1983 pour ces 2 services et avons réutilisé la valeur de ce ratio en 1983. L'ensemble des données utilisées proviennent des mémentos statistiques SNCF depuis 1983.

Pour estimer l'évolution du nombre moyen journalier de circulations de trains régionaux d'Ile-de-France, nous avons « redressé » la donnée sur le nombre moyen journalier de circulations de trains d'Ile-de-France de 1983 à partir de l'évolution d'une estimation grossière de ce nombre depuis 1983.

Cette estimation est obtenue à partir du calcul suivant :

$$\frac{\text{Nombre de voyageurs} \times \text{Nombre de trains} - km}{\text{Nombre de voyageurs} - km}$$

L'évolution de la ponctualité globale des trains depuis 1954 pondérée des circulations par service, représentée à la page suivante, montre que le taux de retards des trains en France a été multiplié par 3,5 avec une perte de 7 points de ponctualité.



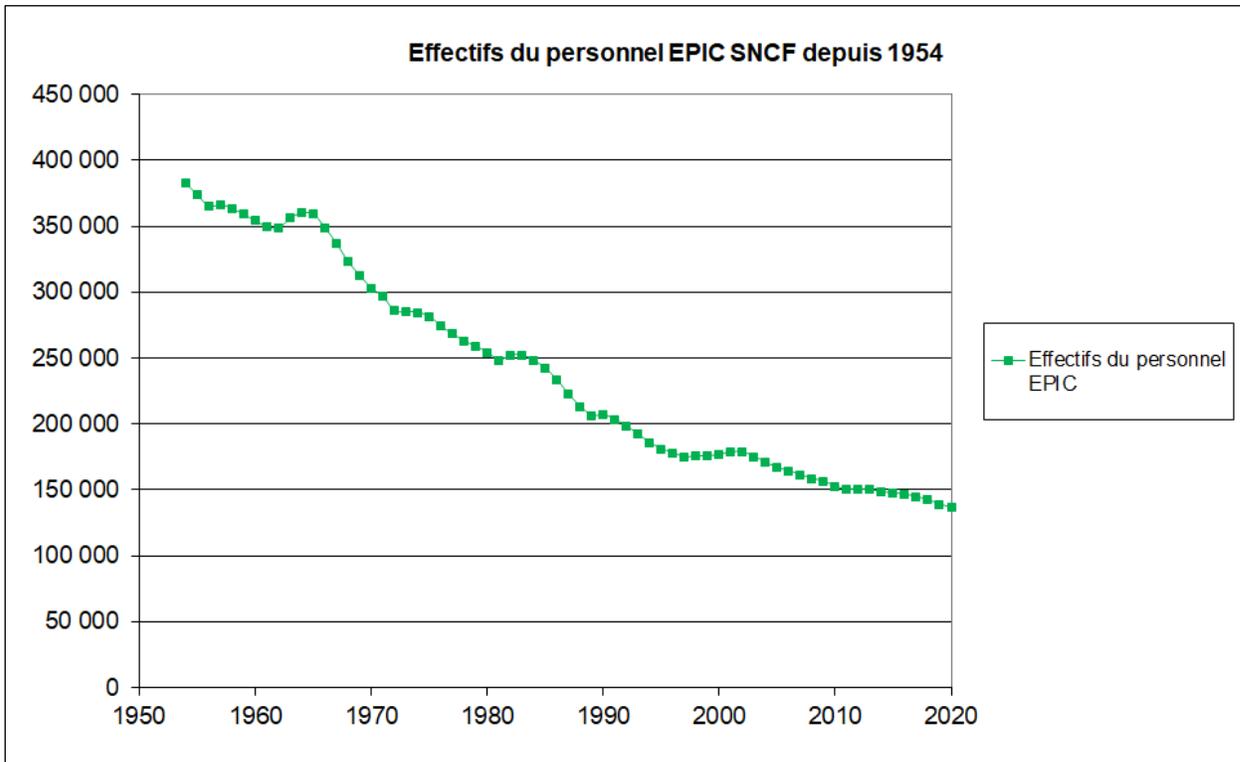
2.2.2 Données sur les déterminants de la ponctualité

- **Effectif de personnels de l'EPIC SNCF :**

Il est possible qu'un lien de corrélation existe entre l'effectif de personnels de la SNCF et la ponctualité des trains dont elle assure la circulation. Nous avons donc intégré en première approche cette variable à l'analyse des déterminants de la ponctualité depuis 1954 en France.

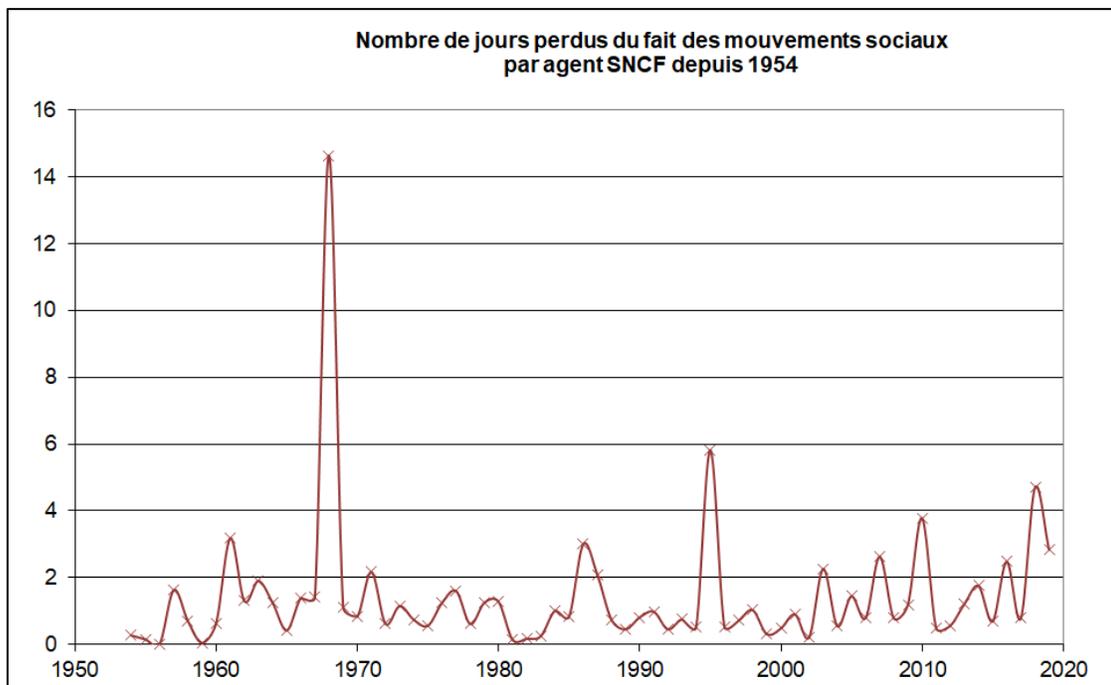
Les données sur l'effectif global du personnel entre 1954 et 2013 sont issues des mémentos statistiques de la SNCF. Les données utilisées pour compléter la série sont issues de l'OpenData SNCF, plus précisément du jeu de données « Effectifs disponibles SNCF depuis 1851 ».

La courbe ci-après montre que les effectifs de la SNCF ont diminué progressivement entre 1954 et 2020 : l'effectif global a été divisé par environ 2,5.



- **Nombre de jours de grève par agent et par année :**

Les données utilisées pour prendre en compte l'évolution du nombre de jours de grève par agent et par an sont issues du jeu de données « Journées perdues lors de mouvements sociaux chaque année depuis 1947 » de l'OpenData SNCF.



Le graphique précédent permet de retrouver les années marquées par des mouvements sociaux majeurs des cheminots qui ont impacté la SNCF depuis 1954, dont notamment :

- L'année 1968, avec plus de 14 jours de grève par agent, marquée par des grèves qui s'inscrivent dans le mouvement national de contestation de mai 68 ;
- L'année 1986, marquée par une grève au mois de décembre contre un projet de nouvelle grille salariale, au cours de laquelle aucune « trêve de Noël » n'avait été respectée ;
- L'année 1995, avec une grève de 22 jours entre le 24 novembre et le 15 décembre, qui avait abouti au retrait d'un projet de réforme des régimes spéciaux de retraite ;
- L'année 2010, marquée par 2 semaines de grève en avril contre la réorganisation de l'activité de fret, puis par 17 jours de grèves contre la réforme générale des retraites au mois d'octobre ;
- L'année 2018, marquée par la grève perlée ferroviaire intersyndicale contre le projet de réforme dans le contexte de la loi « pour un nouveau pacte ferroviaire », mettant notamment fin au statut de cheminot instauré en 1920. Cette grève s'est étalée du 3 avril au 28 juin sur un schéma de 2 jours de grève suivis de 3 jours de travail, pour un total de 41 jours de grève.

- **L'âge moyen en fin d'année du matériel roulant :**

Il est possible qu'un lien de corrélation existe entre l'âge moyen du matériel roulant de la SNCF et la ponctualité des trains dont elle assure la circulation. En effet, un matériel ancien est davantage susceptible de connaître des pannes au cours d'un trajet.

Le matériel roulant peut être divisé en deux catégories : le matériel moteur qui fournit l'énergie motrice utilisée par le train (par exemple des locomotives ou bien des automotrices, rames qui assurent seules leur propulsion) et le matériel voyageur ou matériel remorqué, qui regroupe les voitures et les caisses de trains tractées par le matériel moteurs.

Afin de connaître l'évolution de l'âge moyen d'un constituant donné du matériel roulant de la SNCF – par exemple les locomotives électriques ou les rames TGV - nous avons utilisé les données disponibles dans les mémentos statistiques de la SNCF depuis 1954. Les séries étant incomplètes, nous avons ensuite réalisé des modèles de parc pour estimer l'âge du matériel roulant lorsque la donnée n'était pas disponible.

Les modèles de parc permettent de suivre l'évolution des effectifs d'un élément constitutif du matériel roulant en service de la SNCF. Sur un pas annuel, nous avons pu estimer l'évolution des effectifs d'un matériel en prenant en compte l'effectif du matériel ancien sortant du parc et l'effectif du nouveau matériel entrant dans le parc ou bien du matériel renouvelé. Nous disposions en effet de séries chronologiques complètes sur l'évolution depuis 1954 des effectifs du matériel roulant par type de matériel, fournies par les mémentos statistiques de la SNCF.

En estimant la composition en effectifs du parc d'une part et l'âge des différents effectifs constituant le parc à l'aide d'une pyramide des âges, nous en déduisons une estimation de l'âge moyen du parc en fin d'année sur la période où la donnée réelle n'est pas disponible.

La formule ci-dessous donne le calcul de cette estimation de l'âge moyen en fin d'année du parc :

Formule pour le calcul d'une estimation de l'âge moyen : $(\sum q_i * \hat{a}_i) \div \sum q_i$

Avec, q_i = effectifs du matériel à l'année i

\hat{a}_i = âge du matériel à l'année i

Pour chaque élément constitutif du parc du matériel roulant de la SNCF pour lequel nous avons réalisé un modèle de parc, nous avons estimé les effectifs entrants, renouvelés ou radiés chaque année, en nous basant sur :

- le solde de l'effectif du parc considéré entre l'année n et l'année $n+1$;
- des données portant sur l'achat de matériel roulant, la mise en service d'un nouveau modèle de matériel ou bien la radiation des effectifs d'un modèle de matériel, principalement récoltées sur Wikipédia.

Les modèles de parc du matériel roulant utilisés sont détaillés en annexe 1.

Le tableau ci-dessous précise pour les différentes périodes des séries sur l'évolution de l'âge moyen en fin d'année du matériel moteur par type de matériel s'il s'agit d'une donnée réelle ou bien estimée.

Type de matériel moteur	Période	Donnée ou estimation de l'âge moyen en fin d'année et source
Toutes catégories du matériel moteur hors locotracteurs	1982 – 2009, 2015 et 2018	Donnée d'après les mémentos statistiques de la SNCF depuis 1982
Toutes catégories du matériel moteur	2010 – 2013	Estimation à partir des données sur les effectifs en fin d'année et l'âge moyen par type de matériel et par service issues des mémentos statistiques de la SNCF depuis 1982
Toutes catégories du matériel moteur	2014, 2016 – 2017, 2019	Estimation de l'âge moyen en fin d'année par continuité par rapport aux années immédiatement précédentes ou suivantes
<ul style="list-style-type: none"> - Locomotives électriques - Locomotives thermiques - Automotrices électriques - Autorails = automotrices thermiques - Turbo trains - Locotracteurs 	<p>1954 – 1981</p> <p>1970 – 1981</p> <p>1954 – 2007</p>	Estimation d'après modèle de parc AQST

Un tableau similaire est fourni pour le matériel tracté :

Type de matériel tracté (voyageurs)	Période	Donnée ou estimation de l'âge moyen en fin d'année et source
Toutes catégories du matériel tracté	1982 – 2013	Donnée d'après les mémentos statistiques de la SNCF depuis 1982
Toutes catégories du matériel tracté	2014 – 2019	Estimation de l'âge moyen en fin d'année par continuité dans l'hypothèse qu'aucune radiation n'intervient pour le matériel tracté
- Voitures TER - Voitures Transilien	1954 – 1981	Estimation d'après modèle de parc AQST

L'évolution des effectifs entrants, renouvelés ou bien radiés des voitures des trains régionaux d'Ile-de-France (actuels Transilien) a pu être reconstituée avec une précision en utilisant les données du site © trains-europe.fr, qui fournit une rétrospective très complète des mouvements de parcs par type de matériel et par modèle. Nous avons ici utilisé la section consacrée aux voitures de trains :

<http://trains-europe.fr/sncf/voitures/index.htm>

En revanche, il n'a pas été possible d'utiliser cette source pour les autres types de matériels soit parce que les modèles constitutifs de ces parcs sont trop nombreux, soit parce que des doutes demeurent sur les effectifs disponibles en 1954 – date de début de la modélisation, certains matériels utilisés en 1954 étant très anciens pour ces types de matériels. Pour ces mêmes raisons, aucun modèle de parc n'a été réalisé pour les voitures Grandes Lignes.

Comme dans toute modélisation, l'estimation de l'âge moyen d'un élément constitutif du matériel roulant de la SNCF n'est pas parfaite. Afin de calibrer les modèles réalisés et d'assurer la cohérence globale de l'estimation, nous avons comparé l'estimation de l'âge moyen en fin d'année calculée en sortie du modèle avec sa valeur réelle pour les 2 ou 3 premières années où la donnée était disponible. Pour effectuer cette comparaison, nous avons tenté de minimiser l'erreur quadratique moyenne entre l'estimation et la valeur réelle, donnée par la formule :

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2$$

Avec :

Y_i la valeur réelle de l'âge moyen en fin d'année du matériel roulant pour l'année i ;

\hat{Y}_i la valeur estimée de l'âge moyen en fin d'année du matériel roulant pour l'année i .

Le tableau ci-dessous détaille l'erreur quadratique moyenne obtenue pour les différents modèles de parc utilisés concernant le matériel roulant :

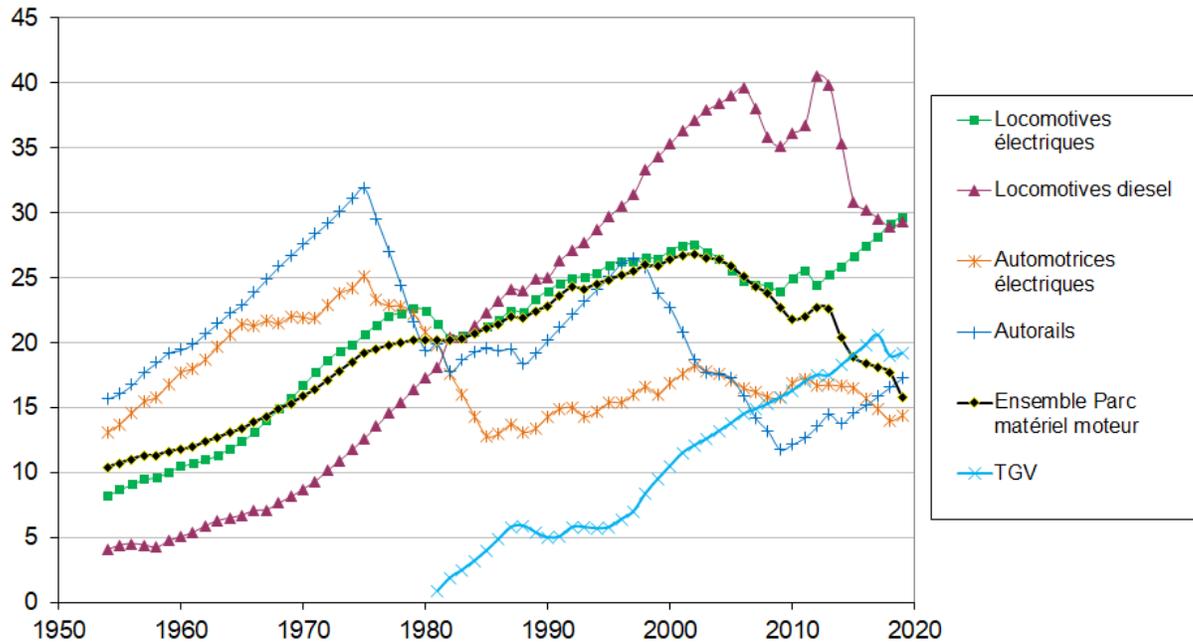
Type de matériel	Période	Erreur quadratique moyenne de l'estimation en années (années prises en compte dans le calcul)
Locomotives électriques	1954 – 1981	2,2 (1982, 1983)
Locomotives thermiques		0,86 (1982, 1983)
Automotrices électriques		1,3 (1982, 1983)
Automotrices thermiques		0,23 (1982, 1983)
Turbotrains	1970 – 1981	0,30 (1982, 1983)
Locotracteurs	1954 – 2007	0,91 (2008)
Voitures TER	1954 – 1981	0,54 (1982, 1983, 1984)
Voitures trains régionaux IDF		0,23 (1982, 1983, 1984)

Les modèles semblent cohérents avec les premières données disponibles : l'erreur quadratique moyenne de l'estimation est inférieure à 1 année pour la majorité des modèles, à l'exception des modèles pour les automotrices électriques (1,3 ans) et les locomotives électriques (2,2 ans), qui semblent légèrement moins précis.

A partir des séries chronologiques sur l'évolution de l'âge moyen du matériel moteur depuis 1954 par type de matériel et des effectifs de ces différents types matériels, une estimation de l'évolution de l'âge moyen du parc du matériel moteur SNCF a ensuite été calculée en effectuant la moyenne pondérée des effectifs par type.

Age moyen
du matériel moteur

Estimation AQST de l'évolution de l'âge moyen du matériel moteur SNCF par type de matériel depuis 1954

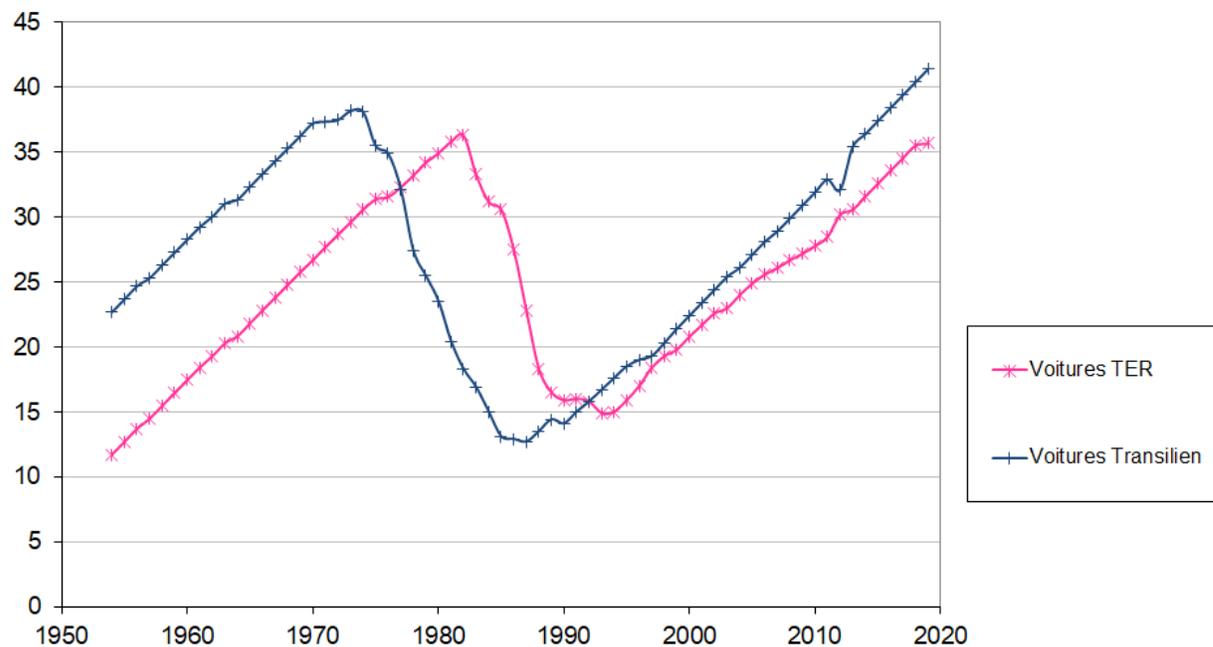


Le graphique ci-dessus illustre l'évolution de l'âge moyen des principaux types de matériel moteur de la SNCF depuis 1954 :

- Les locomotives thermiques (Diesel) ont vieilli entre 1954 et 2005, période durant laquelle ce type de matériel moteur ne semble pas avoir été renouvelé, dépassant près de 40 ans d'âge moyen en 2006 et 2012, puis des radiations des locomotives thermiques les plus anciennes semblent avoir été effectuées ;
- Les locomotives électriques ont globalement vieilli entre 1954 et 2019, malgré des périodes de renouvellement ou de radiations de matériel au début des années 80 et dans les années 2000 ;
- Les automotrices thermiques (autorails) ont fortement vieilli jusqu'en 1975 avant de connaître des grandes vagues de renouvellement et de radiations des effectifs les plus anciens de 1975 à 1982 puis au cours des années 2000. L'âge moyen atteint environ 17 ans en 2019 ;
- Les automotrices électriques - qui composent une grande part du matériel roulant des trains régionaux de la SNCF - ont également vieilli jusqu'en 1975 avant que le parc ne soit en partie renouvelé jusqu'au milieu des années 80. Grâce à des radiations des effectifs les plus anciens et à de nouvelles commandes progressives, l'âge moyen des automotrices électriques a été maintenu sous 18 ans de 1985 à 2019 ;
- L'âge moyen de l'ensemble du parc du matériel moteur SNCF a vieilli de 1954 à 2002 où il a atteint un pic à 27 ans, avant la mise en place de renouvellements des effectifs dans les années 2000. Il est ainsi redescendu à 16 ans en 2019.

Age moyen
du matériel remorqué

Estimation AQST de l'évolution de l'âge moyen des voitures TER et Transilien depuis 1954



Concernant l'évolution depuis 1954 de l'âge moyen des voitures remorquées des trains régionaux en France :

- Les voitures TER (et assimilés) ont vieilli jusqu'en 1982 atteignant un âge moyen de 36 ans, avant de connaître une grande vague de renouvellement et de radiations jusqu'en 1993 où l'âge moyen était de 15 ans. L'âge moyen des voitures TER a ensuite augmenté jusqu'en 2019 où il atteint près de 35 ans ;
- L'évolution de l'âge moyen des voitures des trains régionaux d'Ile-de-France (actuels Transilien) est assez similaire en tendance mais avec un décalage temporel : ce parc a connu un vieillissement jusqu'au milieu des années 1970 avec un pic à 28 ans, puis a été rajeuni au cours d'une vague de radiation et de renouvellement jusqu'au milieu des années 80, avant de vieillir à nouveau jusqu'en 2019 où l'âge moyen des voitures Transilien dépasse 40 ans.

- **L'âge moyen des voies ferroviaires en fin d'année :**

Il est possible qu'un lien de corrélation existe entre l'âge moyen des voies du réseau ferroviaire et la ponctualité des trains circulant sur ce réseau. En effet, une infrastructure vétuste peut engendrer des incidents comme des défaillances de la voie, et donc des retards. Des retards peuvent également intervenir à cause de ralentissements (limitations temporaires de vitesse) imposés pour préserver la sécurité des installations et des voyageurs, par exemple en cas de fortes chaleurs. Or ces limitations sont plus fréquentes à mesure que le réseau ferroviaire vieillit.

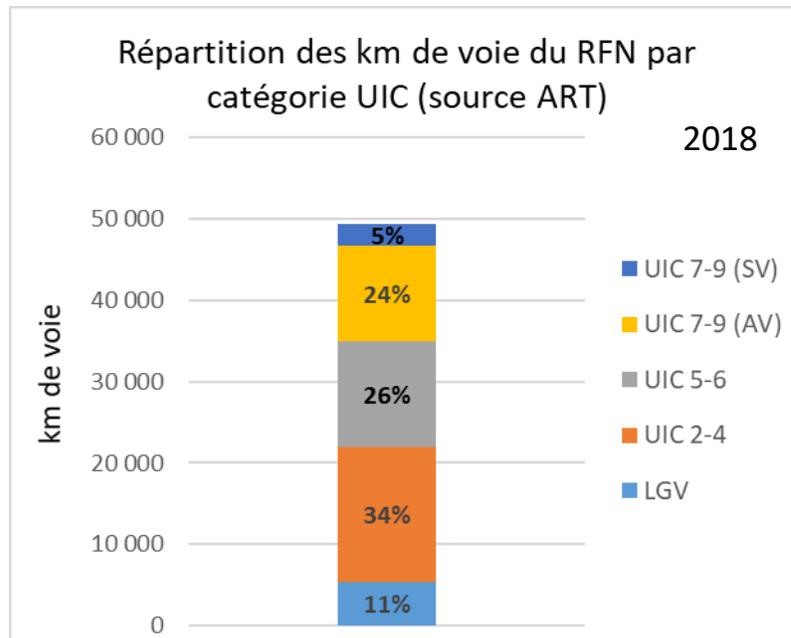
Les lignes du réseau ferroviaire peuvent être classées selon la classification de l'Union Internationale des Chemins de fer (UIC). La classification et son application au Réseau Ferré National (RFN) sont présentées par SNCF Réseau dans un article web relatif au débat public sur la Voie Ferrée Centre Europe Atlantique et disponible en ligne³. SNCF Réseau explique notamment que :

« Le groupe UIC 1 correspond à des lignes très chargées et, à l'opposé, le groupe UIC 9 correspond à des lignes très faiblement chargées. Les lignes à grande vitesse ainsi que les grandes lignes du réseau ferré national appartiennent en principe aux groupes UIC 1 à 4, à l'exception de certains axes, notamment transversaux, qui relèvent des groupes UIC 5 à 6. Les lignes faiblement chargées des groupes UIC 7 à 9, avec voyageurs (AV) ou sans voyageurs (SV), correspondent en général au réseau capillaire, généralement régional. »

SNCF Réseau précise également que « Cette classification UIC permet de définir la politique de maintenance du réseau ferroviaire. » Ainsi, les politiques de renouvellement et de radiations des lignes de chemins de fer peuvent être différentes selon les catégories UIC. Il est donc pertinent de s'intéresser à l'évolution de l'âge moyen des voies selon leurs catégories UIC, et non uniquement à l'évolution de l'âge moyen du RFN.

La graphique ci-dessous, obtenu à partir de données de l'ART, précise les longueurs de ligne du réseau en 2018 selon les regroupements de catégories UIC :

³ Lien vers l'article : <https://cpdp.debatpublic.fr/cdpd-vfcea/classification-uic-union-internationale-chemins-fer-ligne-nevers-chagny.html>



Afin de connaître l'évolution de l'âge moyen des voies par groupes de catégories UIC nous avons utilisé les données disponibles dans le rapport « l'Avenir du Transport ferroviaire » de la mission conduite par Jean-Cyril Spinetta, remis au Premier Ministre le 15 février 2018. Les séries étant incomplètes pour notre étude de la ponctualité depuis 1954, nous avons ensuite réalisé des modèles de parc pour estimer l'âge des voies lorsque la donnée n'était pas disponible.

Sur un pas annuel, nous avons pu estimer l'évolution du km de voie cible pour un groupe de catégorie UIC en tenant compte de la longueur de voie sortant du parc chaque année, de la longueur des nouvelles voies, ainsi que des voies renouvelées. Pour cela nous disposons de données dont les sources sont précisées dans le tableau ci-dessous.

En estimant la répartition des voies constituant le parc d'un groupe UIC en fonction de leur âge à l'aide d'une pyramide des âges, nous en déduisons une estimation de l'âge moyen du parc en fin d'année, selon la même méthode que pour l'évolution de l'âge moyen du matériel roulant.

Les modèles de parc des lignes ferroviaires utilisés sont détaillés en annexe 2.

Le tableau ci-dessous précise pour les différentes périodes des séries sur l'évolution de l'âge moyen des voies en fin d'année par groupe UIC et s'il s'agit d'une donnée réelle ou bien estimée.

Groupe de lignes UIC	Période	Donnée ou estimation de l'âge moyen en fin d'année et source
- RFN		
- UIC 2-4		
- UIC 5-6	1993 – 2017	Données issues du rapport « l'Avenir du Transport ferroviaire » remis au Premier Ministre le 15 février 2018 par la mission conduite par Jean-Cyril Spinetta
- UIC 7-9 (AV)		
- LGV		

- RFN - UIC 2-4 - UIC 5-6 - UIC 7-9 (AV) - LGV	2018-2019	Données issues de la base de l'ART
- RFN - UIC 2-4 - UIC 5-6 - UIC 7-9 (AV)	1954 – 1992	Estimation d'après modèle de parc AQST
LGV	1981 – 1992	Estimation d'après modèle de parc AQST
UIC 2-6 en IDF	1954 – 2019	Estimation d'après modèle de parc AQST

Pour chaque groupe UIC de voies constitutif du RFN pour lequel nous avons réalisé un modèle de parc, nous avons estimé les longueurs de voie entrant, renouvelées ou radiées chaque année, en nous basant :

- Sur le solde de la longueur totale de voie cible du parc considéré entre l'année n et l'année n+1 ;
- Sur des données de séries chronologiques des longueurs équivalentes de voie renouvelée en km Gopeq⁴ issues de différentes sources précisées dans le tableau ci-dessous. Ces séries étant incomplètes, nous avons estimé les longueurs équivalentes de voie renouvelée pour les années où la donnée n'était pas disponible selon une méthode précisée dans le tableau ci-dessous :

Groupe de lignes UIC	Période	Donnée ou estimation de la longueur totale de voie renouvelée en fin d'année (km Gopeq) et source
Global RFN	1954 – 2004	Données d'après les mémentos statistiques de la SNCF depuis 1954
- UIC 2-4 - UIC 5-6 - UIC 7-9 (AV)	1968 – 2004	Données issues du rapport de l'audit sur l'état du Réseau Ferré National français de la mission conduite par Robert Rivier et Yves Putallaz, remis le 7 septembre 2005
- LGV - UIC 2-4 - UIC 5-6 - UIC 7-9 (AV) - UIC 2-4 en IDF	1981 – 2017	Données issues du rapport « l'Avenir du Transport ferroviaire » remis au Premier Ministre le 15 février 2018 par la mission conduite par Jean-Cyril Spinetta

⁴ La longueur équivalente de voie renouvelée est mesurée en GOPEQ (Grandes Opérations Programmées Equivalentes), qui traduit le volume de renouvellement, en intégrant différents types d'opérations, et en faisant abstraction de l'évolution des coûts unitaires.

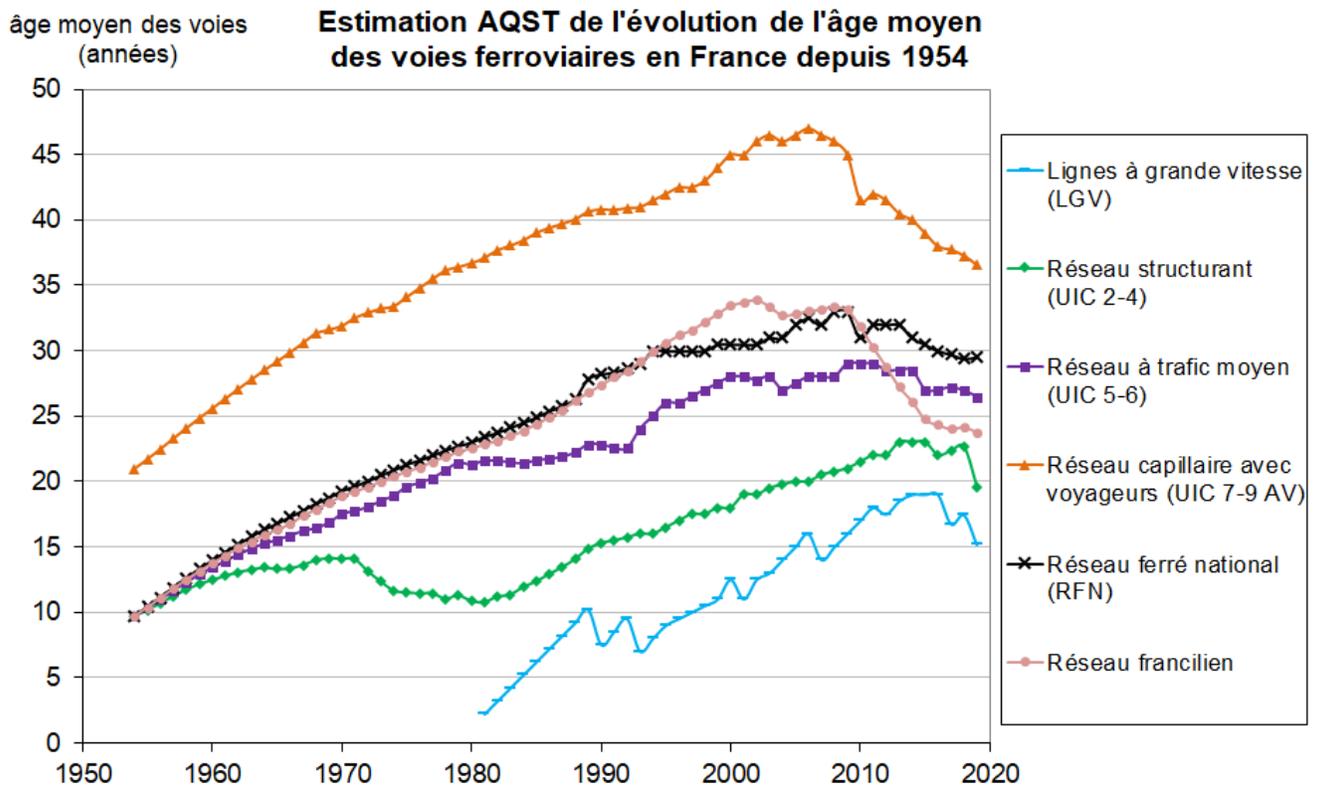
- UIC 5-6 en IDF		
UIC 2-6 en IDF	1968 – 1980	Estimation à partir de l'évolution de la longueur totale de voie UIC 2-6 renouvelée entre 1968 et 1980 (données rapport audit Rivier et Putallaz, 2005) et de la part moyenne de la longueur de voie UIC 2-6 renouvelée en IDF dans la longueur totale de voie UIC 2-6 renouvelée sur la période 1981-1983 (données rapport Spinetta, 2018) : Hypothèse que cette part est restée fixe sur la période 1968 – 1980.
- UIC 2-4 - UIC 5-6 - UIC 7-9 (AV) - UIC 2-6 en IDF	1954 – 1967	Estimation à partir de l'évolution de la longueur totale de voie renouvelée entre 1954 et 1967 sur le RFN (données mémentos statistiques SNCF) et de la part moyenne de la longueur de voie renouvelée par catégorie (UIC 2-4 par exemple) dans la longueur totale de voie renouvelée sur le RFN en 1968 et 1969 (données rapport audit Rivier et Putallaz, 2005) : Hypothèse que la répartition par catégorie des longueurs de voie renouvelées est restée fixe sur la période 1954 – 1969.

Afin de calibrer les modèles réalisés et d'assurer la cohérence globale de l'estimation, nous avons comparé l'estimation de l'âge moyen en fin d'année calculée en sortie du modèle avec sa valeur réelle pour les 3 premières années où la donnée était disponible. Pour effectuer cette comparaison, nous avons tenté de minimiser l'erreur quadratique moyenne entre l'estimation et la valeur réelle.

Le tableau ci-dessous détaille l'erreur quadratique moyenne obtenue pour les différents modèles de parc utilisés concernant les groupes UIC de lignes ferroviaires :

Groupe de lignes UIC	Période	Erreur quadratique moyenne de l'estimation en années (années prises en compte dans le calcul)
RFN		0,11 (1993 - 1995)
UIC 2-4	1954 – 1992	0,36 (1993 - 1995)
UIC 5-6		0,32 (1993 - 1995)
UIC 7-9 (AV)		0,13 (1993 - 1995)
LGV	1981 – 1992	0,31 (1993 - 1995)

Les modèles semblent cohérents avec les premières données disponibles, l'erreur quadratique moyenne de l'estimation étant inférieure à 1/2 année l'ensemble des modèles. A noter que nous n'avons pas trouvé de données concernant l'âge moyen des voies UIC 2-6 en Ile-de-France. La cohérence du modèle portant sur cette catégorie n'a donc pas pu être évaluée.



Le graphique ci-dessus illustre l'évolution de l'âge moyen des lignes ferroviaires depuis 1954 selon la classification de l'UIC :

- Le Réseau Ferré National français a vieilli entre 1954 et le milieu des années 90. L'âge moyen des voies du RFN a ensuite stagné entre 1994 et 2004 grâce à des renouvellements de voies. Le réseau a ensuite à nouveau vieilli pour atteindre 33 ans en 2009, avant d'être partiellement renouvelé au cours des dernières années pour atteindre 30 ans d'âge moyen en 2019 ;
- Entre 1954 et 2019, l'âge moyen des voies UIC 2-4 (les lignes les plus fréquentées) a augmenté moins fortement que celui des voies UIC 5-6 (principalement des lignes transversales moins fréquentées). D'après notre modélisation, les lignes UIC 7-9 avec voyageurs, correspondant aux petites lignes les moins fréquentées des réseaux régionaux, étaient déjà 2 fois plus âgées que les autres lignes en 1954. Elles n'ont été renouvelées que très partiellement à partir de 2010. En 2019, l'âge moyen des voies UIC 2-4 est de 20 ans, celui des voies UIC 5-6 de 26 ans, contre 36 ans pour les UIC 7-9 AV. Ces importantes disparités entre catégories UIC s'expliquent en grande partie par la politique de maintenance et d'investissement adoptée par le gestionnaire du réseau ferré français ;

- En Ile-de-France, les voies ferroviaires appartenant aux catégories UIC 2 à 6 - qui forment le réseau sur lequel circulent les trains régionaux de voyageurs de la région francilienne – ont vieilli entre 1954 et 2009, en suivant globalement la même trajectoire que le RFN. Le réseau a été grandement renouvelé à partir de 2010, passant de 33 ans d’âge moyen des voies en 2009, à 24 ans en 2019 ;
- Depuis la mise en service de la première LGV en 1981 (1^{er} tronçon de la LGV Sud-Est entre Saint-Florentin – Lyon et Sathonay-Camp inauguré le 22 mai 1981), l’âge moyen des LGV françaises a augmenté en moyenne jusqu’en 2019, la mise en service progressive de nouvelles lignes LGV engendrant néanmoins des baisses ponctuelles dans son évolution. Il a atteint 19 ans en 2016 avant la mise en 2017 des LGV Sud Europe Atlantique et Bretagne-Pays de la Loire et du contournement de Nîmes et Montpellier sur la LGV Méditerranée. En 2019, l’âge moyen des LGV est de 15 ans.
- **L’intensité d’utilisation des lignes ferroviaires :**

L’intensité d’utilisation des lignes ferroviaires se définit comme le rapport du parcours des trains en trains-km sur la longueur de ligne en km. Une intense utilisation des lignes ferroviaires est susceptible d’user les voies. Elle augmente donc le risque d’incidents liés à l’état de la voie à long terme, pouvant entraîner des retards. Lorsque l’intensité d’utilisation approche les limites de capacité des infrastructures, l’exploitation ferroviaire peut devenir difficile, et les retards sont davantage susceptibles de se propager d’un train au suivant par effet de réseau, notamment aux heures de pointe.

Afin de tester une éventuelle corrélation entre l’évolution de la ponctualité des trains depuis 1954 par service et l’intensité d’utilisation des lignes ferroviaires par ces services, nous avons retenu différentes variables suivantes :

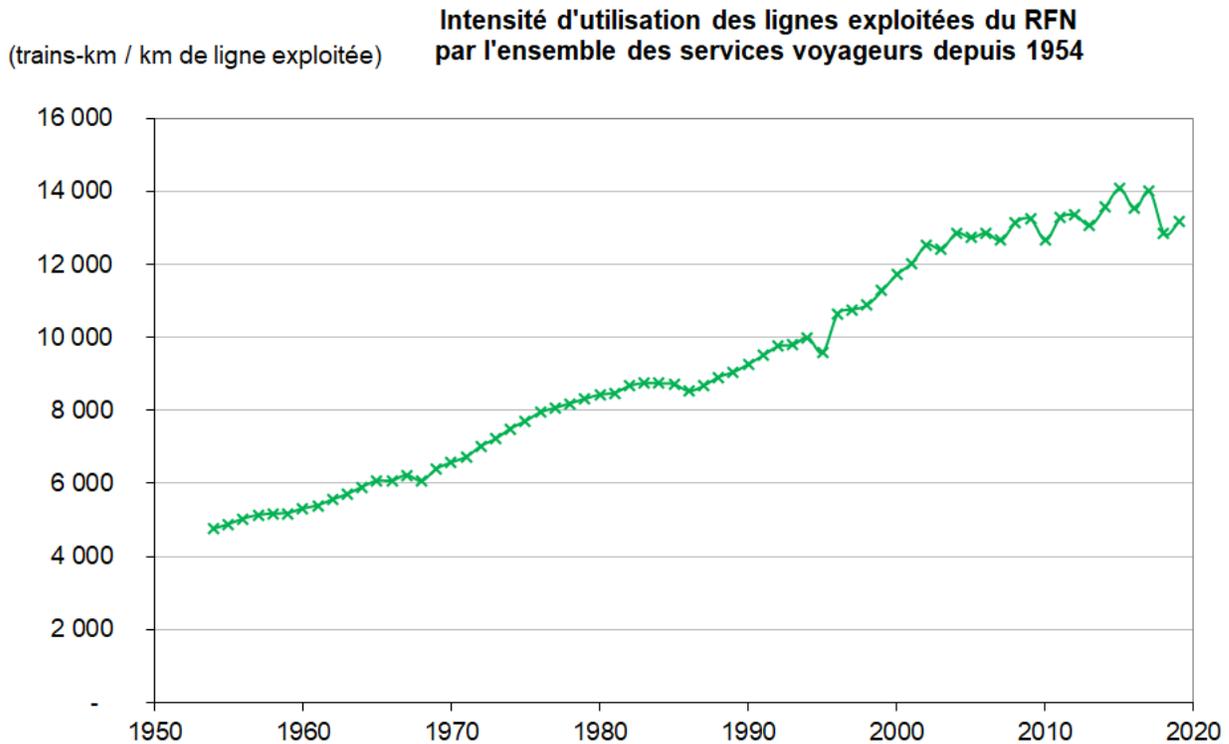
Variable	Période	Calcul utilisé
Intensité d’utilisation du RFN par l’ensemble des services voyageurs SNCF		$\frac{\text{Trains – km (ensemble services voyageurs)}}{\text{Longueur totale de ligne exploitée RFN}}$
Intensité d’utilisation du RFN par les services Grandes Lignes	1954 – 2019	$\frac{\text{Trains – km (services Grandes Lignes)}}{\text{Longueur totale de ligne exploitée RFN}}$
Intensité d’utilisation du RFN par les services TER		$\frac{\text{Trains – km (services TER)}}{\text{Longueur totale de ligne exploitée RFN}}$
Intensité d’utilisation des lignes UIC 2-6 d’Ile-de-France par les trains régionaux d’IDF		$\frac{\text{Trains – km (Transilien)}}{\text{Longueur de ligne UIC 2 – 6 en IDF}}$
Intensité d’utilisation des LGV par les TGV	1981 – 2019	$\frac{\text{Trains – km (TGV)}}{\text{Longueur de ligne LGV}}$

Les sources de données sur l'évolution des longueurs de ligne exploitées sont précisées ci-dessous :

Variable	Période	Sources
Longueur totale de ligne exploitée RFN		1954-2013 : Mémentos statistiques de la SNCF ; 2015-2019 : base ART ; 2014 : moyenne (2013 ; 2015).
Longueur totale de LGV exploitée		1954-2013 : Mémentos statistiques de la SNCF ; 2015-2019 : base ART ; 2014 : moyenne (2013 ; 2015).
Longueur de ligne en Ile-de-France (UIC 2-6)	1954 – 2019	1966-2004 : Mémentos statistiques de la SNCF 1954-1965 : estimation AQST à l'aide du modèle de parc ; 2009, 2013, 2015-2017 : Commissariat général au développement durable (CGDD) du Ministère de la Transition Ecologique ; 2005-2008, 2010-2012, 2014 : Estimation par prolongement linéaire ; 2015-2019 : base ART.

Les sources de données sur l'évolution des parcours de trains (trains-km) par service sont précisées ci-dessous :

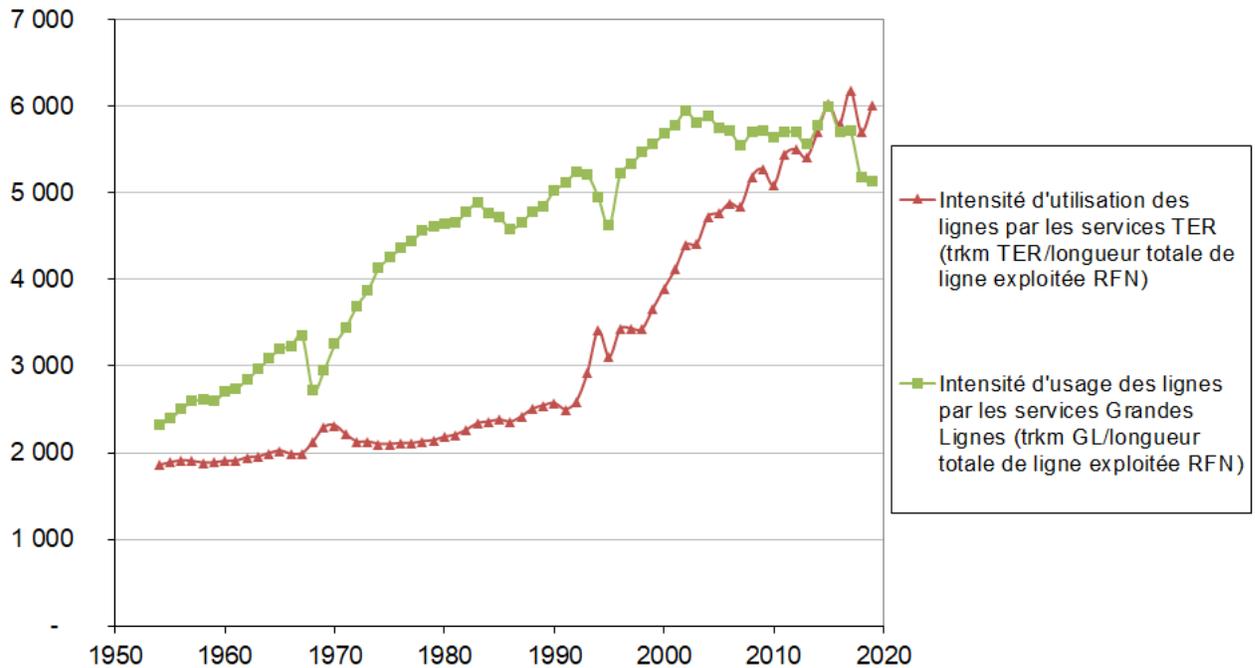
Variable	Période	Sources
- Total trains-km services voyageurs SNCF - Total trains-km services Grandes Lignes - Total trains-km services TER	1954 – 2019	1954-2013 : Mémentos statistiques de la SNCF ; 2014 : moyenne (2013;2015) 2015-2019 : ART
Total trains-km trains régionaux en Ile-de-France		1954-2013 : Mémentos statistiques de la SNCF ; 2014 : OMNIL 2015-2019 : ART



L'intensité d'utilisation des lignes ferroviaires exploitées du RFN par l'ensemble des services voyageurs a cru de façon à peu près constante entre 1954 et 2002, avant de se stabiliser autour de 13 000 trkm/km de ligne exploité entre 2003 et 2013. Elle a connu un record au-delà de 15 300 trkm/km en 2015 avant de diminuer pour atteindre environ 13 200 trkm/km en 2019, soit une multiplication par 2,8 entre 1954 et 2019.

(trkm / longueur de ligne exploitée)

Intensité d'utilisation du RFN par les services TER et Grandes Lignes depuis 1954

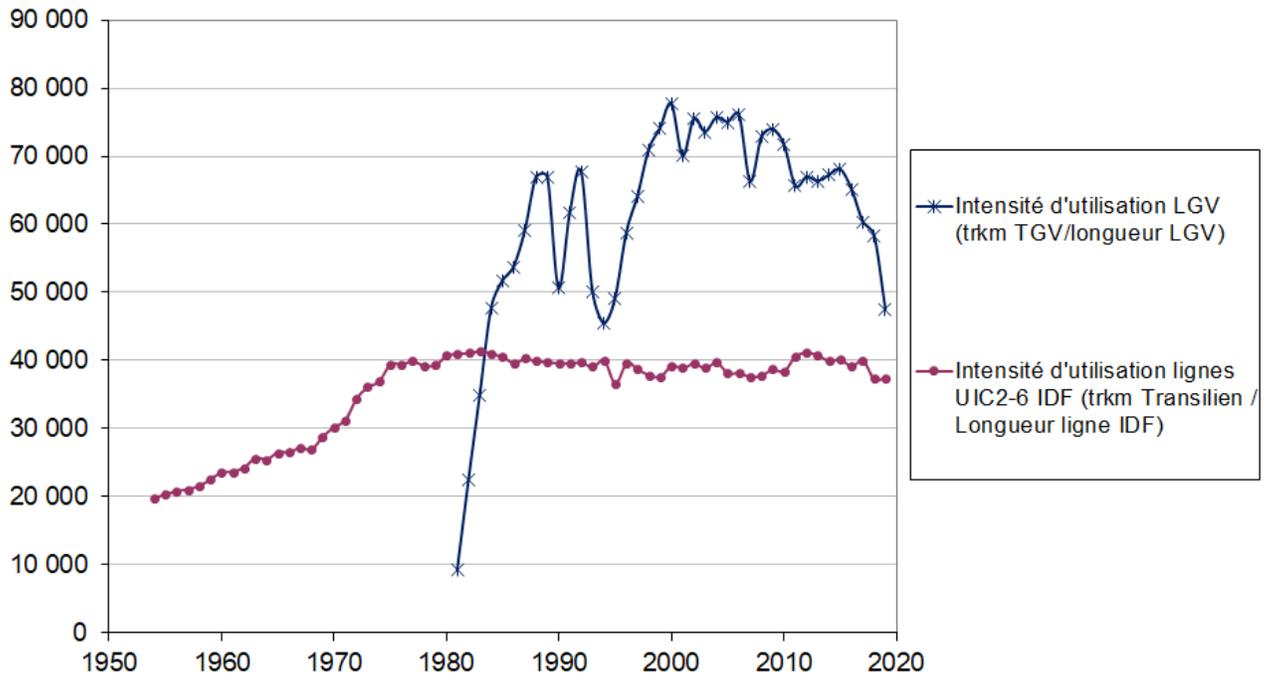


L'intensité d'utilisation du RFN par les services Grandes Lignes a cru de façon à peu près constante entre 1954 et 2002, avant de diminuer à partir de 2015 pour atteindre près de 5100 trkm Grandes Lignes/km de ligne RFN en 2019. Entre 1954 et 2019, elle a été multipliée par 2,2 environ.

L'intensité d'utilisation du RFN par les services TER a connu une croissance très soutenue dans les années 90, présentant une tendance exponentielle. Si cette croissance a légèrement ralenti à partir de 2005, sa tendance est globalement constante depuis. L'utilisation du réseau ferré par les services TER a ainsi dépassé celle du réseau par les services Grandes Lignes en 2014, et elle dépasse 6000 trkm TER/km de ligne RFN en 2019, ce qui représente une multiplication par 3,2 par rapport au niveau de 1954.

(trkm / longueur de ligne exploitée)

Intensité d'utilisation des LGV et des lignes ferroviaires d'Ile-de-France depuis 1954



Depuis la mise en service de la première LGV en 1981, leur intensité d'utilisation par les services TGV a fortement augmenté pour atteindre près de 47 500 trkm/km de ligne en 2019. La série présente une grande volatilité. Il est probable que la mise en service d'une nouvelle LGV fasse chuter l'intensité d'utilisation des lignes l'année de sa mise en service en augmentant la longueur totale de ligne LGV, avant que l'accroissement rapide du nombre de circulations de TGV sur cette même ligne n'entraîne une forte augmentation de l'intensité d'utilisation des LGV.

L'intensité d'utilisation des lignes ferroviaires d'Ile-de-France par les services Transilien et assimilés a cru très rapidement entre 1954 et 1975. Depuis 1975, elle est globalement restée stable jusqu'en 2019 décrivant un plateau autour de 40 000 trkm/km de ligne. Elle a donc doublé entre 1954 et 2019.

- **Le niveau du trafic en voyageurs-kilomètres (voy-km) et le niveau de fréquentation des trains :**

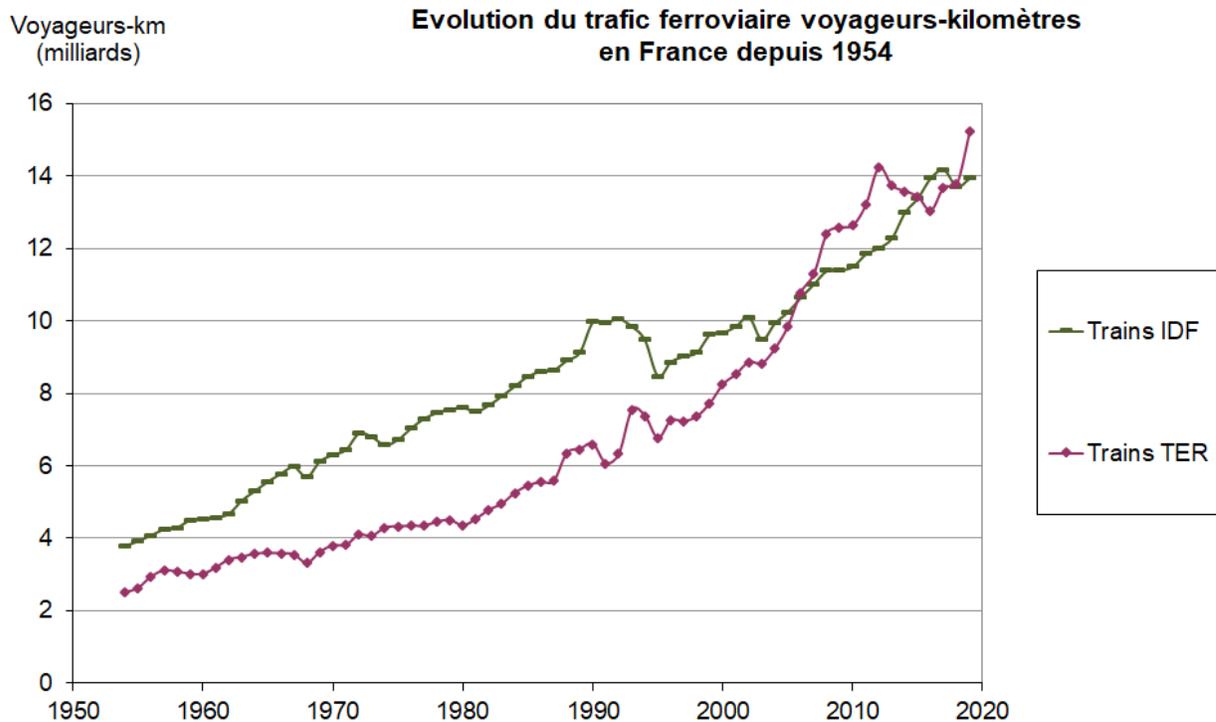
Un niveau de trafic en voyageurs-kilomètres élevé amène l’exploitant ferroviaire à réduire la durée de l’intervalle entre 2 trains dans sa grille horaire, et peut le contraindre à mener une exploitation proche des limites de capacité des infrastructures sur certaines lignes ou tronçons de ligne du réseau. Davantage de retards liés aux situations de congestion peuvent alors survenir, et ces derniers peuvent impacter davantage de voyageurs du fait de la propagation d’un retard d’un train aux suivants par effet de réseau, notamment aux heures de pointe.

Un indicateur de fréquentation (voyageurs-km/trains-km) représentant le nombre moyen de voyageurs transportés par train a également été calculé pour les différentes activités voyageurs. Lorsque cet indicateur augmente, davantage de retards liés aux voyageurs (malaises voyageurs, blocage des portes durant le temps d’échange voyageurs lors d’un arrêt, déclenchement légitime ou non du signal d’alarme par un voyageur entraînant des retards, retards liés aux bagages oubliés, etc.) risquent d’impacter la ponctualité.

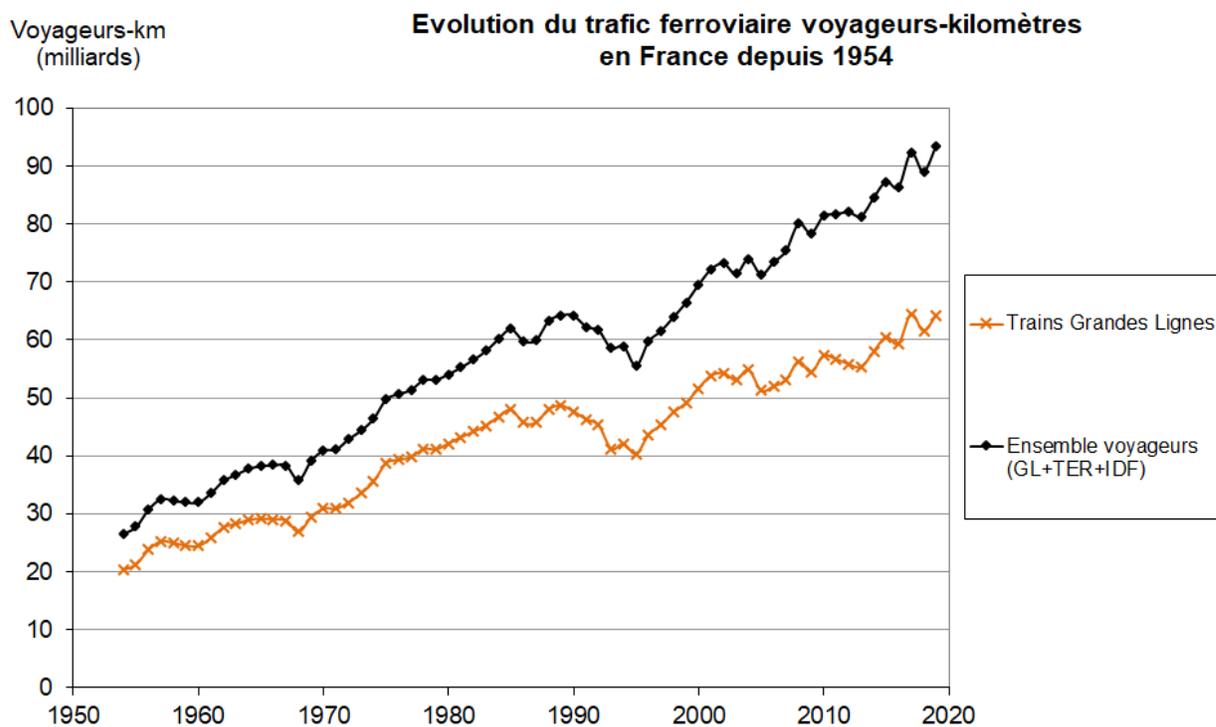
Les sources de données sur l’évolution des parcours de trains (trains-km) par service ont été précisés dans le tableau au paragraphe précédent consacré à l’intensité d’utilisation des lignes ferroviaires.

Les sources de données utilisées sur l’évolution du trafic voyageurs en voy-km sont précisées ci-après :

Variable	Période	Sources
Trafic voy-km Grandes Lignes		1954-2013 : Mémentos statistiques de la SNCF ; 2015-2019 : base ART ; 2014 : moyenne (2013 ; 2015).
Trafic voy-km trains régionaux d’Ile-de-France (hors RER RATP)	1954 – 2019	1954-2013 : Mémentos statistiques de la SNCF ; 2015-2019 : base ART ; 2014 : donnée OMNIL.
Trafic voy-km TER		1972-2013 : Mémentos statistiques de la SNCF 1954-1971 : estimation AQST sous l’hypothèse d’une part constante du trafic voy-km TER dans le trafic voy-km tous services voyageurs, égale à la moyenne de cette part sur la période 1972-74 ; Estimation par prolongement linéaire ; 2015-2019 : base ART ; 2014 : moyenne (2013 ; 2015).

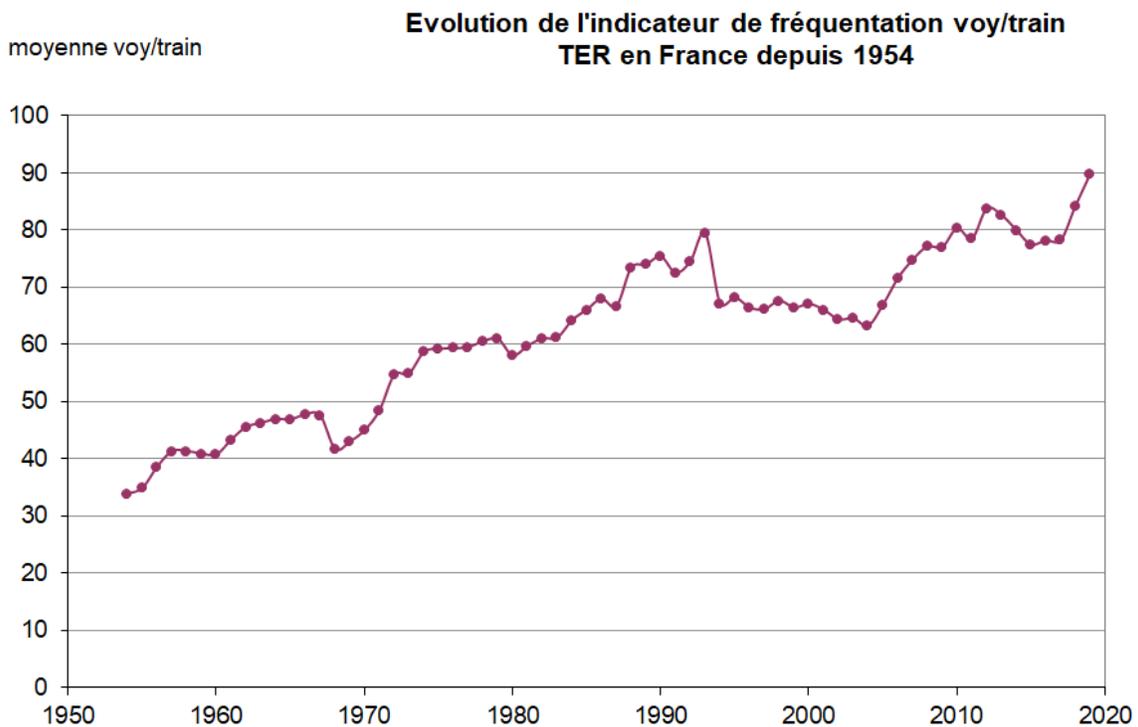


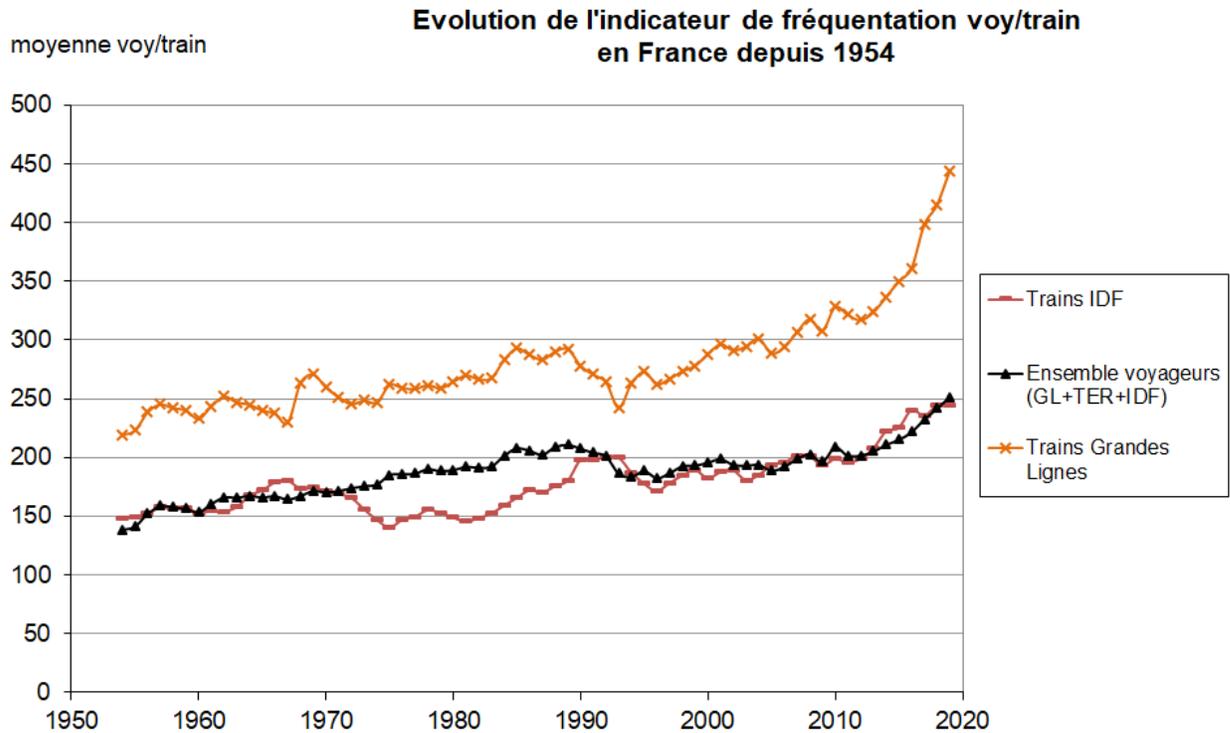
Le trafic voyageurs en voy-km a fortement cru depuis 1954 pour les trains régionaux de province comme pour ceux d’Ile-de-France. La croissance du trafic s’est accélérée avec la régionalisation des services TER depuis le 1^{er} janvier 2002. Entre 1954 et 2019, le trafic voyageurs a été multiplié par 3,7 pour les trains régionaux d’Ile-de-France, et par 6,1 pour ceux de province.



Le trafic voyageurs des Grandes Lignes (actuels TGV et Intercités) a également fortement augmenté depuis 1954, malgré une période de ralentissement entre 1990 et 1995. Il a été multiplié par 3,2 entre 1954 et 2019. Le trafic voyageurs dans son ensemble (trains Grandes Lignes et trains régionaux de province et d’Ile-de-France) a été multiplié par 3,5 entre 1954 et 2019.

L’indicateur de fréquentation (voy-km/train-km) a connu une croissance irrégulière entre 1954 et 2019 pour l’ensemble des activités ferroviaires de voyageurs. Le nombre moyen de voyageurs par train a ainsi été multiplié par 2,7 pour les TER. Il a cru de 65% pour les trains régionaux d’Ile-de-France, atteignant 244 voyageurs/train en moyenne en 2019.



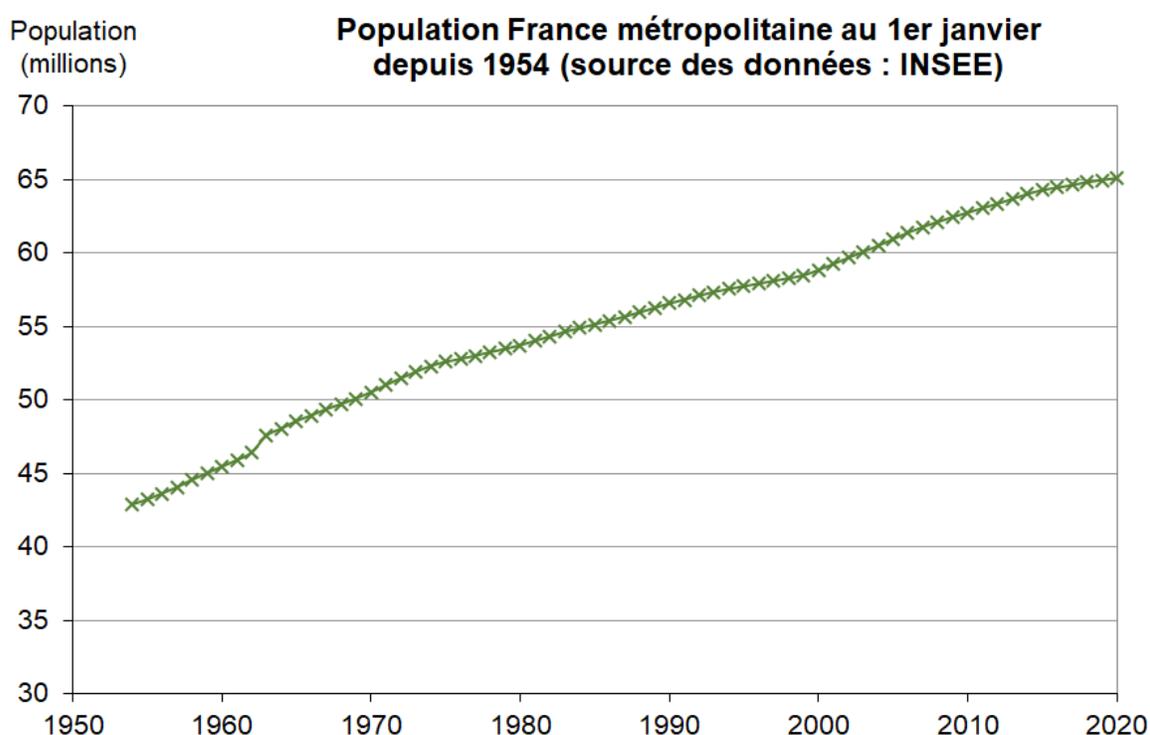


Concernant les trains Grandes Lignes, la croissance de l'indicateur a d'abord été très irrégulière entre 1954 et 2012, puis elle a été continue et très soutenue depuis 2012. Cette nette accélération de la croissance du nombre moyen de voyageurs par train peut probablement en partie s'expliquer par la suppression et/ou la sortie du périmètre Grandes Lignes de nombreuses lignes Intercités depuis 2012, par la mise en service de nouvelles LGV relativement courtes – comme les LGV Rhin-Rhône et Bretagne-Pays de la Loire – et de nouvelles rames TGV Duplex à deux niveaux, donc plus capacitaires. Le nombre moyen de voyageurs par train Grandes Lignes a ainsi été multiplié par 2 depuis 1954.

- **Contexte : évolution de la population de France métropolitaine et de la population francilienne depuis 1954 :**

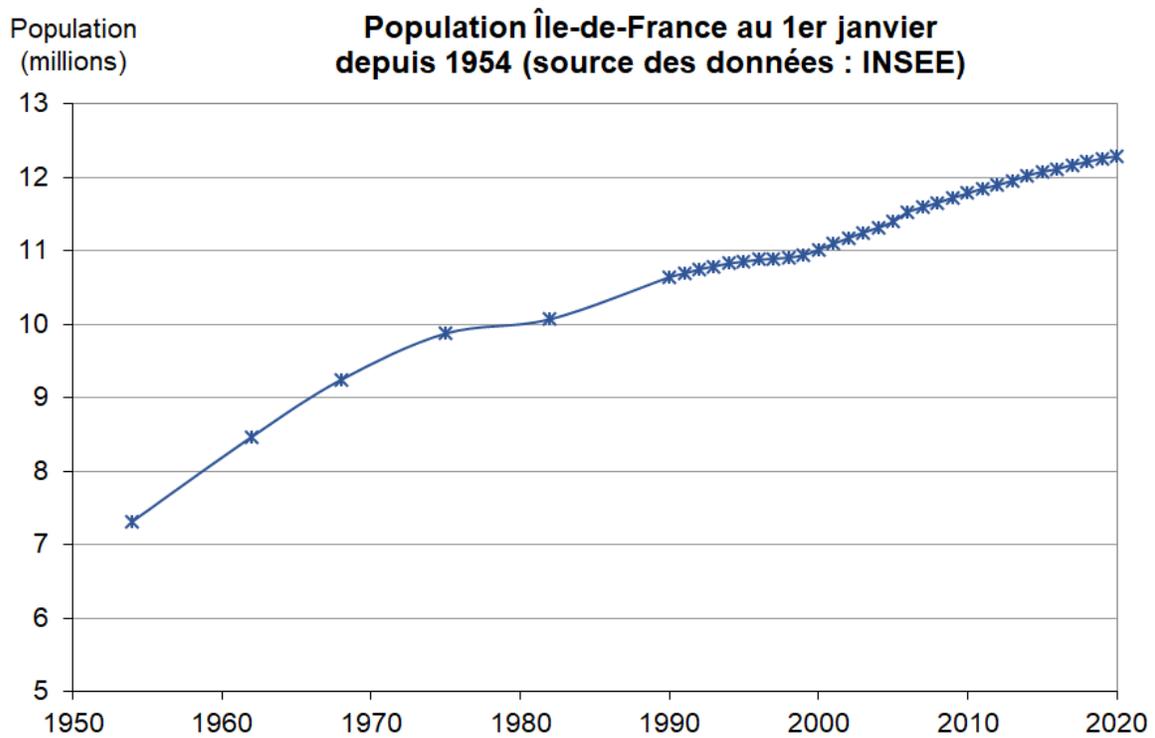
Pour contextualiser davantage ce travail, nous précisons ci-après l'évolution de la population de France métropolitaine et de la population francilienne depuis 1954, qui a probablement influé sur l'évolution du volume de trafic voyageurs-km décrite au point précédent - respectivement pour les activités voyageurs Grandes Lignes et TER, et Transilien en Île-de-France - et dont l'effet sur la ponctualité a été testé dans les modèles économétriques.

D'après l'INSEE⁵, la population de France métropolitaine au 1^{er} janvier a cru de 52% entre 1954 et 2020, passant de 42,9 à 65,1 millions d'habitants sur la période. Cela représente un taux de croissance annuel moyen de 0,6% sur cette période.



⁵ Source : 1946-2020 : Insee, Composantes de la croissance démographique, France métropolitaine - <https://www.insee.fr/fr/statistiques/1892117?sommaire=1912926>

D'après l'INSEE également⁶, la population francilienne au 1^{er} janvier a cru selon un rythme davantage soutenu encore, de 68% entre 1954 et 2020, passant de 7,3 à 12,3 millions d'habitants sur la période. Cela représente un taux de croissance annuel moyen de 0,8% sur cette période.



⁶ Sources : La population des régions de 1851 à 1999, IAURIF, 1999, d'après Recensement général de la population de 1990, Insee, 1990 ; Données harmonisées des recensements de la population à partir de 1968, Insee, 2022

2.3 Forme des modèles statistiques testés et implications statistiques

2.3.1 Forme des modèles statistiques testés

Des modèles économétriques de régression linéaire multiples ont été implémentés à l'aide du logiciel R pour décrire et interpréter la corrélation éventuelle entre l'évolution de la ponctualité depuis 1954 par service et l'évolution d'un déterminant supposé de cette ponctualité.

Deux formes de modèles ont été utilisées :

1. Des régressions linéaires multiples dont la variable expliquée est le taux de retard et les variables explicatives sont les différents déterminants supposés de la ponctualité. Ces modèles prennent la forme suivante (on suppose 1954 année initiale des séries chronologiques retenues) :

$$y_t = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \times x_{i,t} + \varepsilon_t$$

Avec

y_t la valeur du taux de retard de l'année t (t dans la période 1954 – 2019)

a_0 la constante de la régression linéaire

$x_{i,t}$ la valeur de la i-ème variable explicative pour l'année t

a_i la constante (indépendante du temps) associée à la i-ème variable explicative

ε_t le résidu (ou terme d'erreur) de l'estimation du taux de retard de l'année t

2. Des régressions linéaires multiples dont la variable expliquée est le logarithme népérien du taux de retard et les variables explicatives sont les différents déterminants supposés de la ponctualité. Ces modèles prennent la forme suivante (on suppose 1954 année initiale des séries chronologiques retenues) :

$$\ln(y_t) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \times x_{i,t} + \varepsilon_t,$$

ce que l'on peut réécrire sous la forme suivante :

$$y_t = A \times \prod_{i=1}^n e^{a_i \times x_{i,t}} + \varepsilon_t$$

Où y_t , a_0 , $x_{i,t}$, a_i , ε_t représentent les grandeurs introduites en 1. En revanche, le lien entre la variable expliquée y_t et les variables explicatives $x_{i,t}$ n'est plus linéaire mais exponentiel dans le cas de ces modèles.

2.3.2 Implications statistiques

Dans l'analyse statistique menée pour cette étude, les 65 observations du vecteur $(y_t, x_{1,t}, \dots, x_{n,t})$ avec $t \in \{1954, 2019\}$ sont assimilées à des tirages indépendants des variables aléatoires $(Y_t, X_{1,t}, \dots, X_{n,t})$, **qui ne sont pas traitées comme $n + 1$ séries temporelles.**

En effet, les résultats de régressions linéaires sur des séries temporelles ne sont valables que si ces séries temporelles sont **stationnaires**, c'est-à-dire si sa structure n'évolue pas avec le temps.

Or des tests statistiques menés sur les séries temporelles de la variable expliquée (taux de retard) et des variables explicatives (effectifs du personnel SNCF, âge moyen du matériel roulant, âge moyen des voies ferroviaires, intensité d'utilisation des lignes ferroviaires) nous montrent que **ces séries temporelles sont non-stationnaires car elles présentent une tendance** (ou trend en anglais).

Dans une telle situation, le modèle de régression linéaire n'est plus valable du fait de l'autocorrélation des séries temporelles. Cette notion désigne la corrélation de la variable par rapport à une version décalée d'elle-même dans le temps. Par exemple, si le taux de retard de l'année 1980 est corrélé avec celui de l'année 1979, on dit qu'il y a autocorrélation.

La modélisation de la corrélation entre des séries temporelles non stationnaires (présentant un trend) nécessite d'utiliser des modèles poussés de type ARIMAX (*Auto Regressive Integrated Moving Average with eXternal inputs*) qui dépassent le champ de cette étude.

Ici, on s'affranchit ici des effets d'autocorrélation et de non stationnarité des séries temporelles étudiées et on considère les 65 observations $(y_t, x_{1,t}, \dots, x_{n,t})$ avec $t \in \{1954, 2019\}$ comme des tirages indépendants de variables aléatoires sans tenir compte de la dimension temporelle sous-jacente.

Par conséquent, **les éventuelles relations de corrélation mises en évidence par les modèles utilisés doivent être considérées avec prudence et non comme des liens de causalité généraux valables en dehors de la période d'étude [1954-2019].**

3. RESULTATS

3.1 Note de lecture des résultats des tests statistiques

Pour chaque modèle de régression retenu, des résultats portant sur la significativité du modèle et de l'impact des déterminants supposés de la ponctualité sur cette ponctualité sont fournis dans la section suivante.

Un test de Student est utilisé pour décrire la significativité de l'influence d'un déterminant supposé de la ponctualité sur cette ponctualité. Il porte sur la nullité du coefficient a_i associé au i -ème déterminant supposé de la ponctualité $X_{i,t}$, selon l'hypothèse nulle H_0 et l'hypothèse alternative H_1 suivantes :

$$H_0: a_i = 0$$

$$H_1: a_i \neq 0$$

Les résultats du test de Student permettent de savoir si l'on peut rejeter ou non l'hypothèse nulle H_0 . Si on choisit de rejeter l'hypothèse nulle H_0 et d'accepter l'hypothèse alternative H_1 , on considère que l'effet du i -ème déterminant supposé de la ponctualité sur la ponctualité est significatif. Si on choisit d'accepter l'hypothèse nulle H_0 , on considère qu'on ne peut pas conclure qu'il y a un effet du i -ème déterminant supposé de la ponctualité sur cette ponctualité d'après le modèle retenu.

La p-value associée au test de Student appliqué à un coefficient représente la probabilité de rejeter l'hypothèse nulle H_0 de nullité de ce coefficient, alors qu'elle vraie. Ici, plus la p-value est petite, plus la probabilité de faire une erreur en concluant qu'il y a un effet significatif du i -ème déterminant supposé de la ponctualité sur la ponctualité est faible.

En pratique, pour savoir si l'on doit ou non rejeter l'hypothèse nulle, on peut comparer la p-value à un seuil de significativité. Si la p-value est inférieure au seuil, on conclut qu'il y a un effet du i -ème déterminant supposé de la ponctualité sur la ponctualité. Dans le cas contraire, on ne peut pas conclure avec certitude à l'existence d'un effet (même très faible) du i -ème déterminant supposé de la ponctualité sur la ponctualité. En pratique, un seuil de significativité de 0,05 est souvent utilisé.

Dans le logiciel R, les résultats de la modélisation portant sur les coefficients des différentes variables explicatives du modèle sont présentés sous forme de tableau avec :

- En colonne "Estimate" la valeur estimée du coefficient ;
- En colonne "Std. Error" l'écart-type de cette estimation ;
- En colonne "t value" la statistique du test de Student ;
- En colonne "Pr(>|t|)" la p-value associée au test de Student.

Dans le tableau de résultats de la régression modélisée, sont précisés à droite des p-value des codes indiquant le niveau de significativité atteint :

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Pour chaque modèle, la significativité du modèle dans son ensemble est caractérisée à l'aide d'un test de Fisher et du calcul du coefficient de détermination R^2 ajusté, dont les résultats sont également fournis dans la section suivante :

- Le coefficient de détermination ajusté « R^2 ajusté » quantifie la part de la variance expliquée par le modèle. Le coefficient de détermination non ajusté « R^2 » augmente généralement à mesure que l'on ajoute des variables dans le modèle – donc des degrés de liberté. Pour s'affranchir de cet effet, on utilise le coefficient de détermination ajusté, qui est corrigé du nombre de degrés de liberté ;
- Le test de Fisher caractérise la significativité globale du modèle et porte sur la nullité de l'ensemble des coefficients des variables explicatives du modèle, selon l'hypothèse nulle H_0 et l'hypothèse alternative H_1 suivantes :

H_0 : tous les coefficients sont nuls

H_1 : un des coefficients au moins est non nul

Les résultats du test de Fisher permettent de savoir si l'on peut rejeter ou non l'hypothèse nulle H_0 . Si on choisit de la rejeter, on considère que le modèle permet d'expliquer une part significative de l'évolution de la ponctualité des trains en France depuis 1954. Si on choisit d'accepter l'hypothèse nulle H_0 et de rejeter l'hypothèse alternative H_1 , on considère qu'on ne peut pas conclure avec certitude que le modèle retenu permet d'expliquer une part significative de l'évolution de la ponctualité des trains en France depuis 1954.

Pour savoir si l'on doit ou non rejeter l'hypothèse nulle, on peut alors comparer la p-value à un seuil de significativité. Si la p-value est inférieure au seuil, on rejette l'hypothèse nulle et on accepte l'hypothèse alternative.

Dans le logiciel R, les résultats portant sur la significativité du modèle dans son ensemble sont fournis en-dessous du tableau des coefficients :

- "Residual standard error" est la somme des carrés résiduels correspondant à la variabilité non-expliquée par le modèle ;
- "Multiple R-squared" est le coefficient de détermination R^2 qui quantifie la part de la variance expliquée par le modèle. Cet indicateur augmente généralement à mesure que l'on ajoute des variables dans le modèle – donc des degrés de liberté. Pour s'affranchir de cet effet, on utilise le coefficient de détermination ajusté, présenté ci-après ;

- "Adjusted R-squared" est le coefficient de détermination ajusté ou R^2 ajusté, il s'agit du coefficient de détermination R^2 corrigé du nombre de degrés de liberté ;
- "F-statistic" est la statistique du test de Fisher ;
- "p-value" est la p-value associée au test de Fisher.

3.2 Résultats de la modélisation statistique

3.2.1 Ponctualité des trains régionaux de province à 5 minutes :

Un premier modèle de régression linéaire visant à expliquer l'évolution depuis 1954 du taux de retard à 5 minutes des trains TER a été implémenté. L'influence des déterminants supposés de la ponctualité suivants a été testée :

- L'âge moyen des automotrices électriques : d'après les données de l'OpenData SNCF, elles représentent près de 40% du matériel moteur TER en 2019 ;
- L'âge moyen des automotrices thermiques : d'après les données de l'OpenData SNCF, elles représentent près de 25% du matériel moteur TER en 2019 ;
- L'âge moyen des voitures TER remorquées, principal constituant du matériel remorqué TER ;
- L'âge moyen des voies du RFN des catégories UIC 5-6 : ces voies composent la majorité des lignes parcourues par les trains TER ;
- L'intensité d'utilisation du RFN par les services TER.

Les résultats des tests statistiques effectués pour ce modèle sont synthétisés dans le tableau suivant :

```
Call:
lm(formula = TauxRetardTER5 ~ AgeMoyenVoituresTER + AgeMoyenAutomotricesElec +
  AgeMoyenAutomotricesThermiques + AgeMoyenUIC5.6 + IntensiteUsageRFN_TER +
  VoyKmTER + VoyParTrainTER, data = data_PonctuTER)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-2.4054 -0.6210 -0.0133  0.5569  3.4028

Coefficients:
                Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)      -6.12487    2.77205  -2.210  0.03110 *
AgeMoyenVoituresTER
                  0.04695    0.03208   1.463  0.14873
AgeMoyenAutomotricesElec
                  0.11165    0.09294   1.201  0.23451
AgeMoyenAutomotricesThermiques
                  0.01126    0.06023   0.187  0.85238
AgeMoyenUIC5.6   -0.11681    0.09756  -1.197  0.23604
IntensiteUsageRFN_TER
                  0.07094    0.02426   2.924  0.00492 **
VoyKmTER         -1.51061    0.61705  -2.448  0.01741 *
VoyParTrainTER    0.17706    0.07080   2.501  0.01524 *
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 1.186 on 58 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.635,    Adjusted R-squared:  0.591
F-statistic: 14.42 on 7 and 58 DF,  p-value: 1.073e-10
```

D'après ce modèle, seuls l'intensité d'utilisation du RFN par les services TER et le nombre moyen de voyageurs par TER ont eu un effet significatif au seuil de 5% - et de signe cohérent - sur la ponctualité des trains TER depuis 1954.

Un second modèle plus performant a été retenu. Il s'agit d'un modèle de régression linéaire dont les variables explicatives sont :

- L'âge moyen des automotrices thermiques ;
- L'âge moyen des voitures TER remorquées, principal constituant du matériel remorqué TER ;
- L'intensité d'utilisation du RFN par les services TER.

```
Call:
lm(formula = TauxRetardTER5 ~ AgeMoyenVoituresTER + AgeMoyenAutomotricesThermiques +
    IntensiteUsagerFN_TER, data = data_PonctuTER)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-2.7290 -0.8794  0.0309  0.8012  3.2542

Coefficients:
                Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)      0.169480   1.165652    0.145  0.88488
AgeMoyenVoituresTER  0.076964   0.023800    3.234  0.00197 **
AgeMoyenAutomotricesThermiques 0.110296   0.038779    2.844  0.00605 **
IntensiteUsagerFN_TER  0.018466   0.002796    6.604  1.1e-08 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 1.23 on 61 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.5745,    Adjusted R-squared:  0.5536
F-statistic: 27.46 on 3 and 61 DF,  p-value: 2.316e-11
```

D'après les résultats du test de Student de nullité de chaque coefficient, les effets des variables explicatives retenues sont significatifs au seuil de 1%.

Près de 55% de la variance du taux de retard annuel des TER sont expliqués par le modèle. D'après les résultats du test de Fisher, on rejette l'hypothèse nulle de nullité de l'ensemble des coefficients au seuil de significativité 0,1%.

Selon le modèle retenu, toutes choses égales par ailleurs, un vieillissement de 9 ans du parc des automotrices thermiques a engendré sur la période 1954-2019 une hausse moyenne de 1 point du taux de retard des trains TER. En effet, le risque de panne du matériel moteur augmente à mesure qu'il vieillit.

Un vieillissement de 13 ans du parc des voitures remorquées TER a engendré une hausse moyenne de 1 point du taux de retard des trains TER sur la période 1954-2019. Entre 1954 et 2019, le parc des voitures remorquées TER a vieilli de 23 ans d'après notre modèle de parc, engendrant d'après le modèle retenu une hausse du taux de retard de près de 1,8 points. En effet, le risque de dysfonctionnement du matériel remorqué augmente à mesure qu'il vieillit.

D'après ce modèle, sur la période 1954-2019, un doublement de l'intensité d'utilisation du RFN par les services TER par rapport au niveau de 1954 a engendré une hausse moyenne de 1,8 points du taux de retard des TER. Entre 1954 et 2019, l'intensité d'utilisation du RFN par les services TER a été multipliée par 3,2 engendrant d'après le modèle retenu une hausse du taux de retard de près de 4

points. Une intense utilisation des lignes ferroviaires est en effet susceptible d'user les voies. Elle augmente donc le risque d'incidents liés à l'état de la voie à long terme, pouvant entraîner des retards.

3.2.2 Ponctualité des trains régionaux d'Ile-de-France à 5 minutes :

Un premier modèle de régression linéaire visant à expliquer l'évolution depuis 1954 du taux de retard à 5 minutes des trains d'Ile-de-France a été implémenté. L'influence des déterminants supposés de la ponctualité suivants a été testée :

- L'âge moyen des automotrices électriques : d'après les données de l'OpenData SNCF, elles représentent près de 84% du matériel moteur Transilien en 2019 ;
- L'âge moyen des automotrices thermiques : d'après les données de l'OpenData SNCF, elles représentent seulement 3% du matériel moteur Transilien en 2019 ;
- L'âge moyen des voitures Transilien remorquées, principal constituant du matériel remorqué pour les trains régionaux d'Ile-de-France ;
- L'âge moyen des lignes ferroviaires en Ile-de-France ;
- L'intensité d'utilisation des lignes ferroviaires en Ile-de-France par les services Transilien ;
- Le volume de trafic voyageurs-kilomètres ;
- Le nombre moyen de voyageurs par train TER.

Les résultats des tests statistiques effectués pour ce modèle sont synthétisés dans le tableau suivant :

```
Call:
lm(formula = TauxRetardIDF5 ~ AgeMoyenVoituresIDF + AgeMoyenAutomotricesElec +
  AgeMoyenAutomotricesThermiques + AgeMoyenLignesIDF_UIC2.6 +
  IntensiteUsageLignesIDF + VoyKmIDF + VoyParTrainIDF, data = data_PonctuIDF)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-1.38340 -0.32789  0.04236  0.31386  1.42520

Coefficients:
                Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)      12.51062     3.41174   3.667 0.000535 ***
AgeMoyenVoituresIDF
-0.01576     0.04408  -0.357 0.722061
AgeMoyenAutomotricesElec
 0.08923     0.09236   0.966 0.337991
AgeMoyenAutomotricesThermiques
 0.04440     0.03673   1.209 0.231682
AgeMoyenLignesIDF_UIC2.6
 0.09846     0.02774   3.549 0.000774 ***
IntensiteUsageLignesIDF
-0.10305     0.02045  -5.040 4.85e-06 ***
VoyKmIDF
 2.80922     0.45241   6.209 6.14e-08 ***
VoyParTrainIDF
-0.10012     0.02224  -4.501 3.31e-05 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.6188 on 58 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9713,    Adjusted R-squared:  0.9678
F-statistic: 280.2 on 7 and 58 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

D'après le signe des coefficients de la régression modélisée, seuls le volume du trafic en voy-km et l'âge moyen des lignes du réseau francilien présentent un effet significatif au seuil 5% sur la

punctualité des trains régionaux d’Ile-de-France et de signe cohérent avec l’intuition. D’après ce premier modèle, l’impact de ces déterminants de la punctualité est significatif au seuil 0,1%.

Un second modèle plus performant a été retenu. Il s’agit d’un modèle exponentiel dont les variables explicatives sont :

- L’âge moyen des voitures Transilien remorquées ;
- L’âge moyen des lignes ferroviaires en Ile-de-France ;
- Le nombre moyen de voyageur par train.

```
Call:
lm(formula = log(TauxRetardIDF5) ~ AgeMoyenVoituresIDF + AgeMoyenLignesIDF_UIC2.6 +
  VoyParTrainIDF, data = data_PonctuIDF)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.65891 -0.18923 -0.01405  0.18730  0.49709

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)   -3.951072   0.236889  -16.679 < 2e-16 ***
AgeMoyenVoituresIDF
              0.009442   0.004698   2.010  0.0488 *
AgeMoyenLignesIDF_UIC2.6
              0.084190   0.006280  13.405 < 2e-16 ***
VoyParTrainIDF
              0.015639   0.001712   9.137 4.33e-13 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.2641 on 62 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9183,    Adjusted R-squared:  0.9144
F-statistic: 232.4 on 3 and 62 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

D’après les résultats du test de Student de nullité de chaque coefficient, l’effet de l’âge moyen des voitures Transilien remorquées est significatif au seuil 5%, et ceux des autres variables explicatives retenues le sont au seuil de 0,1%.

Près de 91% de la variance du taux de retard annuel des trains régionaux d’Ile-de-France sur la période 1954-2019 sont expliqués par le modèle. D’après les résultats du test de Fisher, on rejette l’hypothèse nulle de nullité de l’ensemble des coefficients au seuil de significativité 0,1%.

Selon le modèle retenu, toutes choses égales par ailleurs, un vieillissement de 10 ans du parc des voitures Transilien remorquées sur la période 1954-2019 a engendré en moyenne une multiplication par 1,1 du taux de retard des trains régionaux d’Ile-de-France, soit une augmentation de 10%. En effet, le risque de dysfonctionnement du matériel remorqué augmente à mesure qu’il vieillit. Entre 1954 et 2019, le parc des voitures remorquées Transilien a vieilli de 18 ans d’après notre modèle de parc, engendrant d’après le modèle retenu une augmentation du taux de retard de 19%.

D’après ce modèle, sur la période 1954-2019, toutes choses égales par ailleurs, un vieillissement de 10 ans des voies ferroviaires en Ile-de-France a engendré en moyenne une multiplication par 2,3 du taux de retard des trains régionaux d’Ile-de-France. Entre 1954 et 2019, les lignes ferroviaires d’Ile-

de-France ont vieilli de 14,1 ans d'après notre modèle de parc, ce qui a conduit à une multiplication par 3,3 selon le modèle retenu. En effet, des lignes ferroviaires vétustes peuvent connaître des défaillances, ou encore nécessiter le recours à des limitations temporaires de vitesse pour préserver la sécurité des voyageurs et des installations, notamment en cas de fortes chaleurs.

Le modèle retenu indique également que, toutes choses égales par ailleurs, une hausse du nombre moyen de voyageurs par train Transilien de 10 voyageurs sur la période 1954-2019 a engendré une augmentation moyenne de 17% du taux de retard. Le transport d'un plus grand nombre de voyageurs par train implique un risque supplémentaire d'occurrence d'un retard lié aux voyageurs (malaises voyageurs, blocage des portes durant le temps d'échange voyageurs lors d'un arrêt, déclenchement légitime ou non du signal d'alarme par un voyageur entraînant des retards, retards liés aux bagages oubliés, etc.). Entre 1954 et 2019, le nombre moyen de voyageurs par train Transilien a augmenté d'environ 96 voyageurs/train, engendrant d'après le modèle multiplication par 4,5 des retards.

3.2.3 Ponctualité des trains Grandes Lignes à 15 minutes :

- **Modélisation sur la période 1954-2019 complète :**

Un premier modèle de régression linéaire visant à expliquer l'évolution depuis 1954 du taux de retard à 15 minutes des trains Grandes Lignes a été implémenté. L'influence des déterminants supposés de la ponctualité suivants a été testée :

- Le nombre de jours de grève par agents et par année ;
- L'âge moyen des locomotives électriques, qui ont constitué une part prépondérante du matériel moteur des services Grandes Lignes sur la période ;
- L'âge moyen des locomotives Diesel, qui ont également constitué une part importante du matériel moteur des services Grandes Lignes sur la période ;
- L'âge moyen des lignes ferroviaires UIC 2-4 du RFN, qui composent la grande majorité des Grandes Lignes du réseau ;
- L'intensité d'utilisation du RFN en Ile-de-France par les services Grandes Lignes ;
- Le volume de trafic voyageurs-km pour les services Grandes Lignes ;
- Le nombre moyen de voyageurs par train Grandes Lignes.

Les résultats des tests statistiques effectués pour ce modèle sont synthétisés dans le tableau suivant :

```

Call:
lm(formula = TauxRetardGL15 ~ NbJoursGrèvesParAgent + AgeMoyenLocElec +
    AgeMoyenLocDiesel + AgeMoyenUIC2.4 + IntensiteUsageRFN_GL +
    VoyKmGL + VoyParTrainGL, data = data_PonctuGL_1954)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-1.2770 -0.7071 -0.1981  0.6141  2.4985

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)   -12.392871    4.208881  -2.944  0.00465 **
NbJoursGrèvesParAgent -0.029049    0.071581  -0.406  0.68637
AgeMoyenLocElec    0.036172    0.102059   0.354  0.72431
AgeMoyenLocDiesel -0.006525    0.041022  -0.159  0.87417
AgeMoyenUIC2.4    0.109945    0.077535   1.418  0.16154
IntensiteUsageRFN_GL 0.056509    0.038680   1.461  0.14943
VoyKmGL        -0.334920    0.165938  -2.018  0.04819 *
VoyParTrainGL    0.067133    0.022448   2.991  0.00408 **
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.9543 on 58 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8046,    Adjusted R-squared:  0.781
F-statistic: 34.11 on 7 and 58 DF,  p-value: < 2.2e-16

```

Selon cette première régression, seul le nombre moyen de voyageurs par train Grandes Lignes présente un effet significatif au seuil 5% sur le taux de retard, et dont le signe ne s’oppose pas à l’intuition.

Un second modèle plus performant a été retenu. Il s’agit d’un modèle exponentiel dont les variables explicatives sont :

- L’âge moyen des locomotives électriques ;
- L’âge moyen des lignes ferroviaires les plus fréquentées du RFN (UIC 2-4) ;
- Le nombre moyen de voyageurs par train Grandes Lignes.

```

Call:
lm(formula = log(TauxRetardGL15) ~ AgeMoyenUIC2.4 + AgeMoyenLocElec +
  VoyParTrainGL, data = data_PonctuGL_1954)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.35474 -0.14752 -0.00432  0.11413  0.56237

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  -0.0286254  0.1644212  -0.174  0.862356
AgeMoyenUIC2.4  0.0287252  0.0095384   3.012  0.003758 **
AgeMoyenLocElec 0.0197443  0.0056691   3.483  0.000916 ***
VoyParTrainGL  0.0027875  0.0009271   3.007  0.003810 **
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.1934 on 62 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.744,    Adjusted R-squared:  0.7316
F-statistic: 60.06 on 3 and 62 DF,  p-value: < 2.2e-16

```

D'après les résultats du test de Student de nullité de chaque coefficient, les effets des variables explicatives retenues sont tous significatifs au seuil de 1%.

Près de 73% de la variance du taux de retard annuel des services Grandes Lignes sur la période 1954-2019 sont expliqués par le modèle. D'après les résultats du test de Fisher, on rejette l'hypothèse nulle de nullité de l'ensemble des coefficients au seuil de significativité 0,1%.

Selon le modèle retenu, toutes choses égales par ailleurs, un vieillissement de 10 ans du parc des locomotives électriques sur la période 1954-2019 a engendré en moyenne une multiplication par 1,22 du taux de retard des services Grandes Lignes, soit une augmentation de 22%. Entre 1954 et 2019, le parc des locomotives électriques a vieilli de 21,5 ans d'après notre modèle de parc, engendrant d'après le modèle retenu une augmentation du taux de retard de 53%.

D'après ce modèle, sur la période 1954-2019, toutes choses égales par ailleurs, un vieillissement de 10 ans des lignes ferroviaires UIC2-4 – qui composent la quasi-totalité des grandes lignes en France - a engendré en moyenne une multiplication par 1,33 du taux de retard des trains Grandes Lignes. Entre 1954 et 2019, les lignes ferroviaires UIC 2-4 ont vieilli de 9,9 ans d'après notre modèle de parc, ce qui a conduit à une augmentation d'1/3 du taux de retard selon le modèle retenu.

Le modèle retenu suggère également que, toutes choses égales par ailleurs, une hausse du nombre moyen de voyageurs par train Grandes Lignes de 100 voyageurs sur la période 1954-2019 a engendré une augmentation moyenne d'1/3 du taux de retard. Pour les mêmes raisons que celles évoquées au paragraphe précédent pour les trains régionaux d'Ile-de-France, le transport d'un plus grand nombre de voyageurs par train implique un risque supplémentaire d'occurrence d'un retard lié aux voyageurs. Entre 1954 et 2019, le nombre moyen de voyageurs par train Grandes Lignes a doublé, engendrant d'après le modèle une multiplication par 1,9 des retards.

- **Modélisation sur la période 1981-2019 :**

La modélisation précédente ne prend pas en compte l'évolution de l'âge moyen des rames TGV, des lignes LGV, de l'intensité d'utilisation de ces lignes par les trains TGV, du volume de trafic voy-km pour les TGV, et du nombre moyen de voyageurs par TGV depuis 1981, date de mise en service de la première LGV. En effet, toutes les variables de la régression doivent couvrir la même période temporelle, et la modélisation précédente avait pour but de décrire l'évolution de la ponctualité des trains Grandes Lignes depuis 1954. Une autre modélisation a donc été réalisée en se restreignant à la période 1981-2019 afin d'intégrer les variables portant sur les LGV et les TGV.

Un premier modèle de régression linéaire a été implémenté. L'influence des déterminants supposés de la ponctualité des trains Grandes Lignes suivants a été testée :

- Le nombre de jours de grève par agents et par année ;
- L'âge moyen des locomotives électriques, représentant près de 22% du matériel moteur Grandes Lignes en 2019 (données OpenData SNCF) ;
- L'âge moyen des locomotives Diesel ;
- L'âge moyen des rames TGV, représentant 2/3 du matériel moteur Grandes Lignes en 2019 (données OpenData SNCF) ;
- L'âge moyen des lignes ferroviaires UIC 2-4 du RFN, qui composent la grande majorité des Grandes Lignes du réseau ;
- L'âge moyen des lignes LGV ;
- L'intensité d'utilisation du RFN en Ile-de-France par les services Grandes Lignes ;
- L'intensité d'utilisation des lignes LGV par les TGV ;
- Le volume de trafic voy-km des services TGV ;
- Le nombre moyen de voyageurs par TGV.

Les résultats des tests statistiques effectués pour ce modèle sont synthétisés dans le tableau ci-dessous :

```

Call:
lm(formula = TauxRetardGL15 ~ NbJoursGrèvesParAgent + AgeMoyenLocElec +
  AgeMoyenLocDiesel + AgeMoyenTGV + AgeMoyenUIC2.4 + AgeMoyenLGV +
  IntensiteUsageRFN_GL + IntensiteUsageLGV + VoyKmTGV + VoyParTGV,
  data = data_PonctuGL_1981)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.9137 -0.5209 -0.1278  0.3479  1.7701

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  4.883e+00  5.551e+00   0.880   0.3866
NbJoursGrèvesParAgent  1.634e-01  1.464e-01   1.116   0.2740
AgeMoyenLocElec      4.548e-02  1.014e-01   0.448   0.6573
AgeMoyenLocDiesel   -3.409e-02  5.726e-02  -0.595   0.5564
AgeMoyenTGV         3.882e-02  1.999e-01   0.194   0.8474
AgeMoyenUIC2.4      2.253e-02  9.745e-02   0.231   0.8188
AgeMoyenLGV        -1.943e-01  1.746e-01  -1.113   0.2752
IntensiteUsageRFN_GL -3.961e-02  4.578e-02  -0.865   0.3942
IntensiteUsageLGV    6.244e-06  2.042e-03   0.003   0.9976
VoyKmTGV           1.454e-01  5.888e-02   2.470   0.0199 *
VoyParTGV           6.659e-03  4.153e-03   1.603   0.1201
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.7744 on 28 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8942,    Adjusted R-squared:  0.8564
F-statistic: 23.67 on 10 and 28 DF,  p-value: 4.436e-11

```

D'après les coefficients de la régression modélisée, et les résultats du test de Student sur ces différents coefficients avec cette première régression, seul le volume de trafic voy-km présente un effet significatif au seuil 5% sur la ponctualité des services Grandes Lignes depuis 1981.

Un second modèle plus performant a donc été retenu. Il s'agit d'un modèle exponentiel dont les variables explicatives sont :

- Le volume de trafic des services TGV en voy-km ;
- Le nombre moyen de voyageurs par TGV ;
- Le nombre annuel de journées perdues par agent SNCF du fait de mouvements sociaux.

```

Call:
lm(formula = log(TauxRetardGL15) ~ VoyKmTGV + VoyParTGV + NbJoursGrèvesParAgent,
    data = data_PonctuGL_1981)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.222867 -0.078449 -0.006329  0.083049  0.242649

Coefficients:
                Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)      0.8351810   0.1428499    5.847 1.23e-06 ***
VoyKmTGV         0.0149345   0.0010627   14.054 5.87e-16 ***
VoyParTGV        0.0011549   0.0004069    2.838  0.0075 **
NbJoursGrèvesParAgent 0.0335513   0.0149961    2.237  0.0317 *
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.1109 on 35 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8912,    Adjusted R-squared:  0.8819
F-statistic: 95.55 on 3 and 35 DF,  p-value: < 2.2e-16

```

D'après les résultats du test de Student de nullité de chaque coefficient, l'effet du nombre de jours de grève par agent SNCF est significatif au seuil 5%, celui du nombre moyen de voyageurs par TGV l'est au seuil de 1%, et celui du volume de trafic TGV l'est au seuil 0,1%.

Près de 88% de la variance du taux de retard annuel des services Grandes Lignes sur la période 1981-2019 sont expliqués par le modèle. D'après les résultats du test de Fisher, on rejette l'hypothèse nulle de nullité de l'ensemble des coefficients au seuil de significativité 0,1%.

Selon le modèle retenu, toutes choses égales par ailleurs, une hausse de 10 milliards de voy-km du volume de trafic TGV a engendré en moyenne une hausse de 16% des retards des trains Grandes Lignes sur la période 1981-2019. Entre 1982 (première année complète du service TGV) et 2019, le volume de trafic TGV a cru de 56 milliards de voy-km environ, engendrant d'après le modèle retenu une multiplication par 2,3 du taux de retard. En effet, un niveau de trafic voy-km élevé amène l'opérateur TGV à réduire la durée de l'intervalle entre 2 trains dans sa grille horaire, et peut le contraindre à mener une exploitation proche des limites de capacité des infrastructures sur certaines lignes ou tronçons de ligne du réseau LGV ou du réseau classique. Davantage de retards liés aux situations de congestion peuvent alors survenir, et ces retards se propagent souvent d'un train aux suivants par effet de réseau, notamment aux heures de pointe.

D'après ce modèle, toutes choses égales par ailleurs, une hausse du nombre moyen de voyageurs par train Grandes Lignes de 100 voyageurs a engendré sur la période 1981-2019 une augmentation moyenne de 12% du taux de retard. Pour les mêmes raisons que celles évoquées pour les trains régionaux d'Ile-de-France et les trains Grandes Lignes sur la période 1954-2019, le transport d'un plus grand nombre de voyageurs par train implique un risque supplémentaire d'occurrence d'un retard lié aux voyageurs. Entre 1982 et 2019, le nombre moyen de voyageurs par TGV a cru de 121 voyageurs, engendrant d'après le modèle une augmentation de 15% du taux de retard des trains Grandes Lignes.

Le modèle retenu suggère également que, toutes choses égales par ailleurs, une hausse d'1 jour perdu par agent SNCF du fait des grèves a provoqué en moyenne sur la période 1981-2019 une augmentation de 3% des retards. Pour les mêmes raisons que celles évoquées au paragraphe précédent pour les trains régionaux d'Ile-de-France, le transport d'un plus grand nombre de voyageurs par train implique un risque supplémentaire d'occurrence d'un retard lié aux voyageurs. En 2019, 2,6 jours supplémentaires par agent SNCF ont été perdus du fait des grèves par rapport à 1982, engendrant d'après le modèle une augmentation de 9% des retards.

3.2.4 Ponctualité globale (pondérée du nombre de circulations par service)

Un premier modèle de régression linéaire visant à expliquer l'évolution depuis 1954 du taux de retard global pondéré du nombre de circulations par service (ponctualité à 5 min pour les services TER et Transilien et à 15 min pour les services Grandes Lignes) a été implémenté. L'influence des déterminants supposés de la ponctualité suivants a été testée :

- Le nombre de jours de grève par agents et par année ;
- Les effectifs du personnel de l'EPIC SNCF ;
- L'âge moyen du matériel moteur, estimé à l'aide d'une moyenne pondérée des effectifs des différents types constituant le parc (locomotives électriques, rames TGV, automotrices thermiques, etc.) ;
- L'âge moyen du Réseau Ferré National ;
- L'intensité d'utilisation du RFN par l'ensemble des services voyageurs de la SNCF ;
- Le volume du trafic pour l'ensemble des activités voyageurs en voy-km ;
- Le nombre moyen de voyageurs par train sur l'ensemble des activités voyageurs.

Les résultats des tests statistiques effectués pour ce modèle sont synthétisés dans le tableau suivant :

```

Call:
lm(formula = TauxRetardGlobal ~ NbJoursGrèvesParAgent + EffectifPersonnelEpicSNCF +
    AgeMoyenMatérielMoteur + AgeMoyenRFN + IntensiteUsageRFN +
    VoyKm + VoyParTrain, data = data_PonctuGlobale)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-1.30848 -0.56135 -0.06324  0.43522  2.49525

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)   -0.07565    6.90845  -0.011 0.991301
NbJoursGrèvesParAgent  0.07124    0.05727   1.244 0.218502
EffectifPersonnelEpicSNCF -0.04866    0.03702  -1.314 0.193904
AgeMoyenMatérielMoteur  -0.09892    0.07642  -1.294 0.200660
AgeMoyenRFN      -0.25947    0.11806  -2.198 0.031977 *
IntensiteUsageRFN   0.08505    0.02344   3.629 0.000603 ***
VoyKm            -0.16845    0.09906  -1.700 0.094401 .
VoyParTrain       0.05472    0.03120   1.754 0.084727 .
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.7953 on 58 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9001,    Adjusted R-squared:  0.8881
F-statistic: 74.68 on 7 and 58 DF,  p-value: < 2.2e-16

```

D'après le signe des coefficients de la régression modélisée, une augmentation des effectifs de personnel de la SNCF, un vieillissement du parc du matériel moteur ou du RFN ont engendré des baisses du taux de retard des trains en France sur la période 1954-2019, ce qui n'est pas cohérent avec l'intuition quant à l'impact de ces déterminants de la ponctualité. Ils n'ont donc pas été retenus pour la seconde modélisation. Afin préciser plus finement l'existence ou non d'un lien de corrélation entre la baisse des effectifs de l'EPIC SNCF depuis 1954 et l'évolution de la ponctualité des trains en France, nous avons également émis l'hypothèse d'existence d'un retard entre la baisse des effectifs et son impact sur la ponctualité. Nous avons testé cette hypothèse en remplaçant dans le modèle précédent la variable « effectifs du personnel de l'EPIC SNCF » par le niveau de ces effectifs 5 années auparavant, puis par la moyenne du niveau des effectifs sur les 5 années précédentes. De même que précédemment, les résultats de ces nouveaux modèles, présentés en Annexe, indiquent également que la diminution des effectifs de la SNCF a engendré une hausse du taux de retard sur la période 1954-2019, ce qui n'est pas cohérent avec l'intuition quant à son impact sur la ponctualité.

En revanche, le signe du coefficient associé à l'intensité d'usage du RFN par l'ensemble des services voyageurs est cohérent avec l'intuition relative à son effet sur la ponctualité, et l'impact de cette variable est significatif au seuil 0,1%.

Un second modèle plus performant a été retenu. Il s'agit d'un modèle linéaire simple dont la seule variable explicative est l'intensité d'usage du RFN par l'ensemble des services voyageurs.

```

Call:
lm(formula = TauxRetardGlobal ~ IntensiteUsageRFN, data = data_PonctuGlobale)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-1.6997 -0.6304 -0.1047  0.2630  3.2892

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)   -0.780478   0.388087  -2.011  0.0486 *
IntensiteUsageRFN  0.033649   0.001891  17.790 <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.9595 on 63 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.834,    Adjusted R-squared:  0.8314
F-statistic: 316.5 on 1 and 63 DF,  p-value: < 2.2e-16

```

D'après les résultats du test de Student de nullité de chaque coefficient, l'effet de la variable explicative retenue est significatif au seuil de 0,1%, et celui de la constante de régression l'est au seuil 1%.

Plus de 83% de la variance du taux de retard globale pondéré sur la période 1954-2019 sont expliqués par le modèle. D'après les résultats du test de Fisher, on rejette l'hypothèse nulle de nullité de l'ensemble des coefficients au seuil de significativité 0,1%.

D'après le modèle retenu, sur la période 1954-2019, un doublement de l'intensité d'utilisation du RFN par l'ensemble des services voyageurs de la SNCF par rapport au niveau de 1954 a engendré une hausse moyenne de 3,4 points du taux de retard des trains en France.

Entre 1954 et 2019, l'intensité d'utilisation du RFN par les services voyageurs de la SNCF a été multipliée par 2,8 engendrant d'après le modèle retenu une hausse du taux de retard de 6 points. Une intense utilisation des lignes ferroviaires est en effet susceptible d'user les voies. Elle augmente donc le risque d'incidents liés à l'état de la voie à long terme, pouvant entraîner des retards.

3.2.5 Synthèse des résultats

Le tableau de la page suivante synthétise les résultats des différents modèles retenus.

Pour les modèles retenus, la part de la variance du taux de retard sur la période 1954-2019 expliquée par le modèle est comprise entre 55 et 91%. Les modèles portant sur l'évolution de la ponctualité des trains Grandes Lignes entre 1981 et 2019, et sur celle des trains régionaux d'Ile-de-France et de la ponctualité globale pondérée du nombre de circulations par service entre 1954 et 2019 expliquent plus de 80% de la variance. Celui sur l'évolution des trains Grandes Lignes sur la période 1954-2019 en explique 73%. Le modèle portant sur l'évolution de la ponctualité des services TER est le moins « performant », expliquant seulement 55% de la variance. En outre, d'après les résultats des tests de Fisher implémentés, les modèles retenus sont tous statistiquement significatifs.

L'ensemble des coefficients des variables explicatives pour les différentes régressions retenues sont significatifs au seuil 5% d'après les résultats du test de Student, et au seuil 1% pour la majorité des variables explicatives.

Pour la période 1954-2019, la modélisation montre un impact significatif du vieillissement de certaines catégories du matériel roulant (matériel moteur ou matériel remorqué) sur la ponctualité des trains en France par service, ainsi que du vieillissement des lignes ferroviaires les plus fréquentées du Réseau Ferré National (grandes lignes à l'échelle nationale et lignes régionales en Ile-de-France). En effet, le risque de panne ou de dysfonctionnement du matériel roulant augmente à mesure qu'il vieillit, et des lignes ferroviaires vétustes peuvent connaître des défaillances, ou encore nécessiter le recours à des limitations temporaires de vitesse pour préserver la sécurité des voyageurs et des installations, notamment en cas de fortes chaleurs.

Selon les modèles retenus pour décrire l'évolution de la ponctualité des trains régionaux d'Ile-de-France et des trains Grandes Lignes entre 1954 et 2019, le taux de retard a cru de façon exponentielle à mesure que le matériel roulant et les voies ferroviaires ont vieilli. Dans ces modèles, l'impact d'un vieillissement de 10 ans du parc des principaux constituants du matériel moteur ou remorqué varie entre +10% et +22%. Celui d'un vieillissement de 10 ans de l'âge moyen des lignes ferroviaires exploitées varie entre +33% et une multiplication d'un facteur 2,3 pour les lignes régionales d'Ile-de-France. L'impact de cette dernière variable sur la ponctualité des services Transilien a donc été très important sur la période 1954-2019 d'après le modèle. En revanche, le modèle TGV ne fait pas ressortir l'âge moyen des rames TGV comme déterminant principal de l'évolution de la ponctualité des trains Grandes Lignes sur la période 1981-2019, peut-être pour partie car ces rames sont encore relativement récentes.

En revanche, les modèles ne permettent pas de conclure qu'il y a eu un effet significatif de l'évolution du volume des effectifs de personnels de l'EPIC SNCF (ponctualité globale) sur la période 1954-2019.

Service	Type de modèle	Période des données utilisées	R ² ajusté régression (p-value test de Fisher)	Variables explicatives	p-value test de Student variables explicatives	Impact sur le taux de retard
Trains régionaux de province	Régression Linéaire	1954-2019	0,55 (< 0,001)	Age moyen automotrices thermiques	< 0,01	+1 pt de retard / vieillissement du parc de 9 ans
				Age moyen voitures TER	< 0,01	+1 pt de retard / vieillissement du parc de 13 ans
				Intensité d'utilisation du RFN par les services TER	< 0,001	+4 pts entre 1954 et 2019
Trains régionaux d'IDF	Modèle exponentiel	1954-2019	0,91 (< 0,001)	Age moyen voitures Transilien	< 0,05	+10% / vieillissement du parc de 10 ans
				Age moyen lignes ferroviaires IDF	< 0,001	x 2,3 / vieillissement de 10 ans des lignes
				Nombre moyen de voyageurs par train Transilien	< 0,001	+17% / 10 voy/train
Trains Grandes Lignes	Modèle exponentiel	1954-2019	0,73 (< 0,001)	Age locomotives électriques	< 0,01	+22% / vieillissement du parc de 10 ans
				Age moyen des lignes UIC 2-4 du RFN	< 0,001	+33% / vieillissement de 10 ans des lignes
				Nombre moyen de voyageurs par train Grandes Lignes	< 0,01	+33% / 100 voy/train
Trains Grandes Lignes	Modèle exponentiel	1981-2019	0,88 (< 0,001)	Volume de trafic TGV en voy-km	< 0,001	+16% / 10 Mrds voy/km
				Nombre moyen de voyageurs par TGV	< 0,01	+12% / 100 voy/train
				Nombre de jours perdus à cause des mouvements sociaux par agent SNCF	< 0,05	+3% / jours de grève/agent SNCF/an
Tous services (pondéré du nombre de circulations)	Régression Linéaire	1954-2019	0,83 (< 0,001)	Intensité d'utilisation du RFN par l'ensemble des services Voyageurs de la SNCF	< 0,001	+6 pts entre 1954 et 2019

Les modèles relatifs aux trains régionaux d'Ile-de-France et aux trains Grandes Lignes font ressortir la forte influence sur la ponctualité du niveau de fréquentation des trains à travers l'indicateur du nombre moyen de voyageurs par train (voyageurs-km/trains-km). Un élément d'explication possible est que davantage de retards liés aux voyageurs impactent la ponctualité à mesure que la fréquentation des trains augmente (malaises voyageurs, blocage des portes durant le temps d'échange voyageurs lors d'un arrêt, déclenchement légitime ou non du signal d'alarme par un voyageur entraînant des retards, retards liés aux bagages oubliés, etc.). On peut également remarquer que l'effet du nombre de voyageurs par train ressort comme significatif dans les modèles relatifs aux services RER et Transilien d'Ile-de-France et TGV, mais pas dans celui relatif aux services TER. Cela semble cohérent avec des taux d'occupation plus importants constatés dans les TGV et les trains Transilien que dans la moyenne des TER. Néanmoins, il faut noter que le modèle économétrique construit agrège l'ensemble des services TER. Il est possible que les retards liés au nombre de voyageurs impactent certaines lignes TER très chargées (axes majeurs, périurbain des grandes métropoles principalement), sans que cela ressorte avec le modèle agrégé présenté ici.

Le modèle relatif aux TGV sur la période 1981-2019 suggère également un impact du volume du trafic (en voy-km). En effet, un volume de trafic très important amène l'exploitant ferroviaire à réduire la durée de l'intervalle entre 2 trains dans sa grille horaire, et peut le contraindre à mener une exploitation proche des limites de capacité des infrastructures sur certaines lignes ou tronçons de ligne du réseau LGV et du réseau classique. Davantage de retards liés aux situations de congestion peuvent alors survenir, et ces derniers peuvent impacter davantage de voyageurs du fait de la propagation d'un retard d'un train aux suivants par effet de réseau, notamment aux heures de pointe.

Ce modèle montre également l'impact des mouvements sociaux sur le niveau de ponctualité des trains Grandes Lignes. On observe que cet impact ne ressort comme significatif que dans le modèle consacré aux TGV (post-1981). Pour les autres services voyageurs, il est possible que les grèves se traduisent davantage par des annulations que par des retards, les annulations étant peut-être plus difficiles à concéder pour l'opérateur TGV. En particulier, il est possible que l'opérateur TGV concède des retards de trains afin de maintenir des correspondances sans suppression de train en cas de grève d'ampleur. Or, de telles opérations d'exploitation en mode dégradé sont peut-être plus rares pour les autres activités voyageurs.

Enfin, entre 1954 et 2019, l'intensification de l'utilisation des lignes ferroviaires du RFN par l'ensemble des services voyageurs de la SNCF semble avoir eu un impact significatif sur la ponctualité des trains en France. Selon les modèles retenus, cette intensification de l'utilisation des lignes a engendré une hausse du taux de retard de 4 points pour les services TER entre 1954 et 2019, et de 6 points pour l'ensemble des services voyageurs de la SNCF. En effet, sans renouvellement des voies par ailleurs, une intense utilisation des lignes ferroviaires est susceptible d'user les voies. Elle augmente donc le risque d'incidents liés à l'état de la voie à long terme, pouvant entraîner des retards.

4. CONCLUSION

L'AQST s'est procurée des versions numériques des mémentos statistiques de la SNCF de 1955 à 2018. Ils ont permis de reconstituer l'évolution de la ponctualité des trains en France depuis 1954 :

- à 5 minutes pour les trains régionaux de province et pour les trains d'Ile-de-France ;
- à 15 minutes pour les trains Grandes Lignes.

Il apparait que la ponctualité de l'ensemble des services ferroviaires s'est fortement dégradée depuis 1954 en France⁷.

Dans le but de savoir si cette dégradation peut en partie s'expliquer par l'évolution de certains déterminants supposés de la ponctualité, comme l'âge moyen des voies ferroviaires, des données de séries chronologiques sur l'évolution de ces facteurs ont été récoltées à partir de différentes sources. Afin de compléter ces séries chronologiques, des modèles de parcs ont été réalisés lorsque les données réelles de certaines années étaient manquantes.

Des modèles économétriques simples (régressions linéaires, modèles exponentiels) ont été implémentés à l'aide du logiciel R pour décrire et interpréter la corrélation éventuelle entre l'évolution de la ponctualité depuis 1954 par service et l'évolution des déterminants supposés de cette ponctualité.

Dans le cadre de cette étude, l'autocorrélation et la non-stationnarité des séries temporelles étudiées n'ont pas été pris en compte et on a considéré les 66 observations de la période 1954-2019 comme des tirages indépendants de variables aléatoires sans tenir compte de la dimension temporelle sous-jacente. Les éventuelles relations de corrélation mises en évidence par les modèles utilisés doivent donc être considérées avec prudence et non comme des liens de causalité généraux valables en dehors de la période d'étude.

Sur la période 1954-2019, la modélisation tend à montrer un impact significatif du vieillissement de certaines catégories du matériel roulant sur la ponctualité des trains en France par service, ainsi que du vieillissement des lignes ferroviaires les plus fréquentées du Réseau Ferré National. En effet, le risque de panne ou de dysfonctionnement du matériel roulant augmente à mesure qu'il vieillit, et des lignes ferroviaires vétustes peuvent connaître des défaillances. Ces incidents entraînent bien souvent des retards, ce qui pourrait expliquer les corrélations identifiées. Entre 1954 et 2019, la très forte augmentation du volume de trafic voyageurs et de la fréquentation des trains semble également avoir impacté la ponctualité des trains, en particulier en Ile-de-France, là où le réseau est le plus saturé. Le transport d'un plus grand nombre de voyageurs par train implique un risque supplémentaire d'occurrence d'un retard lié aux voyageurs. Parallèlement, il amène les opérateurs ferroviaires à réduire la durée de l'intervalle entre 2 trains dans leurs grilles horaires, les contraignant à mener une exploitation proche des limites de capacité des infrastructures sur certaines lignes ou

⁷ A noter toutefois que compte tenu de la profondeur des données (de 1954 à 2020), l'évolution couvre un large spectre de méthodes de mesures de la ponctualité. Aussi, l'exhaustivité et la précision de la mesure se sont améliorées au fil du temps.

tronçons de ligne du réseau. Davantage de retards liés aux situations de congestion peuvent alors survenir, et ces retards se propagent souvent d'un train aux suivants par effet de réseau, notamment aux heures de pointe. Ces phénomènes de congestion du réseau expliquent probablement pour partie l'impact de l'intensification de l'utilisation des lignes ferroviaires du RFN par l'ensemble des services voyageurs de la SNCF depuis 1954 sur la ponctualité des trains. En outre, sans renouvellement des voies par ailleurs, une intense utilisation des lignes ferroviaires provoque l'usure des voies. Elle augmente donc le risque d'incidents liés à l'état de la voie à long terme, pouvant entraîner d'autres retards. Enfin, le modèle retenu pour les trains Grandes Lignes depuis 1981 (année de mise en service du TGV) confirme l'impact des mouvements sociaux sur le niveau de ponctualité de ces services.

Modèle de parc des locomotives Diesel entre 1954 et 1983

Parc des locomotives Diesel entre 1954 et 1983																																										
40 ans		Durée de vie d'une locomotive																																								
		1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978																
Effectifs locs diesel fin d'année		196	233	292	388	528	598	700	802	885	987	1 131	1 283	1 424	1 640	1 761	1 885	1 984	2 079	2 120	2 168	2 202	2 228	2 217	2 217	2 191																
Age moyen locs diesel fin d'année		4,4						5,05						6,72						8,73																						
Age moyen estimé		4,0	4,4	4,5	4,4	4,2	4,7	5,0	5,4	5,9	6,3	6,5	6,7	7,1	7,1	7,6	8,1	8,7	9,3	10,1	10,9	11,7	12,6	13,6	14,6	15,4																
Effectifs estimé		196	233	292	388	528	598	700	802	885	987	1131	1283	1424	1640	1761	1885	1984	2079	2120	2168	2202	2228	2217	2217	2191																
Entrées	Sorties	Années de mise en service																																								
196		avant 1955																																								
37		196	196	196	196	196	196	196	196	196	196	196	196	196	196	196	196	196	196	196	196	196	196	196	185	185	159															
59		début 1955 à fin 1955		37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37															
96		début 1956 à fin 1956			59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59															
140		début 1957 à fin 1957				96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96															
70		début 1958 à fin 1958					140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140															
102		début 1959 à fin 1959						70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70															
102		début 1960 à fin 1960							102	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102															
83		début 1961 à fin 1961								102	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102																
102		début 1962 à fin 1962									83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83																	
144		début 1963 à fin 1963										102	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102	102																
152		début 1964 à fin 1964											144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144																
141		début 1965 à fin 1965												152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152	152															
216		début 1966 à fin 1966													141	141	141	141	141	141	141	141	141	141	141	141	141	141														
121		début 1967 à fin 1967														216	216	216	216	216	216	216	216	216	216	216	216	216	216													
124		début 1968 à fin 1968															121	121	121	121	121	121	121	121	121	121	121	121	121	121												
99		début 1969 à fin 1969																124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124											
95		début 1970 à fin 1970																	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99										
41		début 1971 à fin 1971																		95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95									
48	0	début 1972 à fin 1972																			41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41								
34	0	début 1973 à fin 1973																				48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48								
26	0	début 1974 à fin 1974																					34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34								
0	11	début 1975 à fin 1975																						26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26							
0	0	début 1976 à fin 1976																							0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
0	0	début 1977 à fin 1977																								0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
0	26	début 1978 à fin 1978																									0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
0	5	début 1979 à fin 1979																										0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
0	11	début 1980 à fin 1980																											0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0	31	début 1981 à fin 1981																												0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	33	début 1982 à fin 1982																													0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	65	début 1983 à fin 1983																														0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Modèle de parc des automotrices électriques entre 1954 et 1983

Parc des automotrices électriques entre 1954 et 1983																											
Durée de vie d'une automotrice électrique																											
40 ANS		1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	
	Effectifs autom elec fin d'année	434	447	451	455	475	473	476	495	503	505	501	506	534	550	583	595	626	657	657	650	666	653	670	653	606	
	Age moyen autom elec fin d'année	13,5						17,6				21,4						21,8					25,8				
	Age moyen estimé	13,1	13,7	14,6	15,5	15,8	16,8	17,7	18,0	18,7	19,7	20,6	21,4	21,3	21,7	21,5	22,0	21,9	21,9	22,9	23,8	24,2	25,1	23,3	22,9	22,8	
	Effectifs estimé	434	447	451	455	475	473	476	495	503	505	501	506	534	550	583	595	626	657	657	650	666	653	670	653	606	
Entrées	Sorties	Années de mise en service																									
		avant 1955																									
434		434	434	434	434	434	432	432	432	432	432	432	428	428	428	428	428	428	428	428	428	421	421	408	368	328	281
13			13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
4				4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
4					4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
20						20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
0	2						0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3								3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
19									19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
8										8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
2											2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
0	4											0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5													5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
28														28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28
16															16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
33																33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33
12																	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
31																		31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
31																			31	31	31	31	31	31	31	31	31
0																				0	0	0	0	0	0	0	0
0	7																				0	0	0	0	0	0	0
16	0																					16	16	16	16	16	16
0	13																						0	0	0	0	0
57	40																							57	57	57	57
23	40																									23	23
0	47																										0
13	43																										
35	40																										
38	18																										
25	18																										
55	18																										

Modèle de parc des automotrices thermiques (autorails) entre 1954 et 1983

Parc des autorails entre 1954 et 1983																										
Durée de vie d'un autorail																										
40 ANS																										
		1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978
	Effectifs autorails fin d'année	922	959	979	980	996	1 008	1 051	1 081	1 092	1 104	1 114	1 133	1 126	1 126	1 117	1 079	1 049	999	958	940	937	890	886	887	888
	Age moyen autorails fin d'année	16,4						19,7					23,1					27,6					31,3			
	Age moyen estimé	15,7	16,1	16,8	17,7	18,5	19,2	19,5	19,9	20,7	21,5	22,3	22,9	23,9	24,9	25,9	26,7	27,6	28,4	29,2	30,1	31,1	31,9	29,5	27,0	24,4
	Effectifs estimé	922	959	979	980	996	1008	1051	1081	1092	1104	1114	1133	1126	1126	1117	1079	1049	999	958	940	937	890	886	887	888
Entrées	Sorties	Années de mise en service																								
922		avant 1955																								
37		922	922	922	922	922	922	922	922	922	922	922	922	915	915	906	868	838	788	747	729	726	679	596	513	430
		début 1955 à fin 1955																								
	20		37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37
		début 1956 à fin 1956																								
	1			20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
		début 1957 à fin 1957																								
	16				1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
		début 1958 à fin 1958																								
	12					16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
		début 1959 à fin 1959																								
	43						12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
		début 1960 à fin 1960																								
	30							43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43	43
		début 1961 à fin 1961																								
	11								30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
		début 1962 à fin 1962																								
	12									11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
		début 1963 à fin 1963																								
	10										12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
		début 1964 à fin 1964																								
	19											10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
		début 1965 à fin 1965																								
	0	7											19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
		début 1966 à fin 1966																								
	0	0												0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		début 1967 à fin 1967																								
	0	9													0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		début 1968 à fin 1968																								
	0	38														0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		début 1969 à fin 1969																								
	0	30															0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		début 1970 à fin 1970																								
	0	50																0	0	0	0	0	0	0	0	0
		début 1971 à fin 1971																								
	0	41																	0	0	0	0	0	0	0	0
		début 1972 à fin 1972																								
	0	18																		0	0	0	0	0	0	0
		début 1973 à fin 1973																								
	0	3																			0	0	0	0	0	0
		début 1974 à fin 1974																								
	0	47																				0	0	0	0	0
		début 1975 à fin 1975																								
	79	83																					0	0	0	0
		début 1976 à fin 1976																								
	84	83																						79	79	79
		début 1977 à fin 1977																								
	84	83																							84	84
		début 1978 à fin 1978																								
	86	83																								84
		début 1979 à fin 1979																								
	53	83																								
		début 1980 à fin 1980																								
	0	20																								
		début 1981 à fin 1981																								
	0	18																								
		début 1982 à fin 1982																								
	0	12																								
		début 1983 à fin 1983																								

Modèle de parc des locotracteurs entre 1954 et 2008

Parc des locotracteurs entre 1954 et 2008																										
Durée de vie d'un locotracteur																										
40 ANS		1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	
	Effectifs locotracteurs fin d'année	450	505	566	622	671	767	873	941	985	1 057	1 113	1 176	1 205	1 201	1 231	1 311	1 349	1 381	1 416	1 394	1 377	1 366	1 358	1 361	
	Age moyen locotracteurs fin d'année		5,1					6,9					9,47					12,9					17,7			
	Age moyen estimé	4,6	5,1	5,6	6,1	6,6	6,8	7,0	7,5	8,1	8,6	9,1	9,7	10,4	11,4	12,1	12,4	13,0	13,7	14,4	15,3	16,2	17,1	18,0	19,0	
	Effectifs estimé	450	505	566	622	671	767	873	941	985	1057	1113	1176	1205	1201	1231	1311	1349	1381	1416	1394	1377	1366	1358	1361	
Entrées	Sorties	Années de mise en service																								
		avant 1955																								
450		450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	446	446	446	446	446	446	424	407	396	388	388
55			début 1955 à fin 1955	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55
61			début 1956 à fin 1956		61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61
56			début 1957 à fin 1957			56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56
49			début 1958 à fin 1958				49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49
96			début 1959 à fin 1959					96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96	96
106			début 1960 à fin 1960						106	106	106	106	106	106	106	106	106	106	106	106	106	106	106	106	106	106
68			début 1961 à fin 1961							68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68
44			début 1962 à fin 1962								44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44
72			début 1963 à fin 1963									72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72
56			début 1964 à fin 1964										56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56
63			début 1965 à fin 1965											63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63
29			début 1966 à fin 1966												29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29
0	4		début 1967 à fin 1967													0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0		début 1968 à fin 1968															30	30	30	30	30	30	30	30	30
80	0		début 1969 à fin 1969																	80	80	80	80	80	80	80
38	0		début 1970 à fin 1970																							
32	0		début 1971 à fin 1971																							
35	0		début 1972 à fin 1972																							
0	22		début 1973 à fin 1973																							
0	17		début 1974 à fin 1974																							
0	11		début 1975 à fin 1975																							
0	8		début 1976 à fin 1976																							
3	0		début 1977 à fin 1977																							
23	0		début 1978 à fin 1978																							
1	0		début 1979 à fin 1979																							
11	0		début 1980 à fin 1980																							
6	0		début 1981 à fin 1981																							
18	0		début 1982 à fin 1982																							
9	0		début 1983 à fin 1983																							

Parc des locotracteurs entre 1954 et 2008																									
Durée de vie d'un locotracteur																									
40 ANS																									
			1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Effectifs locotracteurs fin d'année			1404	1420	1417	1423	1376	1368	1362	1241	1199	1204	1205	1201	1201	1199	1194	1187	1180	1153	1112	1073	1012	970	964
Age moyen locotracteurs fin d'année							25,31				25,97					26,19				29,35					32,8
Age moyen estimé			25,5	25,4	26,3	26,3	26,8	27,8	28,7	28,3	28,8	27,2	27,2	27,2	27,2	27,2	27,3	28,2	29,1	29,7	30,2	30,6	30,7	31,0	31,9
Effectifs estimé			1404	1420	1417	1423	1376	1368	1362	1241	1199	1204	1205	1201	1201	1199	1194	1187	1180	1153	1112	1073	1012	970	964
Entrées	Sorties	Années de mise en service																							
23	0	début 1978 à fin 1978	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
1	0	début 1979 à fin 1979	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11	0	début 1980 à fin 1980	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
6	0	début 1981 à fin 1981	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
18	0	début 1982 à fin 1982	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
9	0	début 1983 à fin 1983	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
0	33	début 1984 à fin 1984	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	9	début 1985 à fin 1985	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
51	34	début 1986 à fin 1986	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51
50	34	début 1987 à fin 1987		50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
0	3	début 1988 à fin 1988			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	34	début 1989 à fin 1989			40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
0	47	début 1990 à fin 1990				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	8	début 1991 à fin 1991					0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	6	début 1992 à fin 1992						0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	121	début 1993 à fin 1993							0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	42	début 1994 à fin 1994								0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
78	73	début 1995 à fin 1995									78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78	78
31	30	début 1996 à fin 1996										31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
26	30	début 1997 à fin 1997											26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
30	30	début 1998 à fin 1998												30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
28	30	début 1999 à fin 1999														28	28	28	28	28	28	28	28	28	28
25	30	début 2000 à fin 2000															25	25	25	25	25	25	25	25	25
0	7	début 2001 à fin 2001																0	0	0	0	0	0	0	0
0	7	début 2002 à fin 2002																	0	0	0	0	0	0	0
0	27	début 2003 à fin 2003																		0	0	0	0	0	0
0	41	début 2004 à fin 2004																			0	0	0	0	0
0	39	début 2005 à fin 2005																				0	0	0	0
0	61	début 2006 à fin 2006																					0	0	0
0	42	début 2007 à fin 2007																						0	0
0	6	début 2008 à fin 2008																							0

Modèle de parc des voitures remorquées TER entre 1954 et 1983

Parc des voitures TER (ex omnibus) entre 1954 et 83																									
durée de vie d'une voiture																									
45 ANS																									
		1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	
		Effectifs voitures TER fin d'année	3290	3207	3118	3 169	3 114	2 899	2 840	2 741	2 762	2 732	2 794	2 794	2 794	2 716	2 645	2 607	2433	2407	2306	2236	2175	1827	1874
		Age moyen voitures TER fin d'année																							
		Age moyen estimé	11,7	12,7	13,7	14,5	15,5	16,5	17,5	18,4	19,3	20,3	20,9	21,9	22,9	23,8	24,8	25,8	26,7	27,7	28,7	29,6	30,6	31,4	31,6
		Effectifs estimé	3290	3207	3118	3169	3114	2899	2840	2741	2762	2732	2794	2794	2794	2716	2645	2607	2433	2407	2306	2236,5	2175	1827	1874
Entrées	Sorties	Années de mise en service																							
3290		avant 1955																							
0	83	début 1955 à fin 1955		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	89	début 1956 à fin 1956		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
51	0	début 1957 à fin 1957			51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51
0	55	début 1958 à fin 1958				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	215	début 1959 à fin 1959					0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	59	début 1960 à fin 1960						0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	99	début 1961 à fin 1961							0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	début 1962 à fin 1962								21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
0	30	début 1963 à fin 1963									0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
62	0	début 1964 à fin 1964										62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62
0	0	début 1965 à fin 1965											0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	début 1966 à fin 1966												0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	78	début 1967 à fin 1967													0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	71	début 1968 à fin 1968														0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	38	début 1969 à fin 1969															0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	174	début 1970 à fin 1970																0	0	0	0	0	0	0	0
0	26	début 1971 à fin 1971																	0	0	0	0	0	0	0
0	101	début 1972 à fin 1972																		0	0	0	0	0	0
0	70	début 1973 à fin 1973																			0	0	0	0	0
0	61	début 1974 à fin 1974																				0	0	0	0
0	348	début 1975 à fin 1975																					0	0	0
47	0	début 1976 à fin 1976																						0	47
0	215	début 1977 à fin 1977																							
0	60	début 1978 à fin 1978																							
0	13	début 1979 à fin 1979																							
0	149	début 1980 à fin 1980																							
0	62	début 1981 à fin 1981																							
74	0	début 1982 à fin 1982																							
102	0	début 1983 à fin 1983																							

Modèle de parc des voitures remorquées Transilien entre 1954 et 1983

Parc des voitures TER (ex voitures de la banlieue de Paris) entre 1954 et 83																									
Durée de vie d'une voiture																									
45 ANS																									
		1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977
Effectifs voitures Transilien fin d'année		1668	1627	1582	1 606	1 579	1 470	1 439	1 390	1 400	1 386	1 417	1 417	1 417	1 378	1 342	1 322	1287	1306	1312	1197	1231	1290	1256	1295
Age moyen voitures Transilien fin d'année																									
Age moyen estimé		22,7	23,7	24,7	25,3	26,3	27,3	28,3	29,3	30,1	31,0	31,4	32,4	33,4	34,3	35,3	36,3	37,2	37,4	37,5	38,2	38,1	35,5	34,9	32,1
Effectifs estimé		1668	1627	1582	1606	1579	1470	1439	1390	1400	1386	1417	1417	1417	1378	1342	1322	1287	1306	1312	1197	1231	1290	1256	1295
Entrées	Sorties	Années de mise en service																							
		avant 1955																							
1668		1668	1627	1582	1 582	1 555	1446	1 415	1 366	1 366	1 352	1352	1352	1352	1 313	1 277	1 257	####	1211	1188	1073	1073	1 018	943	864
0	41	début 1955 à fin 1955		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	45	début 1956 à fin 1956		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	début 1957 à fin 1957		24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
0	27	début 1958 à fin 1958		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	109	début 1959 à fin 1959		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	31	début 1960 à fin 1960		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	49	début 1961 à fin 1961		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	début 1962 à fin 1962		10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
0	14	début 1963 à fin 1963		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0	début 1964 à fin 1964		31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
0	0	début 1965 à fin 1965		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	début 1966 à fin 1966		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	39	début 1967 à fin 1967		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	36	début 1968 à fin 1968		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	20	début 1969 à fin 1969		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	35	début 1970 à fin 1970		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	11	début 1971 à fin 1971		30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
29	23	début 1972 à fin 1972		29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29
0	115	début 1973 à fin 1973		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	0	début 1974 à fin 1974		34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
114	55	début 1975 à fin 1975		114	114	114	114	114	114	114	114	114	114	114	114	114	114	114	114	114	114	114	114	114	114
41	75	début 1976 à fin 1976		41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
118	79	début 1977 à fin 1977		118	118	118	118	118	118	118	118	118	118	118	118	118	118	118	118	118	118	118	118	118	118
225	76	début 1978 à fin 1978		225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225	225
87	96	début 1979 à fin 1979		87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87	87
67	108	début 1980 à fin 1980		67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67
140	97	début 1981 à fin 1981		140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140
40	97	début 1982 à fin 1982		40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
47	96	début 1983 à fin 1983		47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47	47

Annexe 2 : Modèles de parc du réseau ferré utilisés

Modèle de parc des lignes ferroviaires du RFN entre 1954 et 1995

Parc des lignes du RFN entre 1954 et 95																					
âge de renouvellement de voie																					
31 ans		1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	
	Km de voie cible	58400	58160	58050	57 730	57 590	57 390	56 920	56 600	56 410	56 290	56 180	55 300	55 200	54 400	54 179	53 413	53 613	52 698	52 263	
	Age moyen de la voie																		18,8		
	Age moyen de la voie estimé	9,7	10,4	11,1	11,9	12,6	13,3	13,9	14,6	15,2	15,8	16,3	16,8	17,3	17,8	18,3	18,8	19,3	19,6	20,0	
	Indicateur de vétusté																				
	km voie cible estimé	58400	58160	58050	57730	57590	57 390	56 920	56 600	56 410	56 290	56 180	55 300	55 200	54 400	54 179	53 413	53 613	52 698	52 263	
km gopeq	Sorties	Années de mise en service																			
58 400		avant 1955																			
1800	2040	début 1955 à fin 1955																			
1410	1520	début 1956 à fin 1956																			
1240	1560	début 1957 à fin 1957																			
1200	1340	début 1958 à fin 1958																			
1310	1510	début 1959 à fin 1959																			
1340	1810	début 1960 à fin 1960																			
1310	1630	début 1961 à fin 1961																			
1240	1430	début 1962 à fin 1962																			
1360	1480	début 1963 à fin 1963																			
1330	1440	début 1964 à fin 1964																			
1370	2250	début 1965 à fin 1965																			
1300	1400	début 1966 à fin 1966																			
1120	1920	début 1967 à fin 1967																			
1050	1271	début 1968 à fin 1968																			
1080	1846	début 1969 à fin 1969																			
1075	875	début 1970 à fin 1970																			
1100	2015	début 1971 à fin 1971																			
1050	1485	début 1972 à fin 1972																			
925	1357	début 1973 à fin 1973																			
1015	1198	début 1974 à fin 1974																			
970	950	début 1975 à fin 1975																			
1040	1410	début 1976 à fin 1976																			
990	1159	début 1977 à fin 1977																			
945	1015	début 1978 à fin 1978																			
945	1069	début 1979 à fin 1979																			
1030	1113	début 1980 à fin 1980																			
980	431	début 1981 à fin 1981																			
990	1057	début 1982 à fin 1982																			
900	659	début 1983 à fin 1983																			

Parc des lignes du RFN entre 1954 et 95																					
âge de renouvellement de voie (estimation)																					
31 ans																					
		1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995
	Km de voie cible	51 298	51 129	51 059	50 935	50 852	51 401	51 334	51 575	51 577	51 531	51 493	51 280	51 402	54 475	53 994	52 927	52 276	52 325	52 204	51 834
	Age moyen de la voie					23,7					25,7				28,9				29	30	30
	Age moyen de la voie estimé	21,6	22,0	22,4	22,7	23,0	23,4	23,7	24,1	24,5	24,9	25,4	25,8	26,3	27,8	28,2	28,4	28,7	29,2	29,8	30,1
	Indicateur de vétusté																				
	km voie cible estimé	51 298	51 129	51 059	50 935	50 852	51 401	51 334	51 575	51 577	51 531	51 493	51 280	51 402	54 475	53 994	52 927	52 276	52 325	52 204	51 834
km gopeq	Sorties	Années de mise en service																			
58 400		avant 1955																			
1075	875	début 1970 à fin 1970	1075	1075	1075	1075	1075	1075	1075	1075	1075	1075	1075	1075	1075	1075	1075	1075	1075	1075	1075
1100	2015	début 1971 à fin 1971	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100
1050	1485	début 1972 à fin 1972	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050
925	1357	début 1973 à fin 1973	925	925	925	925	925	925	925	925	925	925	925	925	925	925	925	925	925	925	925
1015	1198	début 1974 à fin 1974	1015	1015	1015	1015	1015	1015	1015	1015	1015	1015	1015	1015	1015	1015	1015	1015	1015	1015	1015
970	950	début 1975 à fin 1975	970	970	970	970	970	970	970	970	970	970	970	970	970	970	970	970	970	970	970
1040	1410	début 1976 à fin 1976	1040	1040	1040	1040	1040	1040	1040	1040	1040	1040	1040	1040	1040	1040	1040	1040	1040	1040	1040
990	1159	début 1977 à fin 1977	990	990	990	990	990	990	990	990	990	990	990	990	990	990	990	990	990	990	990
945	1015	début 1978 à fin 1978	945	945	945	945	945	945	945	945	945	945	945	945	945	945	945	945	945	945	945
945	1069	début 1979 à fin 1979	945	945	945	945	945	945	945	945	945	945	945	945	945	945	945	945	945	945	945
1030	1113	début 1980 à fin 1980	1030	1030	1030	1030	1030	1030	1030	1030	1030	1030	1030	1030	1030	1030	1030	1030	1030	1030	1030
980	431	début 1981 à fin 1981	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980	980
990	1057	début 1982 à fin 1982	990	990	990	990	990	990	990	990	990	990	990	990	990	990	990	990	990	990	990
900	659	début 1983 à fin 1983	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
860	858	début 1984 à fin 1984	860	860	860	860	860	860	860	860	860	860	860	860	860	860	860	860	860	860	860
730	776	début 1985 à fin 1985	730	730	730	730	730	730	730	730	730	730	730	730	730	730	730	730	730	730	730
660	698	début 1986 à fin 1986	660	660	660	660	660	660	660	660	660	660	660	660	660	660	660	660	660	660	660
625	838	début 1987 à fin 1987	625	625	625	625	625	625	625	625	625	625	625	625	625	625	625	625	625	625	625
620	498	début 1988 à fin 1988	620	620	620	620	620	620	620	620	620	620	620	620	620	620	620	620	620	620	620
585	0	début 1989 à fin 1989	585	585	585	585	585	585	585	585	585	585	585	585	585	585	585	585	585	585	585
585	1066	début 1990 à fin 1990	585	585	585	585	585	585	585	585	585	585	585	585	585	585	585	585	585	585	585
575	1642	début 1991 à fin 1991	575	575	575	575	575	575	575	575	575	575	575	575	575	575	575	575	575	575	575
490	1141	début 1992 à fin 1992	490	490	490	490	490	490	490	490	490	490	490	490	490	490	490	490	490	490	490
520	471	début 1993 à fin 1993	520	520	520	520	520	520	520	520	520	520	520	520	520	520	520	520	520	520	520
460	581	début 1994 à fin 1994	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460	460
565	935	début 1995 à fin 1995	565	565	565	565	565	565	565	565	565	565	565	565	565	565	565	565	565	565	565

Modèle de parc des lignes des catégories UIC 2-4 entre 1954 et 1995

Parc des lignes UIC 2-4 entre 1954 et 95																								
âge moyen renouvellement de voie (estimation)		25 ans																						
hypothèse que le gestionnaire d'infrastructure a consacré chaque année entre 1954 et 1966 puis entre 1986 et 1995, la même part aux catégories UIC2-4 parmi ses renouvellements et ses radiations																								
			1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	
		Km de voie cible													11 620	11 740	11 910	11 975	12 080	12 184	13 179	14 174	15 169	
		Age moyen de la voie																	18,8					
		Age moyen de la voie estimé	9,7	10,2	10,7	11,2	11,7	12,1	12,5	12,8	13,1	13,2	13,4	13,3	13,3	13,6	14,0	14,1	14,1	14,1	13,1	12,4	11,7	
		Indicateur de vétusté																						
		km voie cible estimé	12 894	12 799	12 755	12 628	12 572	12 492	12 305	12 178	12 102	12 054	12 010	11 660	11 620	11 740	11 910	11 975	12 080	12 184	13 179	14 174	15 169	
km gopeq	Sorties	Années de mise en service																						
		avant 1955	12894	12084	11480	10860	10327	9726	9006	8358	7789	7200	6627	5732	5175	4850	4617	4227	3774	3351	2929	2496	2070	
		début 1955 à fin 1955		715	715	715	715	715	715	715	715	715	715	715	715	715	715	715	715	715	715	715	715	
		début 1956 à fin 1956			560	560	560	560	560	560	560	560	560	560	560	560	560	560	560	560	560	560	560	
		début 1957 à fin 1957				493	493	493	493	493	493	493	493	493	493	493	493	493	493	493	493	493	493	
		début 1958 à fin 1958					477	477	477	477	477	477	477	477	477	477	477	477	477	477	477	477	477	
		début 1959 à fin 1959						521	521	521	521	521	521	521	521	521	521	521	521	521	521	521	521	
		début 1960 à fin 1960							533	533	533	533	533	533	533	533	533	533	533	533	533	533	533	
		début 1961 à fin 1961								521	521	521	521	521	521	521	521	521	521	521	521	521	521	
		début 1962 à fin 1962									493	493	493	493	493	493	493	493	493	493	493	493	493	
		début 1963 à fin 1963										541	541	541	541	541	541	541	541	541	541	541	541	
		début 1964 à fin 1964											529	529	529	529	529	529	529	529	529	529	529	
		début 1965 à fin 1965												545	545	545	545	545	545	545	545	545	545	
		début 1966 à fin 1966													517	517	517	517	517	517	517	517	517	
		début 1967 à fin 1967														445	445	445	445	445	445	445	445	
		début 1968 à fin 1968															403	403	403	403	403	403	403	
		début 1969 à fin 1969																455	455	455	455	455	455	
		début 1970 à fin 1970																	558	558	558	558	558	
		début 1971 à fin 1971																		527	527	527	527	
		début 1972 à fin 1972	1 417	422																	1417	1417	1417	
		début 1973 à fin 1973	1 428	433																		1428	1428	
		début 1974 à fin 1974	1 421	426																			1421	
		début 1975 à fin 1975	656	594																				
		début 1976 à fin 1976	572	511																				
		début 1977 à fin 1977	555	469																				
		début 1978 à fin 1978	577	858																				
		début 1979 à fin 1979	501	448																				
		début 1980 à fin 1980	1 533	456																				
		début 1981 à fin 1981	1 036	464																				
		début 1982 à fin 1982	415	471																				

Parc des lignes UIC 2-4 entre 1954 et 95																					
âge moyen renouvellement de voie (estimation)																					
			hypothèse que le gestionnaire d'infrastructure a consacré chaque année entre 1954 et 1966 puis entre 1986 et 1995, la même part aux catégories UIC2-4 parmi ses renouvellements et ses radiations																		
			1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995
	Km de voie cible		15 378	15 097	15 150	16 227	16 799	16 743	17 246	17 274	17 073	17 056	16 962	17 015	17 275	17 061	16 560	16 161	16 187	16 117	15 934
	Age moyen de la voie					12,5					16,0					19,5			16	16	17
	Age moyen de la voie estimé		11,5	11,0	11,3	10,9	10,8	11,2	11,4	11,9	12,4	12,9	13,4	14,1	14,8	15,3	15,5	15,7	16,3	16,8	17,2
	Indicateur de vétusté																				
	km voie cible estimé		15 378	15 097	15 150	16 227	16 799	16 743	17 246	17 274	17 073	17 056	16 962	17 015	17 275	17 061	16 560	16 161	16 187	16 117	15 934
km gopeq	Sorties	Années de mise en service																			
403	233	début 1968 à fin 1968	403	403	403	403	403	403	403	403	403	403	403	403	403	403	403	403	403	403	63
455	390	début 1969 à fin 1969	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455	455
558	453	début 1970 à fin 1970	558	558	558	558	558	558	558	558	558	558	558	558	558	558	558	558	558	558	558
527	423	début 1971 à fin 1971	527	527	527	527	527	527	527	527	527	527	527	527	527	527	527	527	527	527	527
1 417	422	début 1972 à fin 1972	1417	1417	1417	1417	1417	1417	1417	1417	1417	1417	1417	1417	1417	1417	1417	1417	1417	1417	1417
1 428	433	début 1973 à fin 1973	1428	1428	1428	1428	1428	1428	1428	1428	1428	1428	1428	1428	1428	1428	1428	1428	1428	1428	1428
1 421	426	début 1974 à fin 1974	1421	1421	1421	1421	1421	1421	1421	1421	1421	1421	1421	1421	1421	1421	1421	1421	1421	1421	1421
656	594	début 1975 à fin 1975	656	656	656	656	656	656	656	656	656	656	656	656	656	656	656	656	656	656	656
572	511	début 1976 à fin 1976	572	572	572	572	572	572	572	572	572	572	572	572	572	572	572	572	572	572	572
555	469	début 1977 à fin 1977	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555	555
577	858	début 1978 à fin 1978		577	577	577	577	577	577	577	577	577	577	577	577	577	577	577	577	577	577
501	448	début 1979 à fin 1979			501	501	501	501	501	501	501	501	501	501	501	501	501	501	501	501	501
1 533	456	début 1980 à fin 1980				1533	1533	1533	1533	1533	1533	1533	1533	1533	1533	1533	1533	1533	1533	1533	1533
1 036	464	début 1981 à fin 1981					1036	1036	1036	1036	1036	1036	1036	1036	1036	1036	1036	1036	1036	1036	1036
415	471	début 1982 à fin 1982						415	415	415	415	415	415	415	415	415	415	415	415	415	415
875	372	début 1983 à fin 1983							875	875	875	875	875	875	875	875	875	875	875	875	875
300	272	début 1984 à fin 1984								300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
295	496	début 1985 à fin 1985									295	295	295	295	295	295	295	295	295	295	295
290	307	début 1986 à fin 1986										290	290	290	290	290	290	290	290	290	290
275	369	début 1987 à fin 1987											275	275	275	275	275	275	275	275	275
270	217	début 1988 à fin 1988												270	270	270	270	270	270	270	270
260	0	début 1989 à fin 1989													260	260	260	260	260	260	260
260	474	début 1990 à fin 1990														260	260	260	260	260	260
270	771	début 1991 à fin 1991															270	270	270	270	270
300	699	début 1992 à fin 1992																300	300	300	300
280	254	début 1993 à fin 1993																	280	280	280
265	335	début 1994 à fin 1994																		265	265
280	463	début 1995 à fin 1995																			280

Modèle de parc des lignes des catégories UIC 5-6 entre 1954 et 1995

Parc des lignes UIC 5-6 entre 1954 et 95																180	240	92	-18	-17	509	509	510
âge moyen renouvellement de voie (estimation)		35 ans														-180	-240	-92	18	17	-509	-509	-510
		hypothèse que le gestionnaire d'infrastructure a consacré chaque année entre 1954 et 1966 puis entre 1986 et 1995 la même part aux catégories UIC5-6 parmi ses renouvellements et ses radiations																					
		1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	
	Km de voie cible													16 520	16 340	16 100	16 008	16 026	16 043	15 534	15 025	14 515	
	Age moyen de la voie																		18,8				
	Age moyen de la voie estimé	9,7	10,3	11,0	11,6	12,3	12,9	13,4	13,9	14,4	14,8	15,3	15,5	15,9	16,2	16,4	16,8	17,5	17,8	18,0	18,5	18,9	
	Indicateur de vétusté																						
	km voie cible estimé	17787	17692	17648	17521	17466	17 387	17 201	17 074	16 999	16 952	16 908	16 560	16 520	16 340	16 100	16 008	16 026	16 043	15 534	15 025	14 515	
km gopeq	Sorties	Années de mise en service																					
17 787		avant 1955																					
712	807	17787	16980	16378	15760	15230	14633	13917	13272	12706	12121	11551	10661	10107	9484	8767	8297	8086	7639	6874	6261	5634	
558	602		712	712	712	712	712	712	712	712	712	712	712	712	712	712	712	712	712	712	712	712	
491	618			558	558	558	558	558	558	558	558	558	558	558	558	558	558	558	558	558	558	558	
475	530				491	491	491	491	491	491	491	491	491	491	491	491	491	491	491	491	491	491	
518	597					475	475	475	475	475	475	475	475	475	475	475	475	475	475	475	475	475	
530	716						518	518	518	518	518	518	518	518	518	518	518	518	518	518	518	518	
518	645							530	530	530	530	530	530	530	530	530	530	530	530	530	530	530	
491	566								518	518	518	518	518	518	518	518	518	518	518	518	518	518	
538	585									491	491	491	491	491	491	491	491	491	491	491	491	491	
526	570										538	538	538	538	538	538	538	538	538	538	538	538	
542	890											526	526	526	526	526	526	526	526	526	526	526	
514	554												526	526	526	526	526	526	526	526	526	526	
443	623													542	542	542	542	542	542	542	542	542	
477	717														514	514	514	514	514	514	514	514	
378	470															514	514	514	514	514	514	514	
229	211																443	443	443	443	443	443	
464	447																	443	443	443	443	443	
256	765																		443	443	443	443	
104	613																			443	443	443	
117	627																				443	443	
168	149																					443	
326	308																						
278	350																						
233	83																						
235	116																						
221	839																						
370	154																						
420	360																						
400	463																						

Modèle de parc des lignes des catégories UIC 7-9 (Avec Voyageurs) entre 1954 et 1995

Parc des lignes UIC 7-9 AV entre 1954 et 95																					40	190	1733	934	935	1079	1079	1081
âge moyen renouvellement de voie (estimation)		50 ans																			-40	-190	-1 733	-934	-935	-1 079	-1 079	-1 081
		hypothèse que le gestionnaire d'infrastructure a consacré chaque année entre 1954 et 1966 puis entre 1986 et 1995 la même part aux catégories UIC7-9 parmi ses renouvellements et ses radiations																										
		1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974						
	Km de voie cible													19 670	19 630	19 440	17 707	16 773	15 838	14 759	13 680	12 599						
	Age moyen de la voie																	18,8										
	Age moyen de la voie estimé	21,0	21,7	22,5	23,3	24,1	24,9	25,6	26,3	27,1	27,8	28,5	29,2	29,9	30,6	31,3	31,6	31,9	32,5	32,9	33,2	33,4						
	Indicateur de vétusté																											
	km voie cible estimé	20129	20095	20079	20033	20013	19 984	19 917	19 871	19 844	19 827	19 811	19 684	19 670	19 630	19 440	17 707	16 773	15 838	14 759	13 680	12 599						
km gopeq	Sorties	Années de mise en service																										
	20 129	avant 1955																										
	258	292	début 1955 à fin 1955	20129	19837	19619	19395	19203	18986	18727	18493	18288	18076	17869	17545	17344	17143	16823	14910	13756	12781	11622	10473	9322				
	202	218	début 1956 à fin 1956		258	258	258	258	258	258	258	258	258	258	258	258	258	258	258	258	258	258	258	258				
	178	224	début 1957 à fin 1957			202	202	202	202	202	202	202	202	202	202	202	202	202	202	202	202	202	202	202				
	172	192	début 1958 à fin 1958				178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178				
	188	217	début 1959 à fin 1959					172	172	172	172	172	172	172	172	172	172	172	172	172	172	172	172	172				
	192	259	début 1960 à fin 1960						188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188				
	188	234	début 1961 à fin 1961							192	192	192	192	192	192	192	192	192	192	192	192	192	192	192				
	178	205	début 1962 à fin 1962								188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188	188				
	195	212	début 1963 à fin 1963									178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178	178				
	191	207	début 1964 à fin 1964										195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195	195				
	197	324	début 1965 à fin 1965											191	191	191	191	191	191	191	191	191	191	191				
	187	201	début 1966 à fin 1966												197	197	197	197	197	197	197	197	197	197				
	161	201	début 1967 à fin 1967													187	187	187	187	187	187	187	187	187				
	130	320	début 1968 à fin 1968														161	161	161	161	161	161	161	161				
	180	1913	début 1969 à fin 1969															161	161	161	161	161	161	161				
	220	1154	début 1970 à fin 1970																130	130	130	130	130	130				
	40	975	début 1971 à fin 1971																	180	180	180	180	180				
	80	1159	début 1972 à fin 1972																		220	220	220	220				
	70	1149	début 1973 à fin 1973																			40	40	40				
	70	1151	début 1974 à fin 1974																				80	80				
	80	172	début 1975 à fin 1975																					80				
	70	165	début 1976 à fin 1976																					70				
	95	81	début 1977 à fin 1977																									
	80	179	début 1978 à fin 1978																									
	160	331	début 1979 à fin 1979																									
	75	598	début 1980 à fin 1980																									
	150	110	début 1981 à fin 1981																									
	130	24	début 1982 à fin 1982																									
	160	141	début 1983 à fin 1983																									

Modèle de parc des lignes ferroviaires régionales d'Ile-de-France entre 1954 et 2019

Parc des lignes UIC 2-6 d'IDF entre 1954 et 2018																						0	0	5	0	-8	34	0	-8	-3	0	-28
âge moyen renouvellement de voie (estimation)		36 ans																				0	0	-5	0	8	-34	0	8	3	0	28
		hypothèse que le gestionnaire d'infrastructure a consacré chaque année entre 1954 et 1966, la même part aux catégories UIC2-6 en Ile-de-France parmi ses renouvellements et ses radiations																														
		1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977							
	Km de voie cible														3 136	3 136	3 136	3 131	3 131	3 139	3 105	3 105	3 113	3 116	3 116	3 144						
	Age moyen de la voie														18,8																	
	Age moyen de la voie estimé	9,7	10,4	11,1	11,8	12,5	13,1	13,7	14,3	14,9	15,4	15,9	16,3	16,8	17,4	17,9	18,4	18,9	19,3	19,6	20,0	20,4	20,8	21,1	21,5							
	Indicateur de vétusté																															
	km voie cible estimé	3339	3324	3317	3297	3288	3 275	3 245	3 225	3 213	3 205	3 198	3 142	3 136	3 196	3 196	3 191	3 191	3 199	3 165	3 165	3 173	3 176	3 176	3 204							
km gopeq	Sorties	Années de mise en service																														
3 339		avant 1955																														
114	129	début 1955 à fin 1955																														
89	96	début 1956 à fin 1956																														
79	99	début 1957 à fin 1957																														
76	85	début 1958 à fin 1958																														
83	96	début 1959 à fin 1959																														
85	115	début 1960 à fin 1960																														
83	103	début 1961 à fin 1961																														
79	91	début 1962 à fin 1962																														
86	94	début 1963 à fin 1963																														
84	91	début 1964 à fin 1964																														
87	143	début 1965 à fin 1965																														
82	88	début 1966 à fin 1966																														
71	71	début 1967 à fin 1967																														
70	70	début 1968 à fin 1968																														
67	72	début 1969 à fin 1969																														
63	63	début 1970 à fin 1970																														
79	71	début 1971 à fin 1971																														
72	106	début 1972 à fin 1972																														
64	64	début 1973 à fin 1973																														
70	62	début 1974 à fin 1974																														
66	63	début 1975 à fin 1975																														
72	72	début 1976 à fin 1976																														
67	39	début 1977 à fin 1977																														
65	54	début 1978 à fin 1978																														
59	59	début 1979 à fin 1979																														
71	60	début 1980 à fin 1980																														
63	63	début 1981 à fin 1981																														
65	65	début 1982 à fin 1982																														
55	55	début 1983 à fin 1983																														

Parc des lignes UIC 2-6 d'IDF entre 1954 et 2018			0	-82	0	0	0	0	0	-16	0	0	-25	0	0	0	20	3	-8	-100	0	-5
âge moyen renouvellement de voie (estimation)			0	82	0	0	0	0	0	16	0	0	25	0	0	0	-20	-3	8	100	0	5
hypothèse que le gestionnaire d'infrastructure a consacré chaque année entre 1954 et 1966, la même part aux catégories UIC2-6 en Ile-de-France parmi ses renouvellements et ses radiations																						
			1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
		Km de voie cible	3 144	3 226	3 226	3 226	3 226	3 226	3 226	3 242	3 242	3 242	3 267	3 267	3 267	3 267	3 247	3 244	3 252	3 352	3 352	3 357
		Age moyen de la voie			18,0					20,2					22,9			24	24	24		
		Age moyen de la voie estimé	21,9	22,3	22,6	22,9	23,1	23,5	23,9	24,4	24,9	25,5	26,2	26,8	27,4	28,0	28,4	29,2	29,9	30,6	31,2	31,6
		Indicateur de vétusté																				
		km voie cible estimé	3 215	3 215	3 226	3 226	3 226	3 226	3 226	3 242	3 242	3 242	3 267	3 267	3 267	3 267	3 247	3 277	3 307	3 337	3 352	3 357
km gopeq	Sorties	Années de mise en service			60																	
3 339		avant 1955	1362	1303	1243	1180	1115	1060	1010	981	941	906	901	871	841	811	761	761	761	761	741	706
71	71	début 1967 à fin 1967	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71
70	70	début 1968 à fin 1968	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
67	72	début 1969 à fin 1969	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67
63	63	début 1970 à fin 1970	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63
79	71	début 1971 à fin 1971	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79	79
72	106	début 1972 à fin 1972	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72
64	64	début 1973 à fin 1973	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64
70	62	début 1974 à fin 1974	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
66	63	début 1975 à fin 1975	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66
72	72	début 1976 à fin 1976	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72
67	39	début 1977 à fin 1977	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67
65	54	début 1978 à fin 1978	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65
59	59	début 1979 à fin 1979		59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59
71	60	début 1980 à fin 1980			71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71
63	63	début 1981 à fin 1981				63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63
65	65	début 1982 à fin 1982					65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65
55	55	début 1983 à fin 1983						55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55
50	50	début 1984 à fin 1984							50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
45	29	début 1985 à fin 1985								45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
40	40	début 1986 à fin 1986									40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
35	35	début 1987 à fin 1987										35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
30	5	début 1988 à fin 1988											30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
30	30	début 1989 à fin 1989												30	30	30	30	30	30	30	30	30
30	30	début 1990 à fin 1990													30	30	30	30	30	30	30	30
30	30	début 1991 à fin 1991														30	30	30	30	30	30	30
30	50	début 1992 à fin 1992															30	30	30	30	30	30

Parc des lignes UIC 2-6 d'IDF entre 1954 et 2018			-116	-3	3	0	0	0	3473	0	0	0	-3920	48	48	48	49	-39	-36	-13	-49	-13
âge moyen renouvellement de voie (estimation)			116	3	-3	0	0	-3 473	0	0	0	0	3 920	-48	-48	-48	-49	39	36	13	49	13
			hypothèse que le gestionnaire d'infrastructure a consacré chaque année entre 1954 et 1966, la même part aux catégories UIC2-6 en Ile-de-France parmi ses renouvellements et ses radiations																			
			1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Km de voie cible			3 473	3 476	3 473	3 473	3 473						3 920	3 872	3 824	3 776	3 727	3 766	3 802	3 815	3 864	3 877
Age moyen de la voie													3920									
Age moyen de la voie estimé			32,9	33,5	33,7	33,9	33,4	32,7	32,9	33,1	33,2	33,4	33,2	31,9	30,3	28,8	27,3	26,1	24,8	23,2	21,6	20,0
Indicateur de vétusté																						
km voie cible estimé			3 436	3 476	3 473	3 473	3 473	3 473	3 568	3 658	3 753	3 853	3 920	3 872	3 824	3 776	3 727	3 766	3 802	3 815	3 864	3 877
km gopeq	Sorties	Années de mise en service																				
3 339		avant 1955	705	705	657	607	517	417	417	417	417	417	379	216	43	0	0	0	0	0	0	0
30	50	début 1992 à fin 1992	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
30	0	début 1993 à fin 1993	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
30	0	début 1994 à fin 1994	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
30	0	début 1995 à fin 1995	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
35	20	début 1996 à fin 1996	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
40	35	début 1997 à fin 1997	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
40	1	début 1998 à fin 1998	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
40	0	début 1999 à fin 1999	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
40	0	début 2000 à fin 2000		40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
45	48	début 2001 à fin 2001			45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
50	50	début 2002 à fin 2002				50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
90	90	début 2003 à fin 2003					90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
100	100	début 2004 à fin 2004						100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
95	0	début 2005 à fin 2005							95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95
90	0	début 2006 à fin 2006							90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90
95	0	début 2007 à fin 2007								95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95
100	0	début 2008 à fin 2008									100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
105	38	début 2009 à fin 2009											105	105	105	105	105	105	105	105	105	105
115	163	début 2010 à fin 2010												115	115	115	115	115	115	115	115	115
125	173	début 2011 à fin 2011													125	125	125	125	125	125	125	125
135	183	début 2012 à fin 2012														135	135	135	135	135	135	135
145	194	début 2013 à fin 2013															145	145	145	145	145	145
165	126	début 2014 à fin 2014																165	165	165	165	165
185	149	début 2015 à fin 2015																	185	185	185	185
190	177	début 2016 à fin 2016																			190	190
220	171	début 2017 à fin 2017																				220
205	192	début 2018 à fin 2018																				205

Modèle de parc des LGV entre 1981 et 1995

Parc des LGV entre 1981 et 95			836	0	0	0	0	0	0	0	0	0	582	0	0	692	450	0
			1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995
		Nb de km de voie cible	0	836	836	836	836	836	836	836	836	836	1418	1418	1418	2110	2560	2560
		Age Moyen de la voie estimé		2,2	3,2	4,2	5,2	6,2	7,2	8,2	9,2	10,2	7,5	8,5	9,5	7,8	7,6	8,6
		age moyen de la voie														7,0	8,0	9,0
		Nb de km de ligne cible	0	836	836	836	836	836	836	836	836	836	1418	1418	1418	2110	2560	2560
km voie entrant	km gopeq so	Année de mise en service																
0	0	avant 1980	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
836	0	début 1981 à fin 1981		836	836	836	836	836	836	836	836	836	836	836	836	836	836	836
0	0	début 1982 à fin 1982			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	début 1983 à fin 1983				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	début 1984 à fin 1984					0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	début 1985 à fin 1985						0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	début 1986 à fin 1986							0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	début 1987 à fin 1987								0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	début 1988 à fin 1988									0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	début 1989 à fin 1989										0	0	0	0	0	0	0
582	0	début 1990 à fin 1990											582	582	582	582	582	582
0	0	début 1991 à fin 1991												0	0	0	0	0
0	0	début 1992 à fin 1992													0	0	0	0
692	0	début 1993 à fin 1993														692	692	692
450	0	début 1994 à fin 1994															450	450
0	0	début 1995 à fin 1995																0

Annexe 3 : Résultats des modèles utilisés pour préciser l'effet de l'évolution des effectifs de la SNCF sur la ponctualité des trains depuis 1954

Modèle utilisant le niveau des effectifs 5 années auparavant

```
Call:
lm(formula = TauxRetardGlobal ~ NbJoursGrèvesParAgent + EffectifPersonnelEpicSNCF_lag5ans +
  AgeMoyenMatérielMoteur + AgeMoyenRFN + IntensiteUsagerFN,
  data = data_PonctuGlobale)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-1.83032 -0.64332 -0.05768  0.44626  2.20555

Coefficients:
                Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)      0.379542   5.294591   0.072   0.943
NbJoursGrèvesParAgent
0.095428   0.057865   1.649   0.104
EffectifPersonnelEpicSNCF_lag5ans
-0.002706   0.037652  -0.072   0.943
AgeMoyenMatérielMoteur
-0.073842   0.077743  -0.950   0.346
AgeMoyenRFN
-0.070184   0.103404  -0.679   0.500
IntensiteUsagerFN
 0.044138   0.010434   4.230 8.25e-05 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.8741 on 59 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.871,    Adjusted R-squared:  0.86
F-statistic: 79.65 on 5 and 59 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

Modèle utilisant le niveau moyen des effectifs au cours des 5 années précédentes

```
Call:
lm(formula = TauxRetardGlobal ~ NbJoursGrèvesParAgent + EffectifPersonnelEpicSNCF_moy5ans +
  AgeMoyenMatérielMoteur + AgeMoyenRFN + IntensiteUsagerFN,
  data = data_PonctuGlobale)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-1.69890 -0.57064  0.01598  0.36486  2.29345

Coefficients:
                Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)      9.277822   5.557846   1.669 0.100352
NbJoursGrèvesParAgent
0.106104   0.056882   1.865 0.067110 .
EffectifPersonnelEpicSNCF_moy5ans
-0.068348   0.040804  -1.675 0.099222 .
AgeMoyenMatérielMoteur
-0.087550   0.073555  -1.190 0.238712
AgeMoyenRFN
-0.175733   0.116305  -1.511 0.136135
IntensiteUsagerFN
 0.034862   0.008717   4.000 0.000179 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.8541 on 59 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8768,    Adjusted R-squared:  0.8664
F-statistic: 84 on 5 and 59 DF,  p-value: < 2.2e-16
```