



HAL
open science

Dynamique de renouvellement du parc automobile : Projection et impact environnemental

Zehir Kolli

► **To cite this version:**

Zehir Kolli. Dynamique de renouvellement du parc automobile : Projection et impact environnemental. Sociologie. UNIVERSITE DE PARIS I, PANTHEON-SORBONNE, 2012. Français. NNT: . tel-00860364

HAL Id: tel-00860364

<https://theses.hal.science/tel-00860364>

Submitted on 10 Sep 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE DE PARIS 1. PANTHEON-SORBONNE
Sciences économiques. Sciences humaines.
Sciences juridiques et politiques

*Dynamique de renouvellement du parc automobile
Projection et impact environnemental*

Thèse pour le doctorat en Sciences Economiques
Soutenue publiquement le vendredi 13 avril 2012
Zéhir KOLLI

Directrice de thèse : Docteur Véronique SIMONNET, Maître de conférences (HDR),
Université de Paris I – Panthéon-Sorbonne

Composition du jury :

Professeur Yves BUSSIERE, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP)

Docteur Ariane DUPONT-KIEFFER, Chargée de Recherche, IFSTTAR-DEST

Professeur François GARDES, Université de Paris I – Panthéon-Sorbonne

Docteur Jean-Loup MADRE, Directeur de Recherche, IFSTTAR-DEST

Docteur Véronique SIMONNET, Maître de conférences (HDR), Université de Paris I –
Panthéon-Sorbonne

Docteur Pierre TAILLANT, Ingénieur ADEME



L'UNIVERSITE DE PARIS I PANTHEON-SORBONNE n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans cette thèse. Ces opinions doivent être considérées comme propres à son auteur.

Remerciements

Je voudrais adresser ma plus sincère gratitude à ma directrice de thèse, Véronique Simonnet pour m'avoir fait confiance tout au long de ces années, pour l'efficacité de son encadrement, ses conseils avisés et son engagement volontaire et pédagogique dans la modélisation économétrique des modèles de Poisson. Je suis profondément reconnaissant envers mes encadrants à l'Ifsttar : Ariane Dupont-Kieffer et Laurent Hivert, pour le temps qu'ils m'ont consacré durant ces trois années, me transmettant rigueur et clarté nécessaires à la recherche scientifique. Je remercie Pierre Taillant qui, du côté de l'Ademe, a activement participé au suivi de l'avancement des travaux malgré la distance qui sépare Valbonne de Marne-la -Vallée.

Je souhaite également remercier Jean-Loup Madre directeur du Dest pour ses nombreux conseils éclairés et pertinents. Mes plus vifs remerciements vont à chacun des membres du jury pour m'avoir fait l'honneur d'évaluer ma thèse en particulier ceux que je n'ai pas encore cités, à savoir, les Professeurs Yves Bussièrès et François Gardes. Je tiens aussi à citer Emeric Lendjel directeur du Master 2 Transports Internationaux à Paris 1 pour m'avoir guidé vers la voie de la recherche. Pour l'expérience enrichissante dans l'enseignement je suis reconnaissant envers Véronique Janod et Thomas Pellas de l'université Paris 7 Denis Diderot.

Je remercie Bernard Quételet et Nicolas Merle du Cete Nord Picardie, pour leur aide précieuse lorsqu'il a fallu mener, dans un précédent travail, des diagnostics environnementaux à l'échelle de l'Île de France à partir de l'EGT. Je remercie aussi Zoran Krakutovski et Julien Mollet pour leurs aides respectives sur l'EGT et les statistiques du CCFA.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à Jimmy Armoogum, Akli Berri et Roger Collet, pour leurs conseils avisés en économétrie et statistiques mais aussi pour le partage de leurs expériences qui ont certainement influencé sur ce travail. Un grand merci s'adresse aussi aux doctorants ou anciens doctorants, passés et présents au DEST, pour leur bonne humeur quotidienne : Giulia Cernicchiaro, Roger Collet, Cécilia Cruz, Yeh Chaofu, Virginie Dejoux, Quoc Dat Lam, Luis Martinez, Mariame Mbacké, Clotilde Minster, Nguyen Quang Nguyen, Thanh Tu Nguyen, Peter Ottman, Claire Papaix, Thi Huong Thao Pham, Toky Randrianasolo, Anaïs Rocci, Sophie Roux, Giorgia Servente, Jana Stachetzki, Jacques Suprpto, Ingrid Tafere, Irving Tapia, Shunning Yuan, Eny Yuliawati. Mention spéciale côté destination. Je n'oublie pas mes amis pongistes de début de thèse Pierre Franc et Emmanuel Kemel. Je cite encore, Philippe Marchal, Jimmy Armoogum et Gérard Macchi pour leur soutien logistique notamment en dépannages informatiques, installation de logiciels etc.

Par ailleurs je tiens à remercier infiniment ($+\infty$) Philippe (et Marina) Marchal pour ses (leurs) maintes livraisons¹ de M&M's® family pack. J'en profite aussi pour remercier Annie Berthelot, Annick Cavelier, Carlos De-melo, Katia Letalec, Marina Marchal et Delphine Mendy côté Ifsttar. Je remercie aussi Elda André côté Paris 1. Pour le suivi Ademe, je remercie Alexandra Carré-Dubois, Eliane Jallot et Valérie Pineau.

Je remercie également les autres membres du DEST que j'ai eu la possibilité de côtoyer de près ou de loin : Amakoé Adolehoume, Leslie Belton-Chevalier, Laurent Carnis, Martine Caruso, Mathieu De Lapparent, Fabrice Hamelin, Jean-Paul Hubert, Jacques Leonardi, Francis Papon, Stefan Petica, Françoise Potier, Manuel Ramos, Christophe Rizet, Jean-Luc Wingert... Je m'excuse auprès de ceux que j'aurais pu oublier.

Je ne saurais jamais remercier assez ma Famille, je leur dédie ce travail.

¹ Des livraisons qui ont parfois atteint 5,5 kilos équivalent à une valeur énergétique totale de 112 970 KiloJoules.

TABLE DES MATIERES

| | |
|--|-----------|
| REMERCIEMENTS | 5 |
| TABLE DES MATIERES | 6 |
| INTRODUCTION GENERALE | 11 |
| <i>CONTEXTE HISTORIQUE</i> | 12 |
| <i>LES PROBLEMATIQUES ENVIRONNEMENTALES ASSOCIEES A L'USAGE AUTOMOBILE</i> | 16 |
| <i>UNE APPROCHE DESAGREGEE FONDEE SUR DES LOIS DE SURVIE DU PARC</i> | 19 |
| <i>PLAN ET ARCHITECTURE GENERALE</i> | 21 |
| CHAPITRE 1 : LE PARC AUTOMOBILE, ESTIMATION ET PROBLEMATIQUES ENVIRONNEMENTALES | 23 |
| INTRODUCTION | 24 |
| 1 LA POLLUTION DES VEHICULES PARTICULIERS | 26 |
| 1.1. <i>Le bilan véhicule particulier</i> | 26 |
| 1.1.1 La technologie | 28 |
| 1.1.2 Le cadre réglementaire pour les véhicules neufs | 30 |
| 1.2. <i>L'estimation du volume du parc automobile : un outil indispensable à la quantification des émissions</i> | 32 |
| 2 ESTIMATION DU VOLUME DU PARC AUTOMOBILE | 33 |
| 2.1. <i>Sources statistiques</i> | 34 |
| 2.1.1. La taxe différentielle sur les véhicules à moteur ("vignette") | 36 |
| 2.1.2. Le fichier central des automobiles (FCA) | 36 |
| 2.1.3. Le fichier des contrôles techniques (FCT) | 37 |
| 2.1.4. Les comptages administratifs | 37 |
| 2.1.5. Estimation du parc par appariement du FCA et du FCT | 38 |
| 2.2. <i>Les enquêtes</i> | 39 |
| 2.2.1. L'Enquête de Conjoncture Auprès des Ménages (ECAM) | 40 |
| 2.2.2 Le panel Parc Auto | 40 |
| 2.2.3 Les limites des panels pour l'estimation du volume du parc automobile | 42 |
| 2.3. <i>Les modèles de prévision de l'équipement automobile</i> | 43 |
| 2.3.1 Les modèles de croissance agrégés | 43 |
| 2.3.2 Modèles démographiques | 43 |
| 2.3.3 Lois de survie du parc automobile | 44 |
| CONCLUSION | 45 |
| CHAPITRE 2 : MODELES AGREGES POUR L'ESTIMATION DU VOLUME DU PARC AUTOMOBILE FRANÇAIS | 47 |
| INTRODUCTION | 48 |
| 1. DEVELOPPEMENT DU MODELE AGREGÉ : REVUE DE LA LITTERATURE | 49 |
| 1.1. <i>Description de la croissance de l'équipement</i> | 49 |
| 1.2. <i>Le modèle agrégé : revue de la littérature</i> | 50 |
| 2 AJUSTEMENT SUR DONNEES FRANÇAISES | 53 |
| 2.1. <i>Méthode et algorithme d'ajustement non linéaire</i> | 56 |
| 2.1.1. Estimation d'un modèle de régression non-linéaire | 57 |
| 2.1.2. Algorithmes d'optimisation numériques | 57 |
| 2.1.2.1 Algorithmes de Gauss-Newton et de Newton-Raphson | 58 |
| 2.1.2.2 Identifiabilité des paramètres | 61 |
| 2.2. <i>Critères quantitatifs sur la qualité de l'ajustement aux données</i> | 63 |
| 2.2.1. Coefficient de corrélation (ou de Pearson) et de détermination | 64 |
| 2.2.2. Statistique du khi-2 | 65 |
| 2.2.3. Statistique de Fisher | 65 |
| 2.2.4. Tests retenus | 67 |
| 3. RESULTATS DES AJUSTEMENTS | 68 |
| 3.1. <i>Modélisation des taux de motorisation par ménage</i> | 69 |
| 3.1.1 Modèles logistique et Gompertz | 69 |
| 3.1.2 Modèles Tanner et Von Bertalanffy | 71 |

| | |
|--|------------|
| 3.1.3 Projections des taux de motorisations par ménage..... | 72 |
| 3.2. <i>Modélisation des taux de motorisation par individu</i> | 73 |
| 3.2.1 Modèles logistique et Gompertz..... | 73 |
| 3.2.2 Modèles Tanner et Von Bertalanffy | 75 |
| 3.2.3 Projections des taux de motorisation par individu de 19 ans et plus | 77 |
| 3.2.4. Ajustements sur données antérieures à 2001 | 78 |
| 3.3. <i>Modèles de croissance agrégés de la motorisation avec variables exogènes</i> | 79 |
| CONCLUSION | 85 |
| CHAPITRE 3 : VIEILLISSEMENT DU PARC AUTOMOBILE FRANÇAIS (1984-2008) : FACTEURS ET ENJEUX..... | 87 |
| INTRODUCTION | 89 |
| 1. LE PARC AUTOMOBILE FRANÇAIS SUBIT UN « VIEILLISSEMENT STRUCTUREL »..... | 91 |
| 1.1. <i>Effet de la diésélisation sur le parc automobile</i> | 97 |
| 1.1.1. Effet de la diésélisation sur le vieillissement du parc automobile | 97 |
| 1.1.2. Effet de la diésélisation et question du déploiement technologique | 102 |
| 1.1.2.1 Raisonnement en stock..... | 103 |
| 1.1.2.2 Raisonnement en flux (part de marché) | 106 |
| 1.2. <i>Effet du multi-équipement sur le vieillissement du parc automobile</i> | 107 |
| 1.2.1. Activité féminine et multi-équipement..... | 109 |
| 1.2.2. Etalement urbain et multi-équipement | 110 |
| 1.3. <i>Effet de la démocratisation et de la diffusion sociale de la voiture particulière</i> | 110 |
| 1.4. <i>Effet de la stagnation des immatriculations de véhicules neufs</i> | 111 |
| 2. LE VIEILLISSEMENT DU PARC AUTOMOBILE SELON LA DOUBLE DIMENSION : AGE ET KILOMETRAGE AU COMPTEUR | 113 |
| 2.1. <i>Durée de vie et longévité kilométrique du parc automobile</i> | 113 |
| 2.2. <i>Durée de vie et longévité kilométrique par type de motorisation</i> | 123 |
| CONCLUSION | 134 |
| CHAPITRE 4 : LOIS DE SURVIE DU PARC AUTOMOBILE | 137 |
| INTRODUCTION | 139 |
| 1 LES LOIS DE SURVIE DU PARC AUTOMOBILE | 140 |
| 1.1. <i>Principe d'estimation des taux de survie par âge à partir des données d'enquête</i> | 140 |
| 1.1.1. Quelques définitions | 140 |
| 1.1.2. Principe général | 141 |
| 1.1.3. Source statistique utilisée | 142 |
| 1.2. <i>Calculs des taux de survie longitudinaux et transversaux</i> | 143 |
| 1.2.1. Taux de survie longitudinaux | 143 |
| 1.2.2. Taux de survie transversaux..... | 147 |
| 2 AJUSTEMENTS SUR TAUX DE SURVIE TRANSVERSAUX ET CHOIX THEORIQUE DE LA LOI DE SURVIE | 153 |
| 2.1. <i>Choix de la loi de survie théorique</i> | 154 |
| 2.2. <i>Ajustement à l'aide d'une loi log-normale</i> | 156 |
| 2.3. <i>Ajustement à l'aide d'une loi log-logistique</i> | 158 |
| 2.4. <i>Ajustement à l'aide d'une loi de Weibull</i> | 160 |
| 2.5. <i>Ajustement des taux de survie longitudinaux par une loi de Weibull</i> | 165 |
| 3. CONCLUSION ET CHOIX OPTIMAL DE LA LOI DE SURVIE..... | 168 |
| 4 DUREE DE VIE DES VP PAR TYPE DE MOTORISATION : ESSENCE VERSUS DIESEL..... | 171 |
| 4.1. <i>Taux de survie par type de motorisation (Diesel/Essence)</i> | 171 |
| 4.1.1. Comparaison de taux de survie transversaux par type de motorisation | 171 |
| 4.1.2. Evolution temporelle des taux de survie transversaux pour chaque type de motorisation | 173 |
| 4.2. <i>Loi de survie par type de motorisation (Diesel/Essence)</i> | 174 |
| 4.2.1. Evolution par type de motorisation | 175 |
| 4.2.2. Comparaisons Essence/ Diesel..... | 179 |
| 5 LOIS DE SURVIES CONFORTANT LES STATISTIQUES DE VOLUME DE PARC AUTOMOBILE | 182 |
| 5.1. <i>Méthodologie</i> | 182 |
| 5.2. <i>Ajustements et résultats sur le parc national</i> | 183 |
| 5.3. <i>Ajustements et résultats par type de motorisation</i> | 187 |
| 6 DUREE DE VIE ET LONGEVITE DES VP | 188 |
| 6.1. <i>Choix du modèle : le modèle de Poisson</i> | 189 |
| 6.2 <i>Modélisation des taux de sortie à kilométrage au compteur donné</i> | 190 |

| | |
|---|------------|
| 6.2.1 Les données | 190 |
| 6.2.2 Estimation et résultats | 191 |
| 6.3 Modélisation des taux de sortie à effectif retardé donné..... | 193 |
| 6.3.1 Les données | 193 |
| 6.3.2 Estimation et résultats | 193 |
| CONCLUSION | 196 |
| CHAPITRE 5 : RENOUVELLEMENT, PROJECTION ET IMPACT ENVIRONNEMENTAL DU PARC AUTOMOBILE. | 201 |
| INTRODUCTION | 203 |
| 1 LE PARC AUTOMOBILE A L'HORIZON 2020 : LE SCENARIO « SANS RUPTURE »..... | 203 |
| 1.1 Scénarios et hypothèses de déploiement technologique..... | 203 |
| 1.2 Simulation du déclassement par lois de survie du parc..... | 205 |
| 1.2 Simulation du renouvellement du parc automobile | 206 |
| 2 LE PARC AUTOMOBILE A L'HORIZON 2020 : COMPARAISON ET CHOIX DE SCENARIOS AVEC INTRODUCTION DE MOTORISATIONS ALTERNATIVES | 208 |
| 2.1 Les différents couples technologies-énergies connus | 208 |
| 2.2 Les technologies développées..... | 210 |
| 2.2.1 Le moteur thermique à combustion interne..... | 211 |
| 2.2.1 Le véhicule hybride | 212 |
| 2.3. Modèles de déploiement technologique à l'horizon 2020..... | 213 |
| 2.3.1. Scenarios de diffusion technologique existants..... | 214 |
| 2.3.2. Classification des scenarios de diffusion technologique | 217 |
| 2.3.3. Freins liés au développement du véhicule hybride et tout-électrique | 219 |
| 2.3.4. Choix des scénarios avec déploiement technologique | 219 |
| 3 LE PARC AUTOMOBILE A L'HORIZON 2020 : SCENARIO DEPOORTER ET ASSIMON | 220 |
| 4 LE PARC AUTOMOBILE A L'HORIZON 2020 : SCENARIO DUVAL-DESTIN | 224 |
| 5. COMPARAISON DES SCENARIOS DE DEPOORTER ET ASSIMON ET DE DUVAL-DESTIN | 227 |
| 5.1 Structure du parc par type d'énergies selon le scénario Depoorter et Assimon | 227 |
| 5.2 Structure du parc par type d'énergies selon le scénario Duval-Destin | 229 |
| 6. INVENTAIRES D'EMISSIONS DU PARC AUTOMOBILE A L'HORIZON 2020..... | 230 |
| 6.1 Structure du parc automobile par énergie et catégorie de cylindrées à l'horizon 2020..... | 231 |
| 6.1.1 Structure du parc automobile par énergie et catégorie de cylindrée à l'horizon 2020 basée sur le scénario de déploiement Depoorter et Assimon | 233 |
| 6.1.2 Structure du parc automobile par énergie et catégorie de cylindrée à l'horizon 2020 basée sur le scénario de déploiement Duval-Destin | 235 |
| 6.2 Autres données et hypothèses pour l'utilisation de COPERT IV..... | 239 |
| 6.2.1 Usage annuel des véhicules particuliers et kilométrage total..... | 239 |
| 6.2.2 Répartition du kilométrage des voitures par réseau et vitesses moyennes par réseau | 240 |
| 6.2.3 Température et pression ambiante | 240 |
| 6.3 Résultats et bilan des inventaires d'émissions..... | 241 |
| CONCLUSION | 244 |
| CONCLUSION GENERALE..... | 247 |
| PRINCIPAUX RESULTATS..... | 247 |
| Application du modèle agrégé pour la projection des taux de motorisation | 247 |
| Durée de vie des véhicules particuliers | 252 |
| Quid du lien entre durée de vie et longévité..... | 254 |
| Projection et impact environnemental | 255 |
| EXTENSIONS ET PISTES DE RECHERCHE | 256 |
| Mise en relation des facteurs démographiques : impact des taux de sortie sur les immatriculations de véhicules neufs | 256 |
| L'estimation des lois de survie | 256 |
| La projection des émissions | 257 |
| Les impacts environnementaux du cycle de vie des véhicules | 257 |
| BIBLIOGRAPHIE PAR CHAPITRES..... | 259 |
| Bibliographie de l'introduction générale | 259 |
| Bibliographie du chapitre 1 | 260 |

| | |
|--|------------|
| <i>Bibliographie du chapitre 2</i> | 262 |
| <i>Bibliographie du chapitre 3</i> | 264 |
| <i>Bibliographie du chapitre 4</i> | 265 |
| <i>Bibliographie du chapitre 5</i> | 266 |
| <i>Bibliographie de la conclusion générale</i> | 267 |
| TABLE DES FIGURES PAR CHAPITRE | 269 |
| <i>Figures du chapitre 1</i> | 269 |
| <i>Figures du chapitre 2</i> | 269 |
| <i>Figures du chapitre 3</i> | 269 |
| <i>Figures du chapitre 4</i> | 270 |
| <i>Figures du chapitre 5</i> | 271 |
| TABLEAUX PAR CHAPITRES | 273 |
| <i>Tableaux du chapitre 1</i> | 273 |
| <i>Tableaux du chapitre 2</i> | 273 |
| <i>Tableaux du chapitre 3</i> | 273 |
| <i>Tableaux du chapitre 4</i> | 273 |
| <i>Tableaux du chapitre 5</i> | 274 |
| ANNEXES | 275 |
| <i>Annexe 1-1 : "Adieu à la vignette pour les particuliers" Intervention de Laurent Fabius LUNDI 20 NOVEMBRE 2000 (Ministre de l'Économie des Finances et de l'Industrie):</i> | 275 |
| <i>Annexe 2-1 : Données</i> | 276 |
| <i>Annexe 2-2 : Test de stationnarité KPSS</i> | 277 |
| <i>Annexe 3-1 : Histogrammes tridimensionnels (vues de face)</i> | 278 |
| <i>Annexe 3-2 : Distributions tridimensionnelles (vues de haut)</i> | 280 |
| <i>Annexe 4-1 : La loi de Weibull</i> | 283 |
| <i>Annexe 4-2 : La loi log-normale</i> | 289 |
| <i>Annexe 4-3 : La loi log-logistique</i> | 291 |
| <i>Annexe 4-4 : Ajustement Weibull sur taux de survie transversaux pour les années 1984 à 2007</i> | 293 |
| <i>Annexe 4-5 : Ajustement d'une loi log-normale sur taux de survie transversaux pour les années 1984 à 2007</i> | 299 |
| <i>Annexe 4-6 : Ajustement d'une loi log-logistique sur taux de survie transversaux pour les années 1984 à 2007</i> | 304 |
| <i>Annexe 4-7 : Ajustement pondérés par une loi exponentielle d'une loi de weibull sur taux de survie longitudinaux</i> | 309 |
| <i>Annexe 4-8 : Paramètres des ajustements d'une loi Weibull sur taux de survie transversaux (2000 à 2008) par type de motorisation</i> | 310 |
| <i>Annexe 5-1 : Moyennes de kilométrages annuel et au compteur par type de motorisation et de gammes</i> | 311 |
| <i>Annexe 5-2 : Minimales et maximales des températures moyennes mensuelles</i> | 312 |
| RESUME | 313 |
| ABSTRACT | 313 |

Introduction Générale

CONTEXTE HISTORIQUE

L'automobile est aujourd'hui omniprésente, dans le monde. En 2010, avec le développement du marché chinois, c'est en moyenne 30 véhicules particuliers et utilitaires légers qui sont immatriculés chaque seconde [CCFA, 2010]. En France, selon la période, c'est entre 1,5 à 1,7² véhicules particuliers neufs qui sont immatriculés chaque seconde.

En 2008, 84% des ménages français disposent d'au moins une voiture. D'autre part, avec près de 83% des voyageurs-kilomètres parcourus tous modes de transport confondus en 2008 (représentant 721 Mds véh-km) [INSEE, 2009] la voiture particulière reste le mode de transport dominant. A titre de comparaison, en restant dans la catégorie des transports de voyageurs, la part modale du transport par rail est placée en deuxième position, ce qui la situe loin derrière celle de l'automobile. Estimée à près de 11% en 2008 (représentant 98 Mds véh-km) [INSEE, 2009], la part modale du transport par rail est, en effet, presque 8 fois inférieure à celle de l'automobile.

En matière d'usage à l'échelle nationale, l'automobile est notamment caractérisée par des trajets relativement courts. Selon l'Ademe (2010) 50% des déplacements réalisés en ville sont inférieurs à 3 kilomètres. Selon Armoogum *et al.* (2010) en 2008, 65% des déplacements locaux (inférieurs à 80 kilomètres) sont réalisés en voiture. Ces déplacements locaux effectués en voiture représentent près de 83% des distances en 2008 [Armoogum *et al.*, 2010]. L'automobile constitue ainsi le principal mode de déplacement des Français. Le choix de mobilité favorisant l'automobile n'est pourtant pas neutre sur le revenu des Français. Entre 1998 et 2006, les ils allouent chaque année en moyenne plus de 12% de leur budget à l'acquisition et à l'utilisation de leur véhicule [Juillard, 2007]. Bien qu'il en coûte cher à l'automobiliste, le constat est évident, l'automobile est aujourd'hui un fait mondial [Dupuy, 1995], nous faisant presque oublier que cela n'a pas toujours été le cas.

Souvenons nous, l'automobile s'était progressivement imposée dans le paysage des pays industrialisés au début du XX^{ème} siècle comme un nouveau mode de transport s'adressant à une multitude d'acteurs et de secteurs d'activité, propices à créer ce qui allait devenir le *monde automobile* [De Dion, 1999]. Les premiers usages, dans les pays industrialisés, sont pourtant aristocratiques. Mais ce petit monde automobile, au départ très restreint ne tarde pas à s'élargir. Progressivement les grands industriels, notables et propriétaires terriens puis les professions indépendantes sont conquises, médecins, vétérinaires, représentants et finalement les commerçants et artisans adoptent massivement ce nouveau mode de transport [Dupuy, 1995 ; Gardon, 2009]. Aux Etats-Unis, les constructeurs historiques ne se satisfont pas de cette clientèle restreinte, ils visent un marché beaucoup plus large qui leur garantirait d'importantes économies d'échelles. Bientôt

² 1,68 en 2010.

certain visionnaires du monde automobile incarnés en la personne d'Henry Ford président de la Ford Motor Company ou de Ransom Eli Olds président de la Olds Motor Vehicle Company³ comprennent l'intérêt industriel de populariser la voiture en la rendant financièrement accessible au plus grand nombre. Pour accroître cette accessibilité, ces derniers adaptent l'outil et augmentent les cadences de production : c'est la naissance du travail à la chaîne qui permet de baisser fortement les coûts de production et de faire de formidables économies d'échelles basées sur la standardisation de la voiture, étape nécessaire à sa diffusion massive. L'année 1908 sera la date de naissance de la mythique *Ford T*, elle sera noire en raison du prix moindre et de la durabilité de cette couleur. Le succès de La Ford T se mesurera au nombre de véhicules produits qui atteignent la quantité vertigineuse de 16,5 millions d'exemplaires pour une longévité de production de près de 20 ans.

En Europe, cette massification de l'automobile, ralentie par la Grande Dépression des années 30 et la Seconde Guerre Mondiale arrive plus tard [Dupuy, 1995]. En France, berceau⁴ de la civilisation automobile [Bardou *et al.*, 1977], toute une série de facteurs permettent la massification et la diffusion de l'automobile (voir figure 1). Il faut pourtant distinguer deux types de facteurs, il y a ceux qui initient de façon directe la motorisation des ménages et ceux qui accompagnent cette motorisation. Parmi les facteurs qui offrent son premier souffle à la motorisation des ménages, il faut souligner l'offre automobile naissante et particulièrement le lancement de modèles bon marché et à grand succès. En France, c'est le développement de la 2CV en 1939, voiture rustique aux antipodes de la *Ford T* qui allait devenir le grand succès des années 30. Les 2 CV seront produites à raison de plusieurs centaines d'exemplaires par jour et ce rythme se poursuivra plusieurs années après la Seconde Guerre Mondiale.

Nous dénombrons parmi les nombreux facteurs qui accompagnent et encadrent la motorisation certains faits marquants liés à la réalisation de grands ouvrages et infrastructures comme l'ouverture du premier tronçon de « l'autoroute du Sud » en 1960, l'achèvement du boulevard périphérique à Paris en 1973 (voir figure 1), ou encore plus récemment l'achèvement du viaduc de Millau en décembre 2004, maillon essentiel de l'autoroute A75 permettant de relier Clermont-Ferrand à Béziers.

³ Rachetée par Général Motors en 1908.

⁴ Selon l'*Annuaire général de l'automobile* de l'année 1898, la France aurait alors compté 719 constructeurs, dont 327 en Province, suivie, de fort loin, par l'Allemagne (76), la Belgique (63), la Grande-Bretagne (49), l'Italie (26), la Suisse (24), la Hollande (11). Ces constructeurs se situaient principalement à Paris [Flonneau, 2005].

| |
|--|
| <p>1939 – Lancement de la 2 CV (conçue en 1936) par André Lefevbre</p> <p>1946 – Naissance de la 4 CV Renault « la voiture de tous les français »</p> <p>1953 – Création du Fonds Spécial d'Investissement Routier (FSIR) qui servira à affecter les recettes des taxes sur les carburants au financement de l'infrastructure routière.</p> <p>1956 – Instauration de la vignette automobile</p> <p>1958 – La loi impose à tout propriétaire d'un véhicule d'être couvert par une assurance garantissant sa responsabilité civile</p> <p>1960 – Ouverture du premier tronçon de l' « autoroute du Sud »</p> <p>1961 – Renault lance la 4 L</p> <p>1970 – Mise en service d'une liaison autoroutière continue entre Lille et Marseille</p> <p>1972 – Renault lance la R5 « une voiture pour les femmes »</p> <p>1973 – Achèvement du boulevard périphérique à Paris (37 km)</p> <p>1973 – Après les 17 000 morts sur la route en 1972, année record, institution de la limitation de vitesse à 90 km/h sur les routes et 130 km/h sur les autoroutes et port obligatoire de la ceinture de sécurité sur route (il ne sera rendu obligatoire en agglomération qu'en 1980)</p> <p>1989 – Apparition du supercarburant sans plomb</p> <p>1992 – Aide de 2000Fr de l'Etat pour l'achat d'un véhicule équipé d'un pot catalytique (entre le 1er octobre et le 31 décembre 1992)</p> <p>1993 – Fort relèvement de la TIPP (Taxe Intérieure sur les Produits Pétroliers)</p> <p>1994 – (fev 94 à juin 95) Mise en place de la « <i>Balladurette</i> » (prime au remplacement de 5000Fr pour les véhicules de plus de 10 ans en échange de l'achat d'une voiture neuve) visant à relancer le marché automobile</p> <p>1995 – (oct 95 à oct 96) Mise en place de la « <i>Jupette</i> » (prime au remplacement de 5000 à 7000Fr aux acquéreurs d'une voiture neuve en échange d'un véhicules de plus de 8 ans)</p> <p>1999 – Plan (sur 7 ans) de réduction du différentiel de taxation entre le gazole et l'essence</p> <p>2000 – Suppression de la vignette automobile</p> |
|--|

Figure 1 : Faits marquants ayant influencé la motorisation des ménages français

Mais le développement et la diffusion de l'automobile à un rythme aussi soutenu a pu bénéficier du concours de l'implantation de nombreuses stations de distribution de carburant qui vont se multiplier au sein des villes et le long de certaines routes de campagne [Gardon, 2009]. Ces petites stations de distribution se regrouperont progressivement en grandes stations-service. En 1917, ce sont les auto-écoles qui viennent s'ajouter au paysage du monde automobile. Plus tard en 1921, face aux premiers accidents de la route, vient la nécessité de mettre en place un code de la route. Parmi les facteurs stratégiques liés au développement de l'automobile en France, la création de l'Union Routière en 1948 financée par les compagnies pétrolières et regroupant de nombreuses associations d'usagers de la route semble avoir été un acteur important par ses actions en faveur de l'essor automobile [Dupuy, 1995]. Sous la direction de Georges Gallienne, ancien responsable de la division des véhicules commerciaux de Renault, l'Union Routière participera activement à la création du Fonds Spécial d'Investissement Routier (FSIR) en 1953. Le FSIR servira à affecter les recettes des taxes sur les carburants au financement de l'infrastructure routière. Si l'essor de l'automobile ne peut être totalement imputable à la création du FSIR, son action en tant que catalyseur d'une offre devant répondre à des besoins profonds est incontestable. Cet effet de catalyse sur l'expansion automobile est illustré par ce que les ingénieurs américains

appelaient « cercle magique de l'asphalte » [Dupuy, 1995] : plus il y a de routes, plus les gens roulent et plus il y a de recettes fiscales issues de ventes de carburant qui financent la construction de routes supplémentaires.

Bientôt, le succès croissant de l'automobile qui profite à sa diffusion ainsi qu'à son essor en fait le nouveau mode de transport dominant. Dès lors, tout est pensé à sa mesure, l'infrastructure, l'architecture, les lieux de vie, les lieux d'activité et d'emploi.

L'automobile requiert une adaptation importante de l'espace urbain, la construction de garages par milliers, de parkings, la création de carrefours giratoires, de passages cloutés, les horodateurs, les stations services *etc.* Quant à l'espace rural et périurbain il subira de profondes modifications et morcellements puisque les routes et autoroutes viennent s'ajouter aux structures linéaires de grande taille déjà en place (comme les lignes hautes tension ou les voies ferrées).

L'automobile aujourd'hui liée au désir de modernité et au développement économique fut à ses débuts en concurrence avec la voiture à traction animale et principalement hippomobile. Les Chars, charrettes, calèche, diligence, chariots, carrioles, voiturettes et autres tramways à traction animales étaient les modes de transport privilégiés dans les campagnes et dans les villes et un espace important leur était dédié.

Ce qui change avec l'automobile c'est le degré d'importance de la mutation de l'espace qui s'opère, l'automobiliste ne pense plus en termes de distance et de proximité mais en termes de temps et d'accessibilité [Dupuy, 1995, 1999]. L'automobile contribue à l'étalement urbain et à l'allongement des distances domicile-travail : « *En améliorant l'accessibilité à presque chaque endroit en termes de coûts monétaires et de temps, la voiture a permis l'allongement de la distance entre le domicile et les lieux des diverses activités* » [Berri, 2005]. L'étalement urbain, conséquence des possibilités offertes par l'automobile en devient aussi une cause puisque la possession d'une voiture tend à devenir une nécessité [Beaucire, 1996 ; Andan, 1994 ; Dupuy ; 1999, 2006]. Cette nécessité à l'égard de l'automobile, conséquence de la périurbanisation, est décrite comme une dépendance à l'automobile : « *En augmentant par ailleurs les distances entre les foyers et les bassins d'emploi, les zones d'activité, de soins, d'éducation, etc., la périurbanisation a eu en outre pour effet de renforcer les besoins en équipement automobile dans les foyers, créant ainsi une forme de dépendance* » [Collet, 2007].

Dans les faits, la croissance du taux d'équipement des ménages, facilitée conjointement par la hausse globale du niveau de vie, la baisse des coûts de production des véhicules ainsi que le développement des infrastructures routières ont profondément modifié les habitudes de mobilité en faveur de l'automobile. Le taux d'équipement, donné par le pourcentage de ménages motorisés s'élève à 21% en 1953 et passe à 60% dans les années 70 [Dupuy, 1995]. Dès 1984 près de 75% des ménages sont équipés, le seuil de saturation de

l'équipement n'est alors plus très loin. Après une nette stagnation entre 1998 et 2005 à 80%, le taux d'équipement s'affiche pourtant autour de 84% en 2007-2008. Le multi-équipement, second souffle pour le marché automobile, s'explique en partie par l'accession des femmes au permis de conduire. En 2008 elles sont 76 % à posséder le permis contre 64 % en 1994 et 47 % en 1982 [Robin, 2010]. Mais il s'explique aussi par l'étalement urbain qui entretient un taux d'équipement élevé dans des ménages périurbains. On estime que 4,3 millions (21%) de ménages sont multi-équipés en 1984, ils sont 10,1 millions (38%), soit plus de deux fois plus nombreux à l'être en 2008.

Comme nous pouvons le constater, l'automobile a une contribution à la fois déterminante et marquante sur la mobilité et sur les choix résidentiels [Berri, 2005]. Mais nos choix de mobilité favorisant le « tout automobile » ne se font pas sans d'importantes contreparties environnementales. Il est tout de même essentiel de rappeler que ces contreparties ne doivent pas occulter les services quotidiens rendus par l'automobile. L'abondante littérature qui traite la question de « l'Automobile » est assez divisée sur la question des maux et des bienfaits associés à l'automobile. C'est pourquoi, l'attitude employée tout au long de cette recherche est celle de la neutralité recommandée par Sauvy (1968) « *abandonnez votre position personnelle, vos intérêts privés, vos frustrations, vos soucis* ».

LES PROBLEMATIQUES ENVIRONNEMENTALES ASSOCIEES A L'USAGE AUTOMOBILE

Très tôt, dès les années 1900, on perçoit des problèmes d'acceptabilité des véhicules à moteur. Les nuisances associées à l'automobile sont au départ loin d'être réductibles au caractère bruyant de sa mécanique. L'automobile est alors dénoncée comme étant dangereuse et poussiéreuse en plus d'être bruyante [Gardon, 2009].

Selon Flink (1990) la voiture a eu depuis sa création des effets profonds sur les composantes économiques, sociales, morales et environnementales de la société. Son apparition provoque une modification du paysage économique avec l'apparition de nouveaux acteurs tels que les pétroliers et les grands industriels du secteur automobile (constructeurs et équipementiers). Ce nouveau paysage modifie non seulement les habitudes des consommateurs, mais impacte également le secteur de l'emploi et le système bancaire. Dans les familles, les priorités ont changé, et cela est perceptible dans la consommation des ménages. Elles ont soudainement estimé que les automobiles étaient indispensables à la vie quotidienne et cela au prix de sacrifices faits sur d'autres postes de dépenses.

D'autre part, la popularisation de l'automobile a aussi participé à la modification de la structure sociale des ménages. L'automobile a modifié l'organisation de l'équilibre familial classique, les habitudes de vie, de travail et de loisirs. L'automobile, présentée et vécue initialement comme un symbole de liberté et de différence fleuretant avec la non-conformité,

allait créer un mode de vie uniforme avec des contreparties sociales concernant les habitudes familiales. Par exemple, les longues discussions familiales après le dîner allaient progressivement être remplacées par des promenades familiales en voiture.

La question du lien entre automobile et moralité soulevée par Flink (1990) doit se lire à la lumière de l'histoire religieuse d'une Amérique puritaine qui attribue à l'automobile une responsabilité dans la régression des valeurs familiales patriarcales ainsi que des valeurs morales. L'automobile ayant permis, selon l'auteur une émancipation à l'excès des adolescents en leur attribuant un nouvel espace de liberté et d'expression. Ces besoins d'émancipation permettant même l'accès à des espaces dédiés à l'automobile comme les projections cinématographiques dans les drive-in popularisés aux États-Unis dans les années 50.

Pour conclure Flink (1990) estime que l'automobile a affecté l'espace et l'environnement de façon assez profonde qui dépasse celle des lieux d'usage. En effet, la construction automobile exige d'importantes ressources de matières premières. Les besoins massifs de l'industrie automobile ont affecté le paysage économique, géographique et environnemental de nombreuses régions dans le monde qui ont dû répondre à la demande de ressources comme le minerai de fer (acier), le verre, le pétrole (huile et matières plastiques), le caoutchouc, etc.

En France, l'histoire récente des problématiques environnementales s'est dessinée au gré des chocs pétroliers. Un an après le premier choc pétrolier de 1973, l'Agence pour les Economies d'Énergie (AEE) est créée afin de réduire la facture énergétique aux produits pétroliers en misant sur la filière électronucléaire. Quelques années plus tard, suite au second choc pétrolier de 1979, l'AEE cherche à influencer sur les comportements avec le lancement de la campagne de "chasse au gaspi" : chaque citoyen est responsabilisé par des campagnes publicitaires qui l'invitent aux économies d'énergie et notamment à l'éco-conduite. Rapidement à cette préoccupation de baisse de la dépendance énergétique s'ajoutera celle d'une pollution atmosphérique latente.

En 1986, alors que les médias du monde entier sont rivés sur la coupe du monde de football organisée au Mexique, les images de la ville de Mexico enfumée sous un brouillard d'ozone verdâtre est un déclencheur de la prise de conscience mondiale. Dès lors, l'image valorisée de l'automobile ne tarde pas à être écornée. Parmi les nombreuses dimensions valorisantes de progrès technologique et sociétal qu'on lui associe, elle devra à jamais traîner celles des nuisances environnementales englobant la pollution locale et sonore (moteur, klaxon), la congestion, le bruit, la pollution visuelle (éclairages lumineux émis par les lampadaires et les phares de voitures), l'insécurité, l'accidentologie ainsi que la transformation de l'espace [Dupuy, 1995]. Dans la foulée en 1985, le risque de disparition de la couche d'ozone stratosphérique, bouclier naturel contre des rayons ultraviolets ayant des

effets nocifs et cancérigènes sur l'homme et l'animal, est mis en évidence au dessus de l'Antarctique. Plus tard, au début des années 90, c'est la lutte contre la pollution globale associée au réchauffement climatique qui devient prioritaire, les émissions de gaz à effet de serre (GES) associées aux activités humaines étant les principales causes. En France, ces nuisances sont d'autant plus imputables à l'automobile qu'elle est au sein des transports le mode qui contribue le plus à la dérive du bilan énergétique et des émissions de GES [CITEPA, 2011].

Concernant le bilan environnemental, selon le CITEPA (2011), les véhicules particuliers génèrent en 2009, 69,5% du total des émissions de CO₂.eq (équivalent CO₂) issu du secteur des transports estimé à 130,9 Mt CO₂.eq (méga tonnes ou millions de tonnes). D'autre part le parc automobile est aussi une source d'externalités environnementales négatives en terme de santé, d'accidentologie et d'environnement local (bruit, polluants locaux).

Pour contrer ces externalités négatives, la France s'est engagée dans un processus de réduction des émissions en ratifiant le protocole de Kyoto en novembre 1997. Rappelons que ce protocole établit des objectifs de réduction d'émissions pour six GES et la France, comme les pays cités dans l'annexe du protocole⁵, s'engage, à l'horizon 2008-2012, à réduire globalement ses émissions de 5,2 % par rapport à celles de 1990. Par ailleurs, s'inscrivant dans une vision à long terme, le Livre Blanc sur les Energies (2003) fixe l'objectif de diviser par quatre le niveau des émissions de GES de 1990 à l'horizon 2050 : c'est l'objectif dit du « facteur 4 ».

L'ensemble des problématiques associées aux émissions de CO₂ et de polluants locaux imputables à l'automobile soulignent l'importance des inventaires d'émissions ainsi que des statistiques sur le volume et l'usage du parc automobile. En effet comment savoir si les objectifs environnementaux sont en voie d'être atteints sans estimations fiables ? Or, avec la disparition de la vignette en 2001, annoncée le 31 août 2000 par Laurent Fabius⁶, dans le cadre d'un plan global d'allègement d'impôt de 120 Milliards de Francs, c'est un pilier pour l'estimation du parc automobile en circulation qui a disparu. En effet, la vignette ou "taxe différentielle sur les véhicules à moteurs"⁷ était aussi un comptage administratif qui permettait d'estimer le volume du parc par le nombre total de véhicules soumis à la fiscalité

⁵Au 14 janvier 2009, 184 États avaient déposé leurs instruments de ratification, d'accession, d'approbation ou d'acceptation du protocole d'après l'UNFCC (United Nations Framework Convention on Climate Change)

⁶ Voir en Annexe 1 pour son discours à la Cité de l'Automobile de Mulhouse - Musée National - Collection Schlumpf.

⁷ Avant 2001 tous les véhicules étaient assujettis à cette taxe annuelle d'utilisation, gérée par le ministère chargé des finances par l'intermédiaire de la direction générale des impôts (DGI). Elle concernait tous les véhicules de moins de 16 tonnes qui n'avaient pas atteint l'âge de 25 ans (au delà de cet âge, la vignette était gratuite mais restait obligatoire). La tarification annuelle de la vignette était établie à partir de la puissance fiscale (10 catégories) et de l'âge (4 classes), ne permettant ainsi aucune distinction entre les véhicules particuliers et les utilitaires.

française en compilant les effectifs issus de cette source. Pourtant, la finesse des calculs requis pour effectuer un inventaire fiable des émissions pour les véhicules particuliers pousse à obtenir des statistiques désagrégées par type d'année modèle, énergie, normes euros etc.

UNE APPROCHE DESAGREGEE FONDEE SUR DES LOIS DE SURVIE DU PARC

Les méthodologies ainsi que les approches ont changé au grès de l'évolution des problématiques associées au développement de la motorisation. En effet, les premières questions associées à l'essor rapide de la motorisation dès les années 50 et jusque dans les années 80, sont posées par les administrations locales et nationales, régionales, mais aussi par les constructeurs automobiles. Les planificateurs des administrations locales et nationales, cherchent à prédire la demande de transport, la consommation d'énergie et les niveaux d'émission, aussi bien que l'impact probable de mesures de politique publique. Ils cherchent aussi à veiller à ce que le développement des infrastructures soit couplé au développement rapide de la motorisation des ménages. Les constructeurs automobiles, pour leur part cherchent à prédire la demande de véhicules neufs. C'est alors que naissent les premiers modèles de croissance agrégés d'équipement et de motorisation des ménages destinés à effectuer des prévisions qui serviront de base à la planification de la construction de routes [Smeed, 1951 ; Tanner, 1958 ; Tanner, 1978].

Les problématiques modernes associées aux inventaires d'émissions montrent que l'usage de séries temporelles concernant le volume du parc automobile est une condition nécessaire mais non suffisante. L'inventaire national des émissions, outil indispensable pour estimer les émissions nationales de GES et de polluants locaux imputables aux véhicules particuliers, nécessite des données relativement désagrégées sur les véhicules qui composent le parc automobile principalement suivant les catégories de motorisation et de générations (année de première mise en circulation). En effet, il s'agit de conduire des analyses suffisamment désagrégées pour déceler les changements de structure du parc ayant entraîné une modification à la baisse ou à la hausse des niveaux d'émissions de GES et polluants locaux.

L'approche actuelle des inventaires d'émissions ou de leurs projections repose sur la simulation du renouvellement du parc automobile à l'aide de lois de survie. Cette méthodologie est basée sur une conception réaliste du mouvement naturel du parc automobile. Dans une telle optique, le volume du parc automobile français est traité comme un stock, une grandeur dont la dynamique démographique est animée principalement par deux flux. D'une part, le « flux entrant » composé des immatriculations de véhicules neufs assez bien connues à partir des statistiques de ventes fournies par les constructeurs (CCFA) ou du fichier des cartes grises. D'autre part, le « flux sortant », composé pour partie de

véhicules exportés définitivement hors du territoire mais principalement de véhicules mis au rebut pour divers motifs : obsolescence, reprise suite un programme de mise à la casse, véhicule accidenté jugé irréparable, etc.

Le recours aux lois de survie pour mesurer la vitesse de sortie, ou l'obsolescence des véhicules particuliers est fondé sur les travaux de [Thomas \(1970\)](#) et de [Moutardier et Glaude \(1978\)](#). La méthodologie retenue par [Moutardier et Glaude \(1978\)](#), pour estimer les taux de survie longitudinaux ainsi que les lois de survie paramétriques associées, avait été formulée avec l'objectif de prévoir la demande automobile à l'horizon 1985. La méthodologie des inventaires d'émissions est aujourd'hui utilisée dans de nombreux pays (par ex. Allemagne, Brésil, Espagne, Etats-Unis, Finlande, Grèce, Italie, Suède etc.) afin de dresser un bilan écologique des émissions de polluants locaux et de GES issus des gaz d'échappements à l'échelle nationale. Jusqu'à récemment, notamment avant les travaux de [Gallez \(1994a\)](#) et [Bourdeau \(1998\)](#), les inventaires d'émissions étaient estimés en appliquant un coefficient d'émission moyen au volume du parc automobile. Nous savons aujourd'hui, depuis les travaux précités que les inventaires d'émissions ainsi que les projections environnementales associées requièrent des données de parc automobile désagrégées par année de construction, de motorisation et de cylindrée sur lesquelles sont appliquées des coefficients d'émissions moyens pour chaque catégorie de véhicule.

Dans un tel contexte, cette thèse s'inscrit dans la continuité des travaux portants sur l'estimation de la durée de vie des véhicules particuliers, initiée en France par les travaux de [Thomas \(1970\)](#) puis de [Moutardier et Glaude \(1978\)](#). Depuis les travaux de [Gallez \(1994a\)](#) en France ou de certaines recherches internationales [[Zachariadis et al., 1995](#) ; [Greenspan et Cohen, 1996](#) ; [Chen et Niemeier, 2004](#)], les objectifs de l'estimation de la durée de vie des véhicules ne sont plus tournés vers l'estimation de la demande automobile mais vers des problématiques environnementales, principalement des inventaires d'émissions [[Zachariadis et al., 1995](#) ; [Bourdeau, 1998](#); [Lacour et Joumard, 2002](#) ; [Hugrel et Joumard, 2004](#)]. Les lois de survie du parc automobile sont devenues des outils techniques destinés à prévoir le volume et la structure du parc automobile par projection temporelle des paramètres des lois ajustées par catégorie de véhicules. Ces lois permettent aussi de mieux aborder la dynamique démographique en suivant les générations successives de véhicules afin de quantifier les rejets issus des gaz d'échappement (polluants, GES) et de l'abrasion (freins, pneus, routes etc.) à travers les inventaires d'émissions. L'estimation de lois de survie différenciées par catégories homogènes de véhicules permet d'approcher et de projeter la structure du parc en donnant la proportion de chaque catégorie (par année de construction et type de carburant,...) de véhicule qui subsiste dans le parc année après année.

PLAN ET ARCHITECTURE GENERALE

Après un chapitre introduisant les problématiques environnementales inhérentes à la circulation des véhicules particuliers, l'architecture de la recherche vient s'articuler chronologiquement autour de trois grands axes : les modèles de croissance agrégés de la motorisation, le vieillissement du parc automobile et la durée de vie des véhicules. Ces trois axes, qui constituent l'armature de cette thèse, sont destinés à accompagner le lecteur au fil d'un récit qui reflète les problématiques et les questionnements scientifiques qui ont jalonné l'histoire de la recherche et de la compréhension de l'évolution de la motorisation des ménages.

Afin d'apporter un maximum de clarté au débat concernant le développement des problématiques environnementales liées à la motorisation des ménages, notre plan se conforme à la chronologie de l'histoire de la compréhension de l'équipement des ménages à la lumière de la mutation progressive des motivations économiques de planification vers des problématiques environnementales. C'est ce glissement opéré dans l'usage des méthodes de modélisations utilisées au fil du temps que nous cherchons à retranscrire.

Dans cette optique le premier chapitre présente un cadrage sur les problématiques environnementales associées au parc automobile de véhicules particuliers. Le deuxième chapitre est quant à lui consacré à la description du développement des premiers modèles appliqués au processus de motorisation des ménages : les *modèles de croissance agrégés*. Rappelons qu'ils ont été développés en Grande-Bretagne par [Smeed \(1951\)](#) puis par [Tanner \(1958\)](#) afin de projeter le niveau et la croissance du parc automobile avec l'objectif principal de prévoir la demande d'infrastructures routières. Ce deuxième chapitre nous permet d'étudier et d'analyser la pertinence d'un ajustement des taux de motorisation français par ménage et par tête. Nous comparerons alors différents types de modèles théoriques sigmoïdaux à seuil de saturation, nous discuterons alors sur les questions associées à l'existence et à la position des seuils de saturation, du niveau de motorisation à long terme, ainsi que de l'inflexion de la motorisation.

Le chapitre trois permet de considérer l'une des premières caractéristiques observées concernant la structure du parc automobile tenant à la hausse continue de l'âge moyen du parc depuis près de 30 années, à savoir le vieillissement du parc automobile observé depuis au moins 1972 [[Dumont et Ledet, 1985](#)]. L'observation et la mesure du vieillissement du parc automobile selon les dimensions de l'âge et de l'usage à partir du temps calendaire et du kilométrage au compteur nous permet d'orienter la suite de la thèse sur un certain nombre de questions concernant les dynamiques démographiques qui contribuent à modifier durablement la structure du parc automobile. Nous questionnons ainsi un certain nombre de facteurs qui ont pu jouer un rôle sur le vieillissement du parc, telle la diésélisation, le multi-équipement des ménages, la diffusion sociale de l'automobile ainsi que la stagnation du

volume des immatriculations. Au-delà des facteurs avancés, il s'agit de mettre en lien le vieillissement observé du parc automobile avec l'allongement de la durée de vie des véhicules particuliers.

La problématique du vieillissement, traitée au chapitre trois, pose la question de l'impact du déclassement des véhicules particuliers sur le vieillissement. L'objectif principal du chapitre quatre est d'apporter une réponse à cette question en estimant des taux de survie transversaux et longitudinaux selon l'approche [Moutardier et Glaude \(1978\)](#) et [Gallez \(1994a\)](#). Dans le but d'améliorer la forme fonctionnelle, ou bien de confirmer l'usage de la loi log-normale préconisé par [Gallez \(1994a\)](#), nous testons alors trois spécifications paramétriques (log-logistique, log-normale et Weibull), fréquemment utilisées pour modéliser la durée de vie humaine ou animale. Ces formes paramétriques sont ajustées à nos estimations de taux de survie transversaux puis comparées suivant le critère de Fisher. Nous comparons la durée de vie des véhicules essence et diesel à partir de taux de survie transversaux et montrons l'impact de la diésélisation sur l'allongement de la durée de vie et sur le vieillissement du parc automobile.

Le cinquième et dernier chapitre est consacré aux questions prospectives de la composition du parc automobile à l'horizon 2020 par type de carburant et génération de véhicules en tenant compte de la sévèrisation des normes Euros.

La projection de la structure du parc automobile par génération de véhicule s'appuiera sur nos estimation de lois de survie de Weibull différenciées par type de motorisation et selon deux hypothèses très contrastées de déploiement de véhicules hybrides et tout électriques. D'une part le scénario de [Depoorter et Assimon \(2011\)](#) fondé sur les objectifs gouvernementaux du *plan véhicule décarboné* visant 2 millions de véhicules électriques et hybrides pour 2020, d'autre part, le scénario plus conservateur émis par [Duval-Destin \(2010\)](#) de la société des ingénieurs automobiles visant 10% de part de marché pour les véhicules hybrides, tout-électriques et PAC (pile à combustible). Une connaissance plus fine des structures de parc par catégories de cylindrées, nous permettra de dresser un inventaire des émissions à l'échelle nationale pour chaque scénario de parc en recourant au logiciel COPERT IV. Ces derniers seront comparés puis commentés à la lumière des principales hypothèses émises.

Chapitre 1 : Le parc automobile, estimation et problématiques environnementales

SOMMAIRE

| | |
|--|----|
| INTRODUCTION | 24 |
| 1 LA POLLUTION DES VEHICULES PARTICULIERS | 26 |
| 1.1. <i>Le bilan véhicule particulier</i> | 26 |
| 1.1.1 La technologie | 28 |
| 1.1.2 Le cadre réglementaire pour les véhicules neufs | 30 |
| 1.2. <i>L'estimation du volume du parc automobile : un outil indispensable à la quantification des émissions</i> | 32 |
| 2 ESTIMATION DU VOLUME DU PARC AUTOMOBILE | 33 |
| 2.1. <i>Sources statistiques</i> | 34 |
| 2.1.1. Les comptages administratifs | 37 |
| 2.1.2. La taxe différentielle sur les véhicules à moteur ("vignette") | 36 |
| 2.1.3. Le fichier central des automobiles (FCA) | 36 |
| 2.1.4. Le fichier des contrôles techniques (FCT) | 37 |
| 2.1.5. Estimation du parc par appariement du FCA et du FCT | 38 |
| 2.2. <i>Les enquêtes</i> | 39 |
| 2.2.1. L'Enquête de Conjoncture Auprès des Ménages (ECAM) | 40 |
| 2.2.2 Le panel Parc Auto | 40 |
| 2.2.3 Les limites des panels pour l'estimation du volume du parc automobile | 42 |
| 2.3. <i>Les modèles de prévision de l'équipement automobile</i> | 43 |
| 2.3.1 Les modèles de croissance agrégés | 43 |
| 2.3.2 Modèles démographiques | 43 |
| 2.3.3 Lois de survie du parc automobile | 44 |
| CONCLUSION | 45 |

INTRODUCTION

Le nombre de véhicules détenus par les ménages et les entreprises françaises a un impact sur la mobilité et le mode de vie des français notamment en termes d'accessibilité à l'emploi et de localisation résidentielle. L'évolution des niveaux de motorisation des ménages constitue aussi une préoccupation de premier rang pour toute l'économie générée par l'industrie automobile au premier chef desquelles on trouve la compétitivité de l'industrie française, sa contribution au PIB, le nombre d'emplois s'y rattachant, les préoccupations environnementales et la prévision des coûts de développement d'entretien des infrastructures routières. Depuis sa création, l'automobile est un sujet de questionnements qui cristallise de nombreux enjeux dans les champs économiques, sociaux et environnementaux :

- *L'enjeu économique* : l'industrie automobile joue un rôle important voire central depuis plusieurs décennies dans le paysage économique et industriel français comme peuvent en attester certains chiffres récents. Avec 2,1 millions de véhicules produits en 2009, la France est classée parmi les 10 premiers pays producteurs mondiaux malgré la crise de 2008. La valeur économique dans le commerce extérieur est évaluée pour 2009 à 34,6 Milliards d'Euros et le poids estimé dans le commerce extérieur de biens à 10,3% [CCFA, 2010]. Mais le secteur automobile représente aussi un défi économique et financier en raison des contraintes d'investissements structurels qu'il engendre, le secteur s'étant fortement concentré depuis 2000.
- *L'enjeu social* : l'industrie automobile génère un nombre d'emplois relativement important, on estime en 2007 que 322 000 emplois sont rattachés directement à l'industrie automobile dont près de 152 000 dans la construction de véhicules et près de 90 000 dans la fabrication d'équipements automobiles [INSEE, 2008]. L'enjeu social est aussi intimement lié à la problématique de la mobilité et de l'accès à l'emploi, rappelons que les motifs contraints comme les déplacements domicile-travail représentent 27% des motifs de déplacement des français en 2008 [François, 2010]. On peut aussi souligner que la part modale de la voiture n'a cessé d'augmenter depuis plus de 25 ans, passant de 55% en 1982 à 69% en 1994 puis à 72% en 2008 [François, 2010]. Armoogum *et al.* (2010) montrent que la voiture garde la suprématie en tant que mode de transport dominant des déplacements locaux⁸. Selon Armoogum *et al.* (2010) en 2008, 65% (63% en 1994) des déplacements locaux sont réalisés en voiture, à titre de passager ou de conducteur.

⁸ La mobilité locale est définie comme l'ensemble des déplacements que les individus réalisent dans un rayon de 80 kilomètres autour de leur domicile et sur le territoire national.

Ces déplacements locaux représentent près de 83% des distances en 2008 (82% en 1994).

- *L'enjeu environnemental* : depuis le rapport Brundtland (1987), les préoccupations environnementales n'ont cessé de prendre de l'ampleur dans le monde et en France en particulier. Dans ce contexte de prise de conscience mondiale, le parc automobile suscite des préoccupations énergétiques et environnementales en lien avec les menaces d'épuisement du pétrole et du réchauffement climatique. Selon l'ADEME (2010), en France, le secteur des transports est responsable en 2010 de 26% des émissions de gaz à effet de serres (GES) et de 37% des rejets de CO₂. A eux seuls, selon le CITEPA (2011), les véhicules particuliers génèrent en 2009, 69,5% du total des émissions de CO₂.eq (équivalent CO₂) issu du secteur des transports estimé à 130,9 Mt CO₂.eq (méga tonnes ou millions de tonnes). Le parc automobile est aussi une source d'externalités environnementales négatives en terme de santé, d'accidentologie et d'environnement local (bruit, polluants locaux). Pour contrer ces externalités négatives, la France s'est engagée dans un processus de réduction des émissions en ratifiant le protocole de Kyoto en novembre 1997. Rappelons que ce protocole établit des objectifs de réduction d'émissions pour six GES⁹ et la France, comme les pays cités dans l'annexe du protocole¹⁰, s'engage à l'horizon 2008-2012, à réduire globalement ses émissions de 5,2% par rapport à celles de 1990. Par ailleurs, s'inscrivant dans une vision à long terme, le Livre Blanc sur les Energies (2003) fixe l'objectif de diviser par quatre le niveau des émissions de GES de 1990 à l'horizon 2050 : c'est l'objectif « facteur 4 ».

L'objectif du chapitre 1 est de présenter la problématique environnementale inhérente aux véhicules particuliers. Il sera dès lors plus simple de comprendre le rôle central joué par la prévision de l'équipement automobile et du volume du parc automobile français dans la planification et la prise de décision de nombreux organismes publics et privés pour contrer les dommages environnementaux engendrés par nos choix de mobilité.

Malgré le caractère essentiel des statistiques de comptage des véhicules particuliers, l'année 2001 est marquée par l'abandon d'une source d'information pour l'estimation du parc automobile : « la vignette ». La taxe différentielle sur les véhicules à moteur communément appelée « vignette » qui permettait de connaître le nombre total de véhicules roulants soumis à la fiscalité française a été supprimée en août 2000 par Laurent Fabius alors Ministre de

⁹ Le dioxyde de carbone, le méthane, le protoxyde d'azote, les hydrofluorocarbones, les hydrocarbures perfluorés, l'hexafluorure de soufre.

¹⁰ Au 14 janvier 2009, 184 États avaient déposé leurs instruments de ratification, d'accession, d'approbation ou d'acceptation du protocole d'après l'UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change)

l'Économie des Finances et de l'Industrie (discours en annexe 1-1). Nous présentons alors les principales méthodes qui servent ou qui pourraient servir à pallier la disparition de la vignette comme outil de comptage et de dénombrement des véhicules particuliers.

Dans la première section, nous soulignons les principaux objectifs et les défis environnementaux auxquels doivent faire face les transports et particulièrement les véhicules particuliers. Le bilan environnemental des véhicules particuliers discuté dans la seconde section met en lumière la nécessité et les enjeux d'une estimation précise du volume du parc automobile pour quantifier avec la plus grande finesse les émissions polluantes associées. Cette observation nous permet de déboucher vers la troisième et dernière section du chapitre qui présente une revue des méthodes statistiques qui permettent ou ont permis d'estimer le volume du parc automobile. Ces méthodes se présentent sous trois principales formes : les comptages administratifs, les enquêtes ainsi que les principaux modèles dont la littérature fait état.

1 La pollution des véhicules particuliers

1.1. Le bilan véhicule particulier

La voiture particulière est le moyen de transport le plus utilisé par les français. Selon [Armoogum et al. \(2010\)](#) les déplacements locaux effectués en voiture représentent près de 83% des distances en 2008 (82% en 1994). Le véhicule particulier reste cependant le plus gourmand en énergie et par conséquent le plus important émetteur de CO₂ parmi tous les modes de transports. Pour mieux comprendre les raisons de l'évolution du trafic (ou circulation) donc des émissions associées aux véhicules particuliers, il est approprié de conduire des prévisions séparées pour les taux de motorisation et pour les parcours annuels de véhicules.

Entre 1990 et 2010, la circulation des véhicules particuliers a cru de 28% en passant de 311 milliards de véhicules-kilomètres (Mds de veh-km) à 398 Mds de veh-km (voir figure 1-1). Cette croissance de la circulation des véhicules particuliers concerne particulièrement la période 1990 à 2001. Après 2001, la circulation est en forte stabilité, comprise dans un intervalle de 390 à 400 Mds de veh-km. Cette stagnation observée entre 2001 et 2010 s'explique par une croissance du parc automobile (voir figure 1-3) compensée par une baisse des parcours moyens des véhicules particuliers (voir figure 1-2). En effet, on observe depuis 2001, une baisse ininterrompue de la mobilité et des distances parcourues en voiture qui passe de 13 802 km/an en 2001 à 12 769 km/an en 2010 [[CCTN, 2010](#)]. Pour expliquer cette baisse on trouve une conjonction de facteurs liés à la hausse des prix des carburants tels que la baisse du trafic dans les zones urbaines et la diminution de la part modale de la voiture au bénéfice des modes doux. Mais c'est le multi-équipement des ménages qui

semble être la principale explication de la croissance du volume parc automobile et de la baisse des parcours annuels moyens. Cette dernière s'explique principalement par la répartition de la consommation kilométrique des ménages sur un nombre de véhicules à disposition toujours plus élevé.

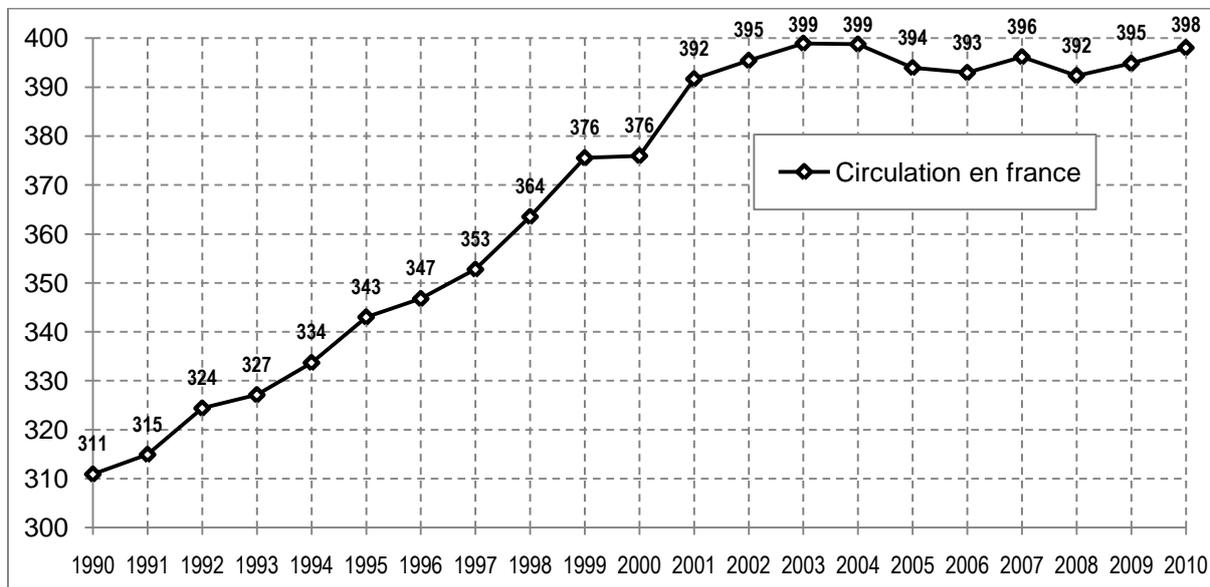


Figure 1- 1 Circulation des véhicules particuliers en France de 1990 à 2010 en milliards de véhicules-kilomètres. Source : CCTN (2010)¹¹

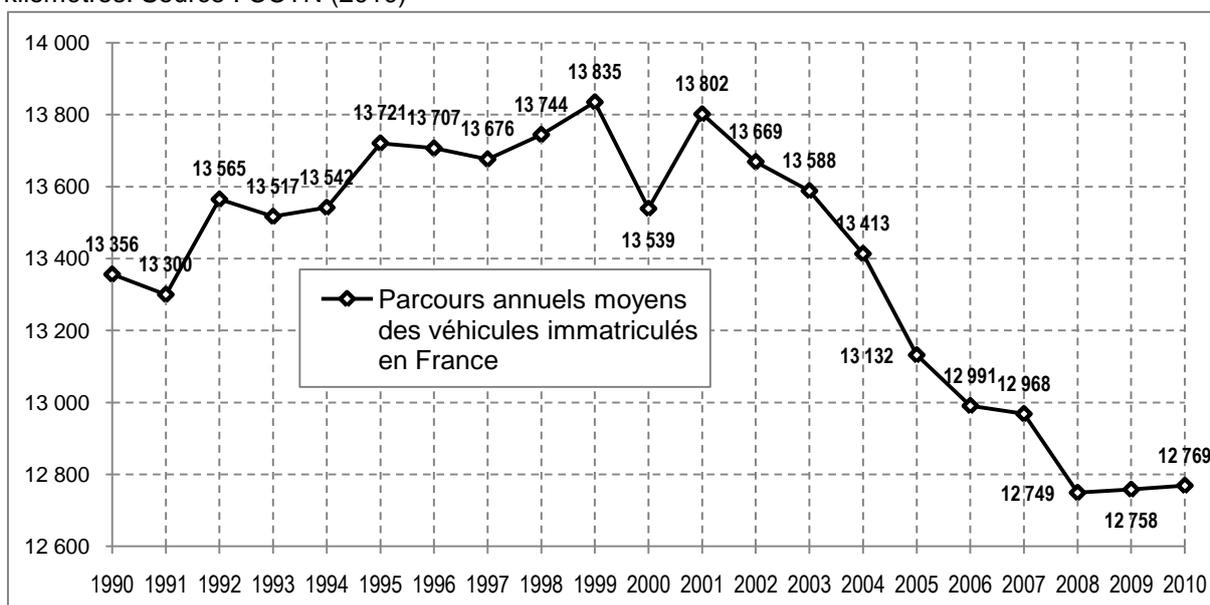


Figure 1- 2 Parcours annuels moyens des véhicules immatriculés en France pour la période 1990 à 2010. Source : CCTN (2010)

¹¹ Nous constatons une différence substantielle entre les chiffres CCTN 2009 et 2010. Elle s'explique par un rebasement de l'ensemble des séries constitutives du bilan de la circulation effectué en 2011 [Voir annexe du 48ème rapport de la CCTN (tome 1)].

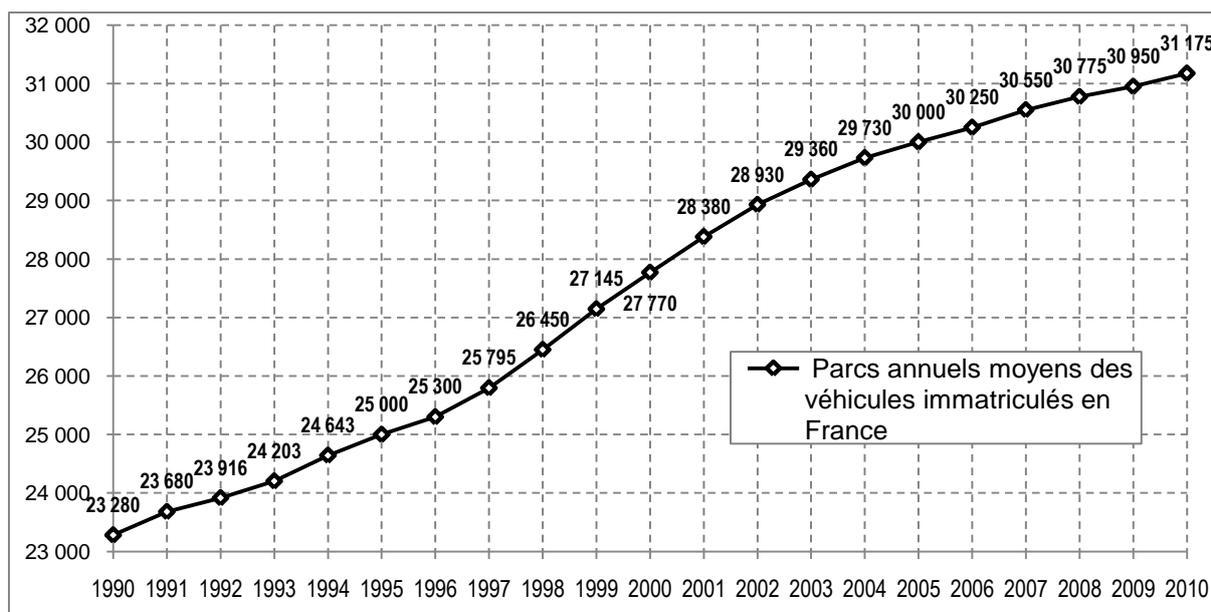


Figure 1- 3 Parcs annuels moyens des véhicules immatriculés en France pour la période 1990 à 2010. Source : CCTN (2010)

En 2009, plus de la moitié (56,2%) des émissions de CO₂ des transports routiers proviennent des voitures particulières dont 37,5% pour les véhicules particuliers à moteur diesel et 18,7% pour les véhicules à moteur essence (25% pour les poids-lourds, bus et car inclus et 18% pour les véhicules utilitaires de moins de 3,5 tonnes); les deux-roues et les voitures GPL ne représentant qu'une part négligeable [CITEPA, 2011]. Les transports ferroviaires, par exemple, possèdent une efficacité énergétique plus importante et sont de fait moins émetteurs de GES. Ceci est principalement le fait des conditions de trafic et de la source d'énergie utilisée. En appliquant les facteurs d'émissions européens¹², les transports ferroviaires émettent de 4 à 8 fois moins de GES que les modes de transports routiers de voyageurs.

1.1.1 La technologie

Les progrès technologiques ont permis une amélioration de l'efficacité énergétique des moteurs thermiques (injection directe, désactivation de piston, etc.) et de la transmission permettant une diminution des consommations unitaires de carburant et par conséquent celle des émissions de CO₂ associées. La mise en service, l'amélioration et la généralisation des pots catalytiques a contribué de diminuer les rejets polluants tels que les hydrocarbures imbrulés et le monoxyde de carbone. L'utilisation des filtres à particules sur les motorisations diesel permet techniquement de diminuer les émissions de composés de particules. Mais aucun résultat de baisse des émissions de particules n'est perceptible principalement en

¹² L'impact de l'origine de l'électricité est pris en compte selon le pays de production. En France on estime les émissions de GES associées à 48 gCO₂/kWh en 2005. En Europe cet impact est estimé à 344 gCO₂/kWh moyenne en 2005 de l'UE des 15. Se reporter à Vidalenc, E. (2008) Efficacités énergétique et environnementale des modes de transport. Étude de Deloitte pour le compte de l'ADEME, Janvier 2008.

raison de la diésélisation croissante du parc (les véhicules à moteur diesel étant les principaux contributeurs) et d'une option non généralisée qui concerne la plupart du temps les véhicules haut de gamme.

Les progrès réalisés ne sont pourtant pas l'apanage de l'automobile, ces derniers sont aussi passés par l'amélioration qualitative du raffinage des combustibles contribuant à la baisse des émissions de polluants locaux. En effet, la diminution de la teneur en soufre et en plomb du supercarburant a permis de réduire significativement leur présence dans l'air [Lacour et Joumard, 2002 ; Hugrel et Joumard, 2004, 2006].

L'ensemble des progrès énumérés cachent pourtant des régressions. Les constructeurs automobiles se sont engagés dans des orientations qui s'opposent à la réduction de consommation de carburant. Des travaux montrent que la réduction unitaire des émissions de chaque voiture est ralentie par l'augmentation de la masse (voir figure 1-4) et de la puissance (voir figure 1-5) [Cuenot et Papon, 2007 ; Cuenot, 2009]. Cette masse a subi une augmentation quasi-constante ces deux dernières décennies, l'objectif des constructeurs étant d'améliorer la sécurité et le confort dans le véhicule mais aussi d'augmenter la qualité de vie à bord des véhicules par des fonctionnalités toujours plus nombreuses.

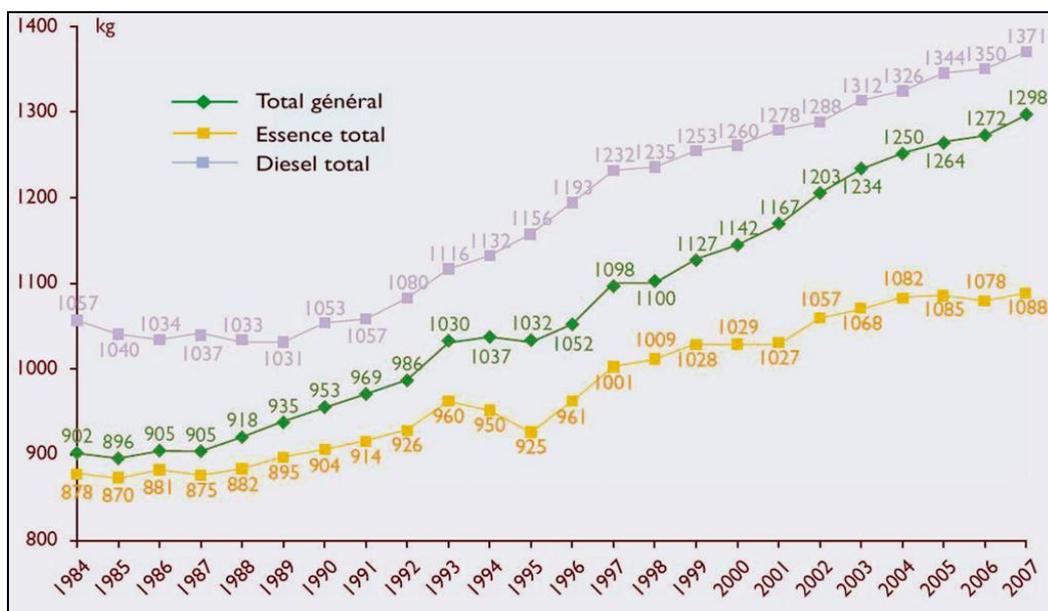


Figure 1- 4 Évolution de la masse moyenne des véhicules particuliers entre 1984 à 2007 par type de motorisation. Source : Ademe.

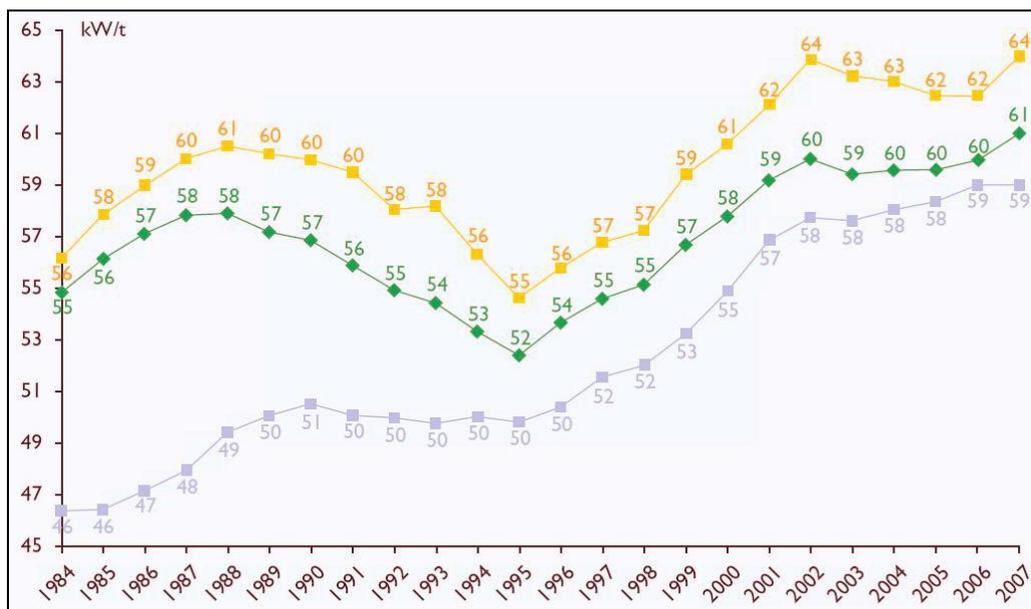


Figure 1- 5 Evolution de la puissance massique moyenne (puissance moyenne par tonne) des véhicules particuliers entre 1984 à 2007 par type de motorisation. Source : Ademe.

Parmi les nombreuses options et fonctionnalités ayant eu des impacts négatifs sur l'efficacité énergétique des véhicules, on peut citer des accessoires tels que les ordinateurs de bord et le GPS. Mais l'impact négatif le plus important sur la consommation et sur les émissions de polluants locaux et de GES est à mettre à l'actif de la climatisation. Cette dernière est progressivement passée du statut d'option rare et chère, proposée uniquement pour les véhicules haut de gamme, à celui d'option courante proposée avec la plupart des véhicules d'entrée de gamme. Barbusse et Gagnepain (2003) montrent que la climatisation est une option très énergivore qui entraîne des surconsommations importantes comprises entre 12 et 43% selon l'usage du véhicule et la motorisation. D'autre part, l'utilisation systématique de gaz réfrigérants fluorés (HFC¹³) à fort Pouvoir de Réchauffement Global (PRG)¹⁴ dans les systèmes de climatisation, susceptibles de s'évaporer au cours de la durée de vie du véhicule, ajoute une part considérable d'émissions de GES.

1.1.2 Le cadre réglementaire pour les véhicules neufs

Il faut distinguer deux types de cadres réglementaires qui s'appliquent tous pour les véhicules entrant en production à une date donnée. On trouve d'une part les normes Euro destinées à diminuer les seuils d'émissions maximums en polluants de gaz d'échappements pour les véhicules neufs. Et d'autre part les accords volontaires de l'Association des Constructeurs Européens d'Automobiles (ACEA) qui visent à réduire les émissions de CO₂ de leurs véhicules vendus en Europe.

¹³ Au sein de l'Union Européenne, les HFC ont été interdits dans les climatisations pour automobiles dès 2011.

¹⁴ Unité de mesure l'impact d'un gaz sur l'effet de serre comparativement à celui du CO₂.

Chapitre 1 Le parc automobile, estimation et problématiques environnementales

Les émissions de certains polluants locaux (NO_x, HC, CO et PM) sont réglementés par l'Union Européenne dans le cadre des normes d'émissions dites Euro¹⁵. Ces normes établissent les limites maximales d'émissions de polluants pour les véhicules neufs (voir tableau 1-1) et ont contribué à une diminution significative des émissions d'une certaine catégorie de polluants locaux [Hugrel et Joumard, 2004 ; CITEPA, 2011]. Tous les 4 ou 5 ans, les seuils d'émissions sont revus à la baisse. La mise en place de la première norme baptisée Euro 1 date de 1993. La norme actuellement en vigueur depuis le 1^{er} septembre 2009 est la norme Euro 5. Il est prévu d'appliquer la norme Euro 6 dès septembre 2014.

La mise en place des normes Euro a permis une impulsion de progrès technologiques qui ont permis des baisses d'émissions par véhicule. Par exemple l'apparition et l'amélioration des performances du pot catalytique poussés par la législation et l'apparition de normes d'émissions mises en place par l'Union Européenne ont permis de limiter fortement certains polluants (division par 2,7 des émissions de CO pour les diesels lors du passage Euro 1 à Euro 2) [Bourdeau, 1998 ; Hugrel et Joumard, 2004]. L'apparition du filtre à particules (FAP), certes réservé aux véhicules diesels, permet de supprimer une part non négligeable des rejets en particules. Il faut tout de même noter que les véhicules à moteur diesel, toujours plus nombreux dans le parc, sont la principale cause de rejets des particules fines du secteur transport malgré l'évolution des normes Euros et l'équipement en FAP.

| Energie | Normes | Entrée en vigueur (NT ¹⁶) | Entrée en vigueur (TT) | CO (g/km) | HC (g/km) | HCNM (g/km) | NO _x (g/km) | HC + NO _x (g/km) | Particules (g/km) |
|---------|--------------|---------------------------------------|------------------------|-----------|-----------|-------------|------------------------|-----------------------------|-------------------|
| DIESEL | Euro 1 | 1992 | | 2,720 | - | | - | 0,970 | 0,140 |
| | Euro 2 (IDI) | 1996 | | 1,000 | - | | - | 0,700 | 0,180 |
| | Euro 2 (DI) | 1999 | | 1,000 | - | | - | 0,900 | 0,100 |
| | Euro 3 | 01/2000 | 01/2001 | 0,640 | - | | 0,500 | 0,560 | 0,050 |
| | Euro 4 | 01/2005 | 01/2006 | 0,500 | - | | 0,250 | 0,300 | 0,025 |
| | Euro 5 | 09/2009 | 01/2011 | 0,500 | - | | 0,180 | 0,230 | 0,005 |
| | Euro 6 | 09/2014 | 09/2015 | 0,500 | - | | 0,080 | 0,170 | 0,005 |
| ESSENCE | Euro 1 | 1992 | | 2,720 | - | | - | 0,970 | - |
| | Euro 2 | 1996 | | 2,200 | - | | - | 0,500 | - |
| | Euro 3 | 01/2000 | 01/2001 | 2,300 | 0,200 | | 0,150 | - | - |
| | Euro 4 | 01/2005 | 01/2006 | 1,000 | 0,100 | | 0,080 | - | - |
| | Euro 5 | 09/2009 | 01/2011 | 1,000 | 0,100 | 0,068 | 0,060 | - | 0,005 |
| | Euro 6 | 09/2014 | 09/2015 | 1,000 | 0,100 | 0,068 | 0,060 | - | 0,005 |

Tableau 1- 1 Limites d'émissions UE pour les véhicules particuliers. Source : Ademe

¹⁵ Règlement n° 83 de la Commission économique pour l'Europe des Nations unies (CEE-ONU) Prescriptions uniformes relatives à l'homologation des véhicules en ce qui concerne l'émission de polluants selon les exigences du moteur en matière de carburant, 6 Mai 2008.

¹⁶ NT (nouveau type) les nouveaux modèles doivent respecter la norme à la date d'entrée en vigueur indiquée. TT (tout type) : tous les véhicules neufs doivent respecter la norme à la date d'entrée en vigueur indiquée. CO monoxyde de carbone ; HC : hydrocarbures imbrûlés ; HCNM : hydrocarbure non méthanique ; NO_x : oxydes d'azote.

Parmi les mesures réglementaires visant à réduire les impacts négatifs du transport routier et notamment ceux des véhicules particuliers, on trouve les accords volontaires de l'Association des Constructeurs Européens Automobiles (ACEA). Par cet accord, les constructeurs européens, représentés par l'ACEA, ont signé avec la Commission Européenne un accord volontaire de réduction des émissions de CO₂ de leurs véhicules vendus en Europe au niveau moyen de 140 gCO₂/km en 2008 et à celui de 120 gCO₂/km en 2012. A ce titre, ils se sont engagés à mettre sur le marché des modèles de véhicules peu émetteurs et à en vendre suffisamment pour pallier les fortes émissions des véhicules haut de gamme, des 4x4 ou des véhicules les plus puissants qu'ils vendent par ailleurs. Carballes (2008) montre qu'en dix ans, les émissions moyennes des véhicules à moteur diesel et essence ont respectivement baissé de 26 g et 22 g. Cependant, l'objectif initialement prévu pour 2008 n'a pu être atteint puisqu'en 2007 la moyenne des émissions de CO₂ stagnait à 149 g/km, correspondant à des émissions de CO₂ estimées à 153 g/km pour les véhicules à moteur essence et 148 g/km pour les véhicules à moteur diesel. Après de nombreuses tractations, un accord de compromis¹⁷ visant à réduire les émissions de CO₂ des nouveaux véhicules a été adopté en décembre 2008. Il s'agit d'un accord basé sur une proposition française du Ministère de l'Ecologie (MEEDDM) visant à limiter progressivement à 120 g/km les émissions de CO₂. L'objectif global de 120 gCO₂/km se décline sur deux niveaux. Le premier niveau fixe un objectif de 130 gCO₂/km qui doit être atteint en améliorant l'efficacité énergétique des moteurs commercialisés. Le second niveau concerne le passage de 130 gCO₂/km à 120 gCO₂/km qui doit être réalisé en recourant à des technologies dites « annexes » telles que l'usage des biocarburants, la réduction de la résistance au roulement due aux pneumatiques, la limitation du coefficient de pénétration dans l'air, ou encore l'introduction de véhicules propres et électriques. Cette nouvelle limitation à 120 gCO₂/km vise 65% des véhicules neufs en 2012, 75% en 2013, 80% en 2014 et 100% en 2015. Le compromis fixe l'objectif d'émissions moyennes à 95 gCO₂/km pour les véhicules neufs d'ici 2020.

1.2. L'estimation du volume du parc automobile : un outil indispensable à la quantification des émissions

Pour comprendre l'enjeu d'une estimation précise du volume du parc automobile sur la quantification des impacts environnementaux imputables aux véhicules particuliers, il est

¹⁷ « L'accord décroché a également réduit les amendes proposées à l'encontre des constructeurs automobiles qui ne respectent pas les limites. Entre 2012 et 2018, les amendes seront appliquées comme suit : 5 euros pour le premier gramme de CO₂, 15 pour le deuxième, 25 pour le troisième et 95 euros à partir du quatrième gramme. Dès 2019, les constructeurs devront payer 95 euros pour chaque gramme dépassant l'objectif. » Automobiles & CO₂. Dossier publié le 03 mars 2008 - Mis à jour 17 janvier 2011 (<http://www.euractiv.com/fr/transport/automobiles-co2-fr-linksdossier-188798>)

nécessaire de différencier les deux étapes complémentaires à une évaluation nationale de la pollution. La première étape consiste à mesurer les niveaux de concentration en polluants atmosphériques à proximité des routes et autoroutes. Dans un second temps, les contributions sectorielles, sous-sectorielles puis individuelles (selon des caractéristiques affinées) à ces concentrations doivent être estimées en effectuant des inventaires environnementaux qui fournissent les niveaux d'émissions par type de secteur (par exemple, agriculture, transport, bâtiment etc.), sous-secteur (pour les transports par exemple, route, aérien, rail, maritime etc.) puis individuelles (par exemple véhicules essence, diesel, poids lourds etc.). Ces étapes sont cruciales lorsqu'il s'agit de distinguer les impacts environnementaux liés aux émissions de polluants par type de véhicules. Sinon, comment distinguer les contributions des véhicules particuliers et des poids lourds relatives aux concentrations de polluants relevés ?

Concernant les véhicules particuliers, les niveaux nationaux d'émissions sont estimés sur la base des trois principales grandeurs associées aux véhicules particuliers : le volume annuel du parc automobile, le kilométrage annuel moyen par véhicule ainsi que les coefficients d'émissions moyens par type de polluant. Le produit de ces trois facteurs permet de fournir une estimation des émissions annuelles moyennes par véhicule pour le polluant considéré. D'autre part, concernant les émissions de CO₂, principal gaz à effet de serre, elles sont estimées et estimables uniquement sur la base des statistiques d'évaluation de la circulation du parc automobile puisque le CO₂ en tant que composant naturel de l'air, n'entre pas dans la catégorie des polluants locaux. C'est pourquoi concernant les émissions de CO₂, la méthode d'estimation est tributaire des inventaires d'émissions.

Dans la section 2 nous nous pencherons sur les méthodes d'estimation du parc automobile. Dans ce cadre, nous isolerons les trois principales méthodes existantes pour estimer le volume du parc automobile. Nous montrerons comment et avec quelle précision les méthodes d'estimation du parc automobile recourant à la modélisation sont capables de fournir une estimation fiable du parc en l'absence de l'outil statistique de comptage administratif de référence : « la vignette ».

2 Estimation du Volume du Parc Automobile

Il existe de nombreuses méthodes permettant l'estimation du volume du parc automobile mais avant d'aller plus avant, il convient de rappeler la distinction de champ d'étude qui doit être faite entre le parc de véhicules particuliers et le parc à disposition des ménages. Ce dernier comprend à la fois les véhicules particuliers dont la carte grise est au nom d'une

personne du ménage, certains véhicules d'entreprise et véhicules utilitaires utilisés régulièrement pour les déplacements quotidiens des ménages¹⁸.

Il existe principalement trois méthodes d'estimation du volume du parc. Les premières recourent aux comptages administratifs c'était le cas de la taxe différentielle sur les véhicules à moteur communément appelée « vignette automobile », les secondes recourent aux enquêtes statistiques effectuées auprès d'un échantillon de la population ou d'entreprises et les dernières s'appuient sur la modélisation avec des différences méthodologiques et d'approches souvent aussi variées que les objectifs diffèrent. Ces méthodes permettent d'estimer le volume du parc, parfois d'en déterminer la structure selon divers critères. Elles ne reposent évidemment pas toutes sur les mêmes hypothèses et peuvent diverger dans l'estimation du volume du parc ou dans les projections. Elles sont cependant toutes complémentaires puisque traitées de façon conjointe, elles permettent d'apporter des connaissances sur la structure et sur la dynamique animant le parc automobile. Nous avons tenté de synthétiser dans cette section les diverses méthodes d'estimation du parc automobile qui coexistent en France, et d'en dégager les principales caractéristiques.

2.1. Sources statistiques

Malgré l'abandon de la vignette en 2001, il subsiste un certain nombre de documents d'identification ou de taxation des véhicules mais également des enquêtes effectuées auprès des particuliers ou entreprises qui peuvent permettre d'estimer le volume global du parc en France. Deux principales sources coexistent comme estimation du volume du parc de véhicules particuliers :

- Le nombre de véhicules particuliers de moins de 15 ans observés dans le Fichier Central Automobile (FCA) publié par le SOeS (Service de l'Observation et des Statistiques qui dépend du MEEDDM). Le FCA est établi à partir du fichier national informatisé des véhicules immatriculés sur le territoire français et donc à partir du fichier des cartes grises dans lequel sont supprimées certaines variables, notamment relatives à l'état civil du (ou des) propriétaire(s). La principale difficulté de l'usage du FCA pour l'estimation du parc réside dans le fait qu'il ne soit pas apuré des véhicules détruits ou exportés définitivement à l'étranger, ces derniers n'étant pas systématiquement signalés. L'estimation du parc découle ainsi de l'hypothèse que le volume du parc de moins de 15 ans du FCA donne une approximation du parc réel. La série du parc de moins de 15 ans remonte à 1982. Elle diffère en conséquence de la série vignette utilisée comme base du calcul du parc CCFA.

¹⁸ Soulignons d'autre part que l'enquête Parc Auto de la Sofres, présentée plus loin dans la section 2.2.2, ne recense pas uniquement les véhicules particuliers mais l'ensemble des véhicules à disposition des ménages.

- Avant 2001, le parc CCFA correspond à l'estimation des ventes de vignette. L'estimation du volume du parc de véhicules particuliers publiée par le CCFA depuis 2001 utilise des coefficients de survie calés sur l'ENTD (Enquête Nationale Transports Déplacements). L'estimation du parc qui en découle est obtenue en faisant vieillir d'un an le parc de l'année précédente grâce à la loi de survie par âge (en tenant compte d'un âge maximal de 25 ans) puis en y ajoutant le volume des immatriculations de l'année. Ce volume estimé par le CCFA est utilisé officiellement dans les statistiques publiées par la CCTN (Commission des Comptes Transports de la Nation).

| Source | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| CCFA | 27 480 | 28 060 | 28 700 | 29 160 | 29 560 | 29 900 | 30 100 | 30 400 | 30 700 | 30 850 | 31 050 |
| SOeS | 29 272 | 29 808 | 30 330 | 30 591 | 30 583 | 30 537 | 30 497 | 31 002 | 31 443 | 31 109 | 31 394 |

Tableau 1- 2 Parc automobile des véhicules particuliers en milliers d'unités au 1^{er} janvier pour la période 2000 à 2010. Source CCFA, SOeS fichier central des automobiles.

Le tableau 1-2 présente les statistiques fournies par le SOeS et le CCFA. Deux observations peuvent être émises en comparant les deux séries. En premier lieu, les statistiques de parc de moins de 15 ans émises par le SOeS sont toujours supérieures à celles du CCFA, mais aussi à celle des vignettes si on compare avant 2001 (voir par exemple en 2000 dans le tableau 1-1). En second lieu, l'écart entre les deux séries se resserre. Si l'on fait l'hypothèse de prendre la série CCFA comme la série qui apporte l'estimation la plus fidèle au parc réellement en circulation, on pourrait interpréter ce resserrement par une baisse du taux de déclassement¹⁹ des véhicules. En effet, le nombre de véhicules de moins de 15 ans déclassés du parc dans la pratique, sont malgré tout comptabilisés comme étant en activité par les statistiques du parc de moins de 15 ans. Cela engendre une surestimation du parc réel par les statistiques du parc de moins de 15 ans puisqu'on observe un écart imposant de 1,8 millions de véhicules en 2000 avec la série du CCFA basée pour cette année sur les statistiques de vignettes vendues. L'écart entre les deux séries se réduit année après année jusqu'à atteindre 350 000 véhicules en 2010. Cela est révélateur d'une diminution progressive du biais introduit dans l'estimation du parc par la série du parc de moins de 15 ans. Ce biais élevé au départ, est progressivement contré par une hausse de la part des véhicules de plus de 15 ans dans le parc. Cette observation permet de poser dès à présent la problématique de la baisse du taux de déclassement des véhicules particuliers. Ce ralentissement du déclassement des véhicules particuliers devra être infirmé ou confirmé par l'étude du vieillissement du parc (chapitre 3) et de la durée de vie des véhicules particuliers (chapitre 4).

¹⁹ Le taux de déclassement est synonyme du taux de sortie ou du taux de mise à la casse des véhicules. On utilisera indifféremment les termes de mise à la casse, mise au rebut, déclassement ou sortie pour désigner la même notion de « mort » du véhicule particulier.

2.1.1. La taxe différentielle sur les véhicules à moteur ("vignette")

La taxe différentielle sur les véhicules à moteur ou plus simplement « vignette » a été instaurée en France par la loi du 30 juin 1956, votée à la demande de Guy Mollet, alors président du Conseil et de Paul Ramadier ministre des Finances et des Affaires économiques. La vignette a eu pour mission de financer le Fonds National de Solidarité destiné à garantir un revenu minimum à toutes les personnes âgées de plus de 65 ans. Dès 1973, ses recettes n'ont plus été affectées mais versées directement au budget de l'Etat puis transférées aux départements en 1984.

Avant sa suppression en 2001, la vignette était gérée par le ministère chargé des finances par l'intermédiaire de la Direction Générale des Impôts (DGI), et concernait tous les véhicules de moins de 16 tonnes qui n'avaient pas atteint l'âge de 25 ans (au delà de cet âge, la vignette était gratuite mais restait obligatoire) ainsi que les ensembles routiers tracteurs et semi-remorques à 3 essieux. La tarification annuelle était établie à partir de la puissance fiscale (10 catégories) et de l'âge (4 classes) (voir tableau 1-3). Le comptage des vignettes vendues fournit par conséquent un estimateur du parc roulant qu'il soit ou non à disposition des ménages mais ne permet aucune distinction entre les véhicules particuliers et les utilitaires de moins de 16 tonnes.

| Puissance fiscale (CV) | | 5 à 7 | 8/ 9 | 10 / 11 | 12 / 14* | 15 / 16 | 17 /18** | 19 / 20 | 21 / 23 | 23 et + | 20 / 25 ans d'âge |
|--|--------------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------------|
| Coefficients multiplicateurs (par rapport au tarif de base fixé pour les véhicules de 1 à 4 CV) | Maxi (+ 5%) | 1,995 | 4,725 | 5,5565 | 9,87 | 12,075 | 14,805 | 22,155 | 33,285 | 49,98 | 0,42 |
| | Taux normal | 1,9 | 4,5 | 5,3 | 9,4 | 11,5 | 14,1 | 21,1 | 31,7 | 47,6 | 0,4 |
| | Mini (- 5%) | 1,805 | 4,275 | 5,035 | 8,93 | 10,925 | 13,395 | 20,045 | 30,115 | 45,22 | 0,38 |

Tableau 1- 3 Fourchette dans laquelle les coefficients multiplicateurs (calculés par rapport au tarif de base applicable aux véhicules de 1 à 4 CV) peuvent être modulés (article 1599 G du code général des impôts)

2.1.2. Le fichier central des automobiles (FCA)

Le Fichier Central des Automobiles (FCA) est le fichier de référence sur les immatriculations de véhicules. Ce fichier exhaustif géré par le Ministère de l'Intérieur est accessible aux différents ministères intéressés notamment le service statistique (actuellement SOeS) du ministère des transports (actuellement MEEDDM). Il est issu du fichier national des immatriculations géré par le ministère de l'intérieur. Le FCA permet notamment de disposer d'une information fine sur les caractéristiques techniques (puissance, énergie, cylindrée, année de construction, poids, etc..) des véhicules immatriculés en France.

Cependant le FCA ne peut être utilisé seul pour dénombrer les véhicules puisqu'il n'y a pas d'information systématique sur l'éventuelle mise hors service des véhicules. Le nombre

total d'immatriculations enregistrées dans le FCA est nettement supérieur au nombre des véhicules qui sont réellement en circulation, de sorte qu'il est nécessaire de procéder à des hypothèses (par exemple prendre uniquement le parc de moins de 15 ans) pour fournir des estimations du volume du parc roulant.

2.1.3. Le fichier des contrôles techniques (FCT)

Le fichier des contrôles techniques (FCT) constitue une source pour l'estimation du volume du parc automobile dans la mesure où il est une inspection obligatoire à des fins sécuritaires et environnementales qui concerne l'ensemble des véhicules en circulation²⁰. Les véhicules légers concernés par le contrôle technique sont des véhicules ayant au moins quatre roues, dont le PTAC (poids total autorisé en charge) n'excède pas 3,5 tonnes, et qui sont soit des voitures particulières (genre VP sur la carte grise), soit des véhicules utilitaires²¹. D'autre part, certaines catégories spécifiques de véhicules comme les véhicules de dépannage, les véhicules utilisés pour les transports sanitaires terrestres, les véhicules utilisés pour l'enseignement de la conduite, les taxis et véhicules de remise, véhicules de moins de dix places (conducteur compris), affectés au transport public de personnes sont soumis à réglementation spécifique. Le champ des véhicules concernés est donc beaucoup plus large que celui des véhicules particuliers, mais il est possible de distinguer les différentes catégories de véhicules dans la base de données du FCT.

Malgré les avantages résidant dans la qualité d'informations apportées par le FCT, le caractère périodique du contrôle technique, ne lui permet pas de fournir une estimation fiable du parc roulant. En effet, chaque véhicule doit obligatoirement être présenté à une visite technique périodique dans les six mois précédant l'expiration d'un délai de quatre ans à compter de la date de la première mise en circulation, et cette visite doit être renouvelée ensuite tous les 2 ans. De plus, au moment de la revente du véhicule, un contrôle technique de moins de 6 mois doit être délivré par le propriétaire du véhicule au nouvel acquéreur. En outre, dans le FCT, il peut y avoir des doublons, notamment lorsqu'un même véhicule a subi plusieurs visites. A titre indicatif, le nombre de véhicules contrôlés recensés dans le FCT entre le 1^{er} octobre 2003 et le 1^{er} janvier 2006 est de 36 556 441 véhicules.

2.1.4. Les comptages administratifs

La suppression définitive de la vignette marque un coup d'arrêt à ses deux principales fonctions. Elle était à la fois un outil fiscal à disposition des collectivités départementales

²⁰ En application des dispositions de l'article R323-3 du code de la route, les véhicules suivants ne sont pas soumis au contrôle technique périodique : matériels spéciaux des armées, véhicules immatriculés dans les séries diplomatiques ou assimilées (CMD, CD, C, K) et dans la série spéciale FFECSA (Forces françaises en Allemagne), véhicules disposant d'une carte grise portant la mention "Véhicule de collection" (y compris en cas de cession ou de demande de duplicata de carte grise). (Extrait de la documentation sur le site <http://www.utac-otc.com/fr>)

²¹ Genres CTTE = camionnette, TRR = tracteur routier, VASP = véhicules automoteurs spécialisés, ou anciens genres VTSU ou VTST sur la carte grise

depuis 1984 et un outil d'estimation du volume du parc automobile pour les services statistiques du ministère en charge des transports. La vignette permettait de connaître le nombre total, ainsi que sa composition par catégories de puissances fiscales (voir tableau 1-3), de véhicules particuliers en état de circulation sur le territoire par simple compilation des effectifs de vignettes vendues. Malgré cette perte d'information statistique, diverses méthodes de comptage alternatives subsistent.

Tous les véhicules portant une immatriculation circulant actuellement en France sont soumis d'une part au paiement de la taxe d'immatriculation qui conditionne l'établissement de la carte grise et d'autre part à l'inspection obligatoire (à partir de quatre ans) du contrôle technique pour les véhicules particuliers ou utilitaires, légers ou lourds. Tous les véhicules immatriculés sont recensés dans une base de données, le Fichier Central Automobile (FCA) parfois nommé Fichier des Cartes Grises (FCG). Le FCA est établi à partir du fichier national informatisé des données de cartes grises. Le Fichier des Contrôles Techniques (FCT) recense quant à lui l'ensemble des véhicules passés et inscrits au contrôle technique. Bien que le FCA puisse être utile au comptage, il présente tout de même l'inconvénient de ne pas recenser uniquement les véhicules particuliers en circulation mais aussi un certain nombre de véhicules hors d'usage, détruits ou exportés définitivement hors du territoire, ce qui conduit de manière systématique à une surestimation du volume du parc. Or, qu'il s'agisse du FCA ou du FCT, l'épuration des véhicules hors d'usage n'est pas rendue possible puisque les véhicules détruits ou exportés définitivement du territoire ne sont pas tenus d'être signalés. Il existe cependant une méthode d'estimation du parc recourant à l'appariement du FCA et du FCT permettant d'épurer le FCA des véhicules obsolètes, détruits ou exportés définitivement. Une telle opération a été réalisée en 2006 [Métaphis et Curtet, 2006] et a permis d'estimer le parc de véhicules particuliers à 31 042 000 véhicules pour cette même année.

2.1.5. Estimation du parc par appariement du FCA et du FCT

Comme nous venons de le voir, le FCA accumule de façon systématique les nouvelles immatriculations, sans jamais être purgé des véhicules obsolètes, détruit ou exportés définitivement et accumulant ainsi les véhicules dits « fantômes ». Il n'est pas possible d'engager une épuration systématique du FCA puisqu'il n'y a pas d'indication concernant l'exportation définitive des véhicules ni de variables qui permettraient de donner une information sur l'éventuelle mise hors service des véhicules (obsolètes, détruits ou exportés définitivement)

Pourtant, en réunissant les informations contenues dans ces deux fichiers il est possible d'estimer le volume du parc en procédant à leur *appariement* selon un mode opératoire qui se déroule en trois étapes. Dans un premier temps, le parc roulant des véhicules de plus de quatre ans d'âge est estimé en comptabilisant le nombre de ces véhicules de plus de quatre

ans se trouvant à la fois dans le FCT et repérés dans le FCA à la date T de telle façon que les véhicules morts entre leur contrôle et cette date T ne soient pas comptabilisés. Puis on estime le parc roulant récent des véhicules de moins de quatre ans d'âge par un comptage direct dans le FCA à la date T . Pour finir, l'évaluation fournie est la somme des deux, moins les véhicules du parc roulant récent fabriqués entre la date T et $T-4$ qui ont été comptabilisés deux fois dans la somme. Une telle opération a été effectuée en 2006 [Metaphis et Curtet, 2006].

Metaphis et Curtet (2006) ont eu recours à deux fichiers de parc qui recensent chacun à la fois les véhicules légers et les véhicules utilitaires issus du FCA : l'un en date du 1^{er} octobre 2003 (44 922 896 véhicules) et l'autre en date du 1^{er} janvier 2006 (46 413 805 véhicules). L'appariement a permis d'estimer le parc de véhicules particuliers (VP) à 31 042 000 véhicules. Cette estimation est bien supérieure à celles obtenues avec d'autres méthodes, au 1^{er} janvier 2006, le nombre de VP de moins de 15 ans dans le FCA, publié dans le marché des véhicules, s'élève à 30 497 000 et l'estimation CCFA du parc de VP est estimée à 30 100 000 véhicules.

L'estimation par appariement de fichiers reste cependant exceptionnelle et peu d'essais ont été réalisés à ce jour. Elle est lourde à mobiliser, malgré l'évolution rapide des performances des équipements informatiques, puisqu'elle exige de nombreuses étapes d'épurations, tributaires de la saisie de longues chaînes de caractères, et d'appariements à partir d'échantillons exhaustifs qui recensent plusieurs dizaines de millions de véhicules.

2.2. Les enquêtes

Les enquêtes concernent l'analyse d'un échantillon, d'individus ou de véhicules, représentatif de la population étudiée. Ces échantillons sont renouvelés totalement ou partiellement à chaque vague de questionnaire, la périodicité s'étalant de plusieurs mois à plusieurs années. Aucun suivi dans le temps des comportements d'équipement (taux de ménages équipés/total) ou de motorisation (nombre de véhicules par habitant ou ménage) n'est donc possible puisque les éléments interrogés changent régulièrement. Pour pallier ce problème, on peut conserver le même échantillon d'individus pendant un certain temps (selon la durée de l'étude), ce qui permet de suivre les évolutions de comportements au cours du temps : ces échantillons sont alors appelés *panels*. Les champs peuvent concerner diverses catégories : individus ou véhicules, ménages français ou résidants, véhicules possédés ou mis à disposition. En France, deux principales enquêtes sont à disposition du modélisateur afin de permettre des estimations d'équipements et d'usages automobile :

- les *Enquêtes Insee de Conjoncture Auprès des Ménages (ECAM)* portent sur un échantillon représentatif de 6 000 à 8 000 ménages résidant en France. Ce panel est dit « rotatif » puisqu'un renouvellement par moitié des échantillons est effectué

chaque année. La partie du questionnaire réservée à l'automobile y est détaillée permettant d'apporter une connaissance fine de l'équipement et des usages.

- le *panel Parc Auto Sofres* porte sur un échantillon de 10 000 ménages français. C'est aussi un panel rotatif et environ $\frac{1}{4}$ des effectifs ménages sont renouvelés d'une année sur l'autre par TNS-Sofres sur des critères de taux de remplissage des questionnaires reçus. Ce panel est annuel et décrit de manière détaillée l'équipement des ménages en automobile, ainsi que l'utilisation des véhicules. Il constitue la source statistique la plus régulière et la plus complète sur le parc à disposition des ménages.

Dans les faits peu d'estimations du volume du parc automobile sont issues d'enquêtes en raison de la problématique associée au redressement et au calcul des poids permettant de mener à une statistique fiable du volume du parc. En outre dans la section 2.2.3 certaines limites supplémentaires des panels dans l'estimation du volume du parc mises en évidence par Collet (2007) seront exhibées.

2.2.1. L'Enquête de Conjoncture Auprès des Ménages (ECAM)

L'équipement en automobile des ménages français est étudié par l'Insee depuis 1965 grâce à une enquête sur les biens durables et les intentions d'achats. Cette enquête intitulée Enquête de Conjoncture Auprès des Ménages (ECAM) depuis 1977, est réalisée sur la base d'un échantillon de logements représentatifs sélectionnés à partir du recensement de la population française. Les ménages occupants ces logements sont interrogés trois fois par an aux mois de janvier, mai et novembre. Depuis 1988, le nombre de ménages interrogés est de 6000 à 8000 par enquête. Les questions relatives à l'automobile permettent de connaître entre autres l'année d'acquisition, l'année de première immatriculation, l'état à l'acquisition (neuf, presque neuf, occasion) et le type de carburant (la distinction essence/diesel n'étant clairement établie que depuis 1989). Il faut cependant ajouter que le champ étudié est restreint à l'ensemble des voitures particulières à disposition permanente des ménages et n'intègre de ce fait les voitures particulières achetées par les sociétés revendues aux ménages qu'au bout de trois à cinq ans.

2.2.2 Le panel Parc Auto

L'ambition portée par l'enquête Parc Auto est de fournir un outil permettant une vision et une connaissance accrue et représentative du parc automobile français à la disposition des ménages résidents, en termes d'équipement et d'usage. Le panel Parc Auto²² constitue ainsi une source de données importante car il fournit une description des caractéristiques techniques, du niveau d'équipement, et de l'usage des automobiles. Cette enquête offre en

²² Le panel Parc Auto nous a servi de support pour une grande partie des calculs et des estimations empiriques tout au long de ce mémoire.

outre une description fine de leurs utilisateurs que ce soit les individus ou les ménages. Cette enquête à portée nationale est réalisée annuellement depuis 1976. Elle est conduite par TNS-Sofres²³ en sondant par voie postale un échantillon de 10 000 ménages volontaires. Il s'agit d'un panel rotatif dont le renouvellement observé est d'environ un tiers par an (plutôt un quart depuis quelques années), et concerne prioritairement les « mauvais répondants ». Rappelons que dans le cas du panel Parc Auto on observe à la fois les ménages et leurs véhicules à disposition. Après la saisie informatique des questionnaires papiers renvoyés, une enquête annuelle se présente globalement sous la forme de deux fichiers électroniques séparés :

- Un fichier « ménages » qui recense toutes les caractéristiques socio-économiques des ménages répondants (tranche de revenus, localisation géographique etc.) ainsi que certaines caractéristiques des individus membres du ménage (âge, sexe, possession de permis, catégorie professionnelle, etc.). Le nombre de ménages enregistrés est variable selon les années d'enquêtes mais se situe généralement au dessus de 7 000 ménages recensés entre 1984 et 1996 et à plus de 6 000 ménages entre 1997 et 2008 excepté en 2006 (voir figure 1-6), année où le taux de réponse des ménages atteint son plus bas avec 56% de répondants.

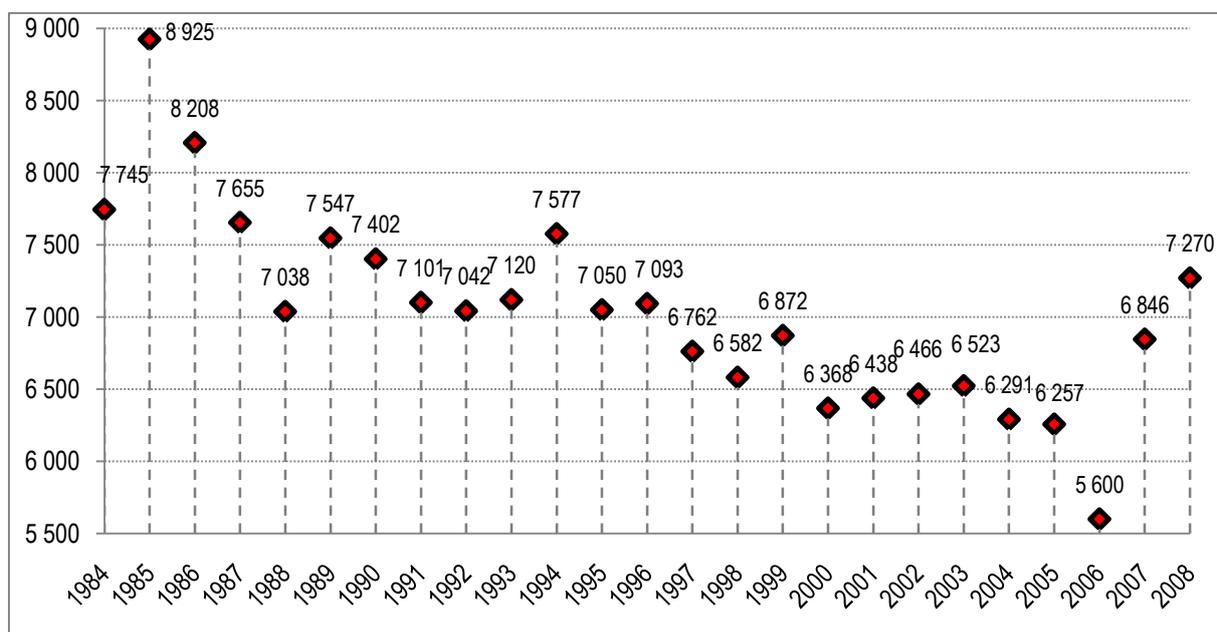


Figure 1- 6 Taille du fichier ménage par vague de panel Parc Auto

- Un fichier « véhicules » qui permet de décrire les caractéristiques de trois véhicules à disposition des ménages répondants. Ce fichier décrit de nombreuses caractéristiques pour chaque véhicule à disposition du ménage telles que le modèle, le type, la motorisation, l'année de construction, l'année d'achat, le département

²³ TNS-Sofres devient Kantar-Worldpanel-TNS-Sofres après l'OPA réussie en octobre 2008 par le groupe WPP (Wire and Plastic Products).

d'immatriculation, le kilométrage affiché au compteur, le kilométrage annuel parcouru, la cylindrée, la puissance fiscale, la puissance réelle, etc.

Le nombre de véhicules dans le fichier est variable d'une année sur l'autre (voir figure 1-7), mais ne descend généralement pas en dessous de 8 000 véhicules observés excepté en 1984 et en 2006 où l'on recense respectivement près de 7 700 et 7 200 véhicules.

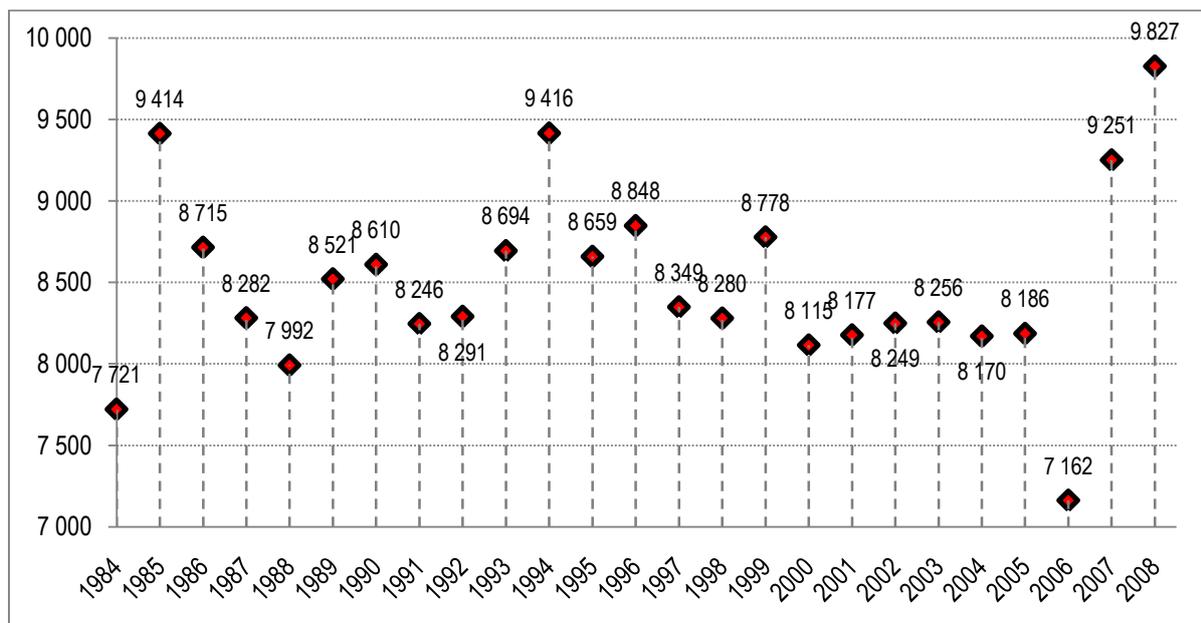


Figure 1- 7 Taille du fichier véhicule par vague de panel Parc Auto

Un identifiant unique attribué à chaque ménage permet d'effectuer l'appariement entre le fichier « ménages » et le fichier « véhicules » pour une année donnée permettant ainsi le suivi longitudinal individuel pour les ménages qui répondent à plusieurs vagues d'enquêtes successives.

2.2.3 Les limites des panels pour l'estimation du volume du parc automobile

L'usage de données panélisées comme alternative pour l'estimation du volume du parc automobile peut sembler intéressante, cependant un argument majeur s'oppose pourtant à cet usage. En effet, tout problème de représentativité aussi minime qu'il soit peut avoir un impact important sur l'estimation qui en est tirée. Concernant le panel Parc Auto Sofres par exemple, Collet (2007) exhibe un inconvénient majeur tenant à l'existence de biais de sélection. Il montre, en ajustant un modèle catégoriel de type probit à une indicatrice de la participation au panel 1999-2001 des ménages de la vague 1999, qu'il existe un effet frein sur la participation des ménages multi-motorisés de la vague 1999. De fait, toutes choses égales par ailleurs, la probabilité pour qu'un ménage qui a participé à l'enquête en 1999 participe à l'enquête de l'année 2000 puis à l'enquête 2001 diminue significativement avec le nombre de véhicules à sa disposition.

TNS Sofres ne renouvelle pas les questionnaires des mauvais répondants, or les ménages multi-équipés sont plus rapidement découragés que leurs homologues non ou peu motorisés par le remplissage du questionnaire véhicule qui est plus fastidieux. Ces ménages plus équipés que la moyenne sont ainsi plus fréquemment sortis du panel par TNS Sofres. Sans une correction imposant une majoration contrôlée des pondérations associées à ces ménages, ce biais de sélection se traduit par une sous représentation des ménages multi-équipés, impliquant de fait une sous estimation du volume du parc automobile à disposition des ménages.

2.3. Les modèles de prévision de l'équipement automobile

L'estimation du volume du parc roulant est essentielle pour l'estimation du trafic exprimé en véhicules-kilomètres. Le trafic est une grandeur qui s'exprime comme le produit de deux facteurs, le volume du parc statique et le parcours moyen que ces véhicules effectuent pendant une période (généralement annuelle). Ce trafic lorsqu'il est estimé permet à son tour d'effectuer, entre autres, des évaluations d'émissions de polluants locaux et de GES par application de coefficients moyens d'émission.

Concernant la diffusion historique de l'équipement automobile depuis plusieurs décennies, on a pu observer en France, et dans de nombreux pays industrialisés [Dargay et Gately, 1999], une augmentation des taux d'équipement (par ménage ou par individu) s'expliquant d'une part par la croissance des revenus disponibles et d'autre part par l'augmentation des besoins de mobilité.

2.3.1 Les modèles de croissance agrégés

Les modèles de croissance agrégés²⁴ représentent la diffusion de l'équipement automobile au sein d'une population comme un processus qui suit une loi de forme sigmoïdale dotée d'un seuil de saturation. Ces derniers ont été développés en Grande-Bretagne par Smeed (1951) puis par Tanner (1958) afin de projeter le niveau et la croissance du parc automobile principalement pour prévoir la demande d'infrastructures routières. Depuis les recherches pionnières de Smeed (1951) de nombreux travaux dans divers pays ont utilisé les modèles de croissance agrégés [Ingram et Liu, 1997; Hirota, 2007; Whelan, 2007]. Mais depuis les travaux de Moutardier et Glaude (1978), il existe à ce jour peu de références et d'usages pour la France [par ex. Collet *et al.*, 2010].

2.3.2 Modèles démographiques

Les modèles d'estimation et de prévision d'équipement des ménages français ont largement fait appel à des modèles démographiques [Madre et Gallez, 1993 ; Gallez, 1994b ; Madre *et*

²⁴ Les avantages et les inconvénients des modèles agrégés pour l'estimation et la prévision des niveaux de motorisation seront discutés plus en détail dans le chapitre 2.

al., 1996 ; Berri et Madre, 2000 ; Dargay *et al.*, 2000 ; Krakutovski, 2004 ; Berri, 2005]. Ces derniers sont très appréciés principalement pour leur approche longitudinale reposant sur le suivi du comportement des générations successives de ménages au cours de leur cycle de vie. Ces approches longitudinales permettent de prendre en compte simultanément les dimensions transversale et temporelle de l'équipement des ménages.

Les principaux avantages de l'approche démographique sont cités par Berri (2005) pp. 75 :

« L'approche démographique fournit un outil à la fois souple et robuste pour réaliser des projections à long terme du parc automobile, en ce qu'elle évite de fixer des seuils de saturation, tient compte des effets des facteurs économiques et démographiques, et utilise des variables assez stables (les projections de population) »

En effet, le principe général de l'approche démographique consiste à se focaliser sur des catégories d'individus appelés « cohortes » au sein d'une population. Ces cohortes étant des regroupements homogènes d'individus par génération repérées par la période de naissance. Les cohortes doivent de plus être les plus hétérogènes possible d'un groupe à l'autre puisqu'elles ont par définition des trajectoires de motorisation différente. Il s'agit ensuite de suivre l'évolution des niveaux de motorisation par cohorte. Ainsi, au lieu de suivre l'évolution d'un taux de motorisation agrégé, on décrit les évolutions des taux associés à différents groupes dont le comportement de motorisation est représenté par celui de l'individu moyen.

Berri (2005) a effectué des projections à long terme des parcs automobiles français, hollandais, italiens (en distinguant nord et sud de la péninsule), japonais et états-uniens à l'aide d'un modèle démographique. Ce modèle nécessite de passer au préalable par une estimation du comportement d'équipement des ménages ou des individus, c'est-à-dire par l'estimation du nombre de véhicules par ménage ou adulte en âge de conduire par cohorte. Il nécessite aussi d'avoir un panel d'individus ou de ménages constant au cours du temps ce qui est rarement le cas. Pour contourner ce problème, ces taux sont estimés par Berri (2005) en recourant à la pseudo-panélisation [Deaton, 1985]. Les résultats de ces projections de parcs obtenus pour la France avoisinent les 31 000 000 véhicules pour 2010, 32 800 000 en 2015 et 34 300 000 véhicules particuliers en 2020. Il faut noter que l'estimation obtenue pour 2010 n'est guère lointaine de celle estimée par le CCFA pour janvier 2010 à 31 050 000 véhicules particuliers. Le principal avantage de l'approche démographique réside dans la bonne connaissance des évolutions démographiques humaines. Ces données combinées à une bonne estimation des taux de motorisation permettent d'apporter de bonnes prédictions du volume du parc automobile.

2.3.3 Lois de survie du parc automobile

Les modèles démographiques peuvent aussi se décliner différemment non plus sous la forme de *démographie des individus* mais sous celle de *démographie des véhicules*. La

démographie des véhicules particuliers est nécessaire puisqu'elle permet d'apporter des informations sur notre population d'intérêt : les véhicules particuliers. D'autre part, elle permet d'apporter un éclairage sur le processus dynamique du renouvellement du parc automobile et sur l'estimation de son volume reposant sur l'estimation de taux de survie puis sur l'ajustement de lois de survies paramétriques [Moutardier et Glaude, 1978 ; Gallez, 1994a]. Le recours à des lois de survie des véhicules permet non seulement d'effectuer des estimations du volume du parc automobile, par projection temporelle des paramètres des lois ajustées, mais aussi de comprendre la dynamique démographique par génération de véhicules.

De tels modèles ont été exploités pour la France par Gallez (1994a) suivant une méthode inspirée par les travaux de Moutardier et Glaude (1978) mais aussi par des recherches internationales principalement états-uniennes ou grecques [Zachariadis *et al.*, 1995 ; Greenspan et Cohen, 1996 ; Chen et Niemeier, 2004]. Les approches démographiques par profil de motorisation ou par loi de survie sont rapidement venus supplanter les modèles dits agrégés fondés sur l'extrapolation au niveau agrégé d'une courbe de croissance de la motorisation de type logistique qui fixe un seuil de saturation a priori.

CONCLUSION

La quantification de la pollution locale et des émissions de CO₂ associés aux véhicules particuliers et imputables aux gaz d'échappement et à l'abrasion sont fortement tributaires de statistiques fiables sur le volume annuel du parc automobile. La nécessité d'avoir des estimations fiables des « structures de circulation » définissant l'effectif des véhicules par grande catégorie de véhicules roulants est mue par les besoins en matière d'inventaires d'émissions. Chaque grande catégorie de véhicules roulants possède un coefficient moyen d'émission spécifique impliquant des calculs d'émissions différenciés par type de véhicule routier. Nous avons pourtant souligné que les méthodes d'estimations du volume du parc automobile sont orphelines de la disparition de la taxe différentielle sur les véhicules à moteurs. Ce chapitre montre pourtant qu'il subsiste diverses méthodes permettant d'estimer le volume du parc automobile malgré l'abandon de la vignette en 2001. Ces méthodes peuvent être classées en trois grandes catégories :

- Les sources statistiques :
 - ✓ Les comptages administratifs notamment le fichier central automobile (FCA) utilisé par le SOeS permettant la publication de statistiques de parc automobile moins de 15 ans ;
 - ✓ L'appariement du fichier central automobile (ou fichiers de cartes grises) (FCA) avec le fichier des contrôles techniques (FCT issu de l'UTAC : Union

Technique de l'Automobile et du Cycle) réalisé par Métaphis et Curtet (2006).

- Les enquêtes : notamment les ECAM, Parc Auto (ou d'autres comme les ENTD : Enquêtes Nationales Transport Déplacement)
- Les méthodes basées sur la modélisation:
 - ✓ les modèles agrégés ;
 - ✓ les modèles démographiques ;
 - ✓ les modèles de lois de survie du parc automobile

Dans, le chapitre 2 nous proposons de faire une exploitation des modèles de croissance agrégés [Smeed, 1951 ; Tanner, 1958, 1978]. Ces modèles sont peu utilisés en France en raison du succès des modèles démographiques qui ne supposent ni d'évolution du taux de croissance du volume du parc, ni l'existence d'un seuil de saturation des taux de motorisation. Les modèles agrégés restent encore prisés [Dargay et Gately, 1999 ; Whelan, 2007 ; Hirota, 2007 ; Collet *et al.*, 2010] car ils permettent d'apporter certaines informations globales et complémentaires à une approche démographique notamment dans la compréhension des phénomènes de saturation, d'asymétrie et d'inflexion des courbes de diffusion de l'équipement automobile et de niveau de motorisation des ménages et individus.

Chapitre 2 : Modèles agrégés pour l'estimation du volume du parc automobile Français

SOMMAIRE

| | |
|---|-----------|
| CHAPITRE 2 : MODELES AGREGES POUR L'ESTIMATION DU VOLUME DU PARC AUTOMOBILE FRANÇAIS | 47 |
| INTRODUCTION | 48 |
| 1. DEVELOPPEMENT DU MODELE AGREGÉ : REVUE DE LA LITTÉRATURE | 49 |
| 1.1. Description de la croissance de l'équipement | 49 |
| 1.2. Le modèle agrégé : revue de la littérature..... | 50 |
| 2 AJUSTEMENT SUR DONNEES FRANÇAISES | 53 |
| 2.1. Méthode et algorithme d'ajustement non linéaire | 56 |
| 2.1.1. Estimation d'un modèle de régression non-linéaire | 57 |
| 2.1.2. Algorithmes d'optimisation numériques | 57 |
| 2.1.2.1 Algorithmes de Gauss-Newton et de Newton-Raphson | 58 |
| 2.1.2.2 Identifiabilité des paramètres | 61 |
| 2.2. Critères quantitatifs sur la qualité de l'ajustement aux données | 63 |
| 2.2.1. Coefficient de corrélation (ou de Pearson) et de détermination | 64 |
| 2.2.2. Statistique du khi-2..... | 65 |
| 2.2.3. Statistique de Fisher | 65 |
| 2.2.4. Tests retenus | 67 |
| 3. RESULTATS DES AJUSTEMENTS | 68 |
| 3.1. Modélisation des taux de motorisation par ménage | 69 |
| 3.1.1 Modèles logistique et Gompertz..... | 69 |
| 3.1.2 Modèles Tanner et Von Bertalanffy | 71 |
| 3.1.3 Projections des taux de motorisations par ménage..... | 72 |
| 3.2. Modélisation des taux de motorisation par individu | 73 |
| 3.2.1 Modèles logistique et Gompertz..... | 73 |
| 3.2.2 Modèles Tanner et Von Bertalanffy | 75 |
| 3.2.3 Projections des taux de motorisation par individu de 19 ans et plus | 77 |
| 3.2.4. Ajustements sur données antérieures à 2001 | 78 |
| 3.3. Modèles de croissance agrégés de la motorisation avec variables exogènes | 79 |
| CONCLUSION | 85 |

INTRODUCTION

Ce chapitre présente une revue de la littérature des modèles de croissance agrégés de la motorisation et de diffusion de l'équipement automobile. Les modèles de croissance agrégés représentent aussi bien la diffusion de l'équipement automobile que la croissance de la motorisation (véhicules par individu ou ménage) au sein d'une population. Ces modèles permettent donc de décrire l'évolution des taux de motorisation et des taux d'équipement comme des processus qui suivent une loi de type sigmoïdale dotée d'un seuil de saturation. Ces derniers ont été développés en Grande-Bretagne par [Smeed \(1951\)](#) puis par [Tanner \(1958\)](#) afin de projeter le niveau et la croissance du parc automobile avec l'objectif principal de prévoir la demande d'infrastructures routières.

Afin d'ouvrir une perspective sur les modèles à seuil de saturation, nous proposons une méthodologie d'estimation des taux de motorisation ainsi qu'une comparaison de quelques modèles agrégés testés par ajustement sur des données françaises de taux de motorisation par ménage et par individu. Pour ce faire, nous nous appuyons sur l'hypothèse formulée par [Marchetti \(1986\)](#) selon laquelle toute croissance démographique se heurte sans exception à l'émergence de forces qui induisent des phénomènes de saturation. D'après [Marchetti \(1986\)](#) concernant la croissance des taux de motorisation automobiles, ces forces de saturation résultent en particulier de l'existence de la constante universelle du budget de temps de transport communément admise comme étant la loi de Zahavi [[Zahavi et Ryan, 1980](#)] ainsi que de la part des ressources et revenus consacrée par les hommes à leurs déplacements quotidiens qui sont elles-mêmes régies par un seuil maximal. Conformément à cette perspective, nous décidons d'ajuster (donc de « plaquer ») des courbes sigmoïdales à seuil de saturation sur les séries temporelles décrivant les évolutions passées du taux de motorisation des véhicules particuliers par individu (de 19 ans et plus) et par ménage.

Dans ce cadre, la troisième partie du chapitre servira à illustrer une application des modèles agrégés à la modélisation et à la prévision du volume du parc automobile français. Nous nous intéresserons aux estimations et aux projections aux horizons 2020 à 2050 des taux de motorisation des ménages et des individus en âge de conduire (de 19 ans et plus). En comparant des résultats d'ajustements effectués nous pourrions déterminer la forme fonctionnelle la mieux adaptée à la diffusion de l'équipement automobile parmi les quatre principaux modèles de croissance agrégés les plus répandus et tirés pour la plupart de la démographie de la croissance de populations humaines, animales et végétales : logistique

[Verhulst, 1838, 1845, 1846, 1847]²⁵, Gompertz [Gompertz, 1825], Tanner [Tanner, 1978] et Von Bertalanffy [Von Bertalanffy, 1938]. Les données²⁶ utilisées pour estimer les taux de motorisation sont, d'une part, la série annuelle du parc automobile de véhicules particuliers couvrant la période 1956 à 2010 provenant des statistiques du Comité des Constructeurs Français Automobile (CCFA) et d'autre part, les séries du recensement donnant la population métropolitaine des individus de 19 ans et plus et des ménages France entière.

Après avoir isolé le meilleur modèle au sens des critères statistiques retenus (coefficient de détermination et statistique de Fisher), nous introduisons quelques variables macro-économiques susceptibles d'avoir joué un rôle moteur sur le développement de la motorisation au niveau individuel et du ménage. Pour conclure nous soulignons ce qui semble être le point fort et les faiblesses des modèles de croissance agrégés.

1. Développement du modèle agrégé : revue de la littérature

Cette section est destinée à présenter l'évolution des modèles de croissance de l'équipement en automobile. Ces derniers ont été développés en Grande- Bretagne après la Seconde Guerre mondiale. L'objectif pour ces derniers était, rappelons-le, d'obtenir des outils de décision pour les instances politiques en charge d'effectuer des prospectives sur les perspectives d'augmentation de la circulation routière afin d'évaluer les besoins croissants en infrastructure routière dans les années 50.

1.1. Description de la croissance de l'équipement

Les premiers modèles agrégés de projection du parc automobile décrivent des taux d'équipement des ménages. Ces taux d'équipement correspondent au pourcentage de ménages ou d'individus possédant au moins un véhicule. Le taux d'équipement est un indicateur qui permet de mesurer la diffusion horizontale de l'équipement automobile c'est-à-dire la proportion des ménages (ou d'individus) faisant l'acquisition d'une automobile sachant qu'ils n'en possédaient aucune. Avec le développement du multi-équipement, la mesure de la diffusion de l'automobile selon l'indicateur du taux d'équipement est très rapidement devenue insuffisante puisqu'elle ne retranscrit pas la diffusion verticale de l'équipement c'est-à-dire la croissance du parc automobile due à la hausse du nombre de véhicules détenus par chaque

²⁵ Les ouvrages originaux sont conservés à la bibliothèque Royale Albert 1er (KBR) de Bruxelles

²⁶ Les taux de motorisation par ménage (respectivement par individu) sont exprimés comme des rapports entre le nombre de ménages moyens (respectivement nombre d'individus de 19 ans et plus) de l'année n et le nombre annuel de véhicules du parc français.

ménage (ou individu). C'est pourquoi le taux d'équipement, donnant le pourcentage de ménages (ou d'individus) équipés a progressivement été remplacé par le taux de motorisation donnant le nombre moyen de véhicules par individu ou ménage. En apportant une mesure du nombre moyen de véhicules détenus par ménage (ou par individu), le taux de motorisation permet de prendre en compte à la fois (certes sans pouvoir les dissocier) la diffusion horizontale et verticale de l'équipement.

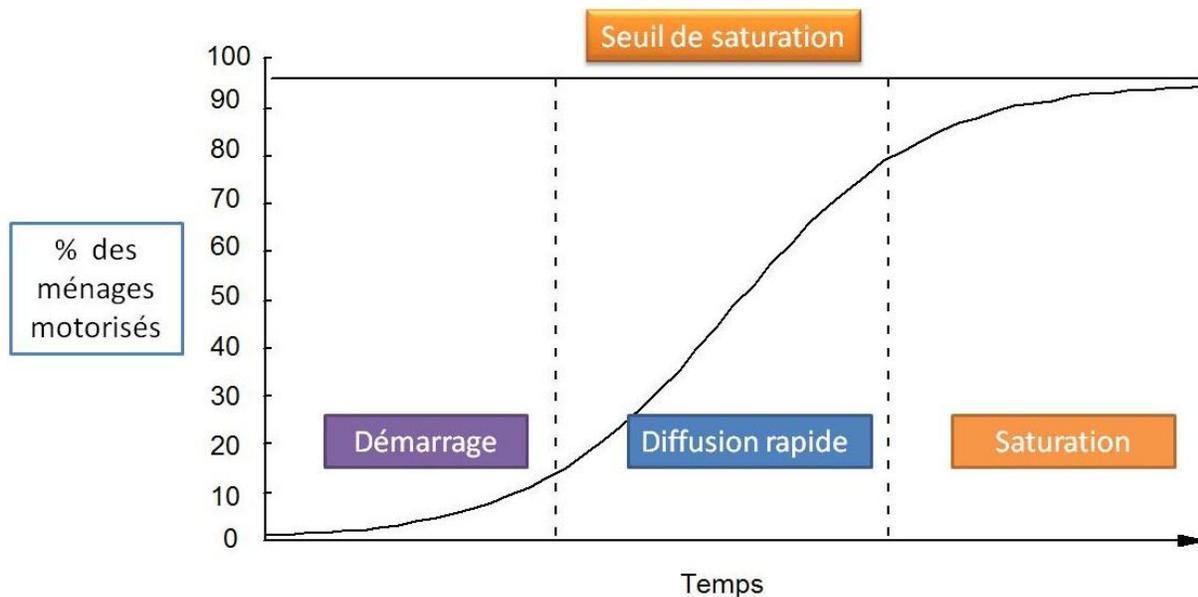
1.2. Le modèle agrégé : revue de la littérature

Le premier modèle de projection des taux d'équipement automobile a été élaboré par Smeed (Road Research Laboratory) en 1951. Smeed (1951) introduit le salaire réel comme un déterminant majeur de la hausse de la mobilité et de l'usage automobile. Rudd (1951) estime que les coûts d'achats et de détention des véhicules jouent au même titre que le salaire réel un rôle dans l'explication de la hausse du trafic automobile. A cette époque, les techniques d'extrapolation suggèrent que les taux d'équipement ne devraient pas croître de manière indéfinie avec le temps mais se heurter à un plafond situé bien avant le seuil de saturation maximal de 100% des ménages (individus) équipés. Ce n'est que plus tard que Tanner (1958) formule pour la Grande-Bretagne un modèle logistique qui relie non plus des taux d'équipement mais des taux de motorisation (véhicule par individu) en fonction du temps. En notant T le nombre de véhicules par tête, S le seuil de saturation et C la croissance marginale du nombre moyen de véhicules par tête, le modèle est donné par :

$$T_t = \frac{S}{1 + \alpha \cdot e^{-\beta \cdot S \cdot t}}$$

$$\text{Avec } \alpha = \frac{S - T_0}{T_0} \quad \text{et} \quad \beta = \frac{c_0}{S - T_0}$$

Les valeurs T_0 et c_0 représentent respectivement le nombre moyen de véhicules par tête pour l'année de base (t_0) et la croissance marginale du nombre moyen de véhicules par tête pour l'année de base qui est calculé en évaluant $\frac{dC}{C \cdot dt}$ en t_0 . Ainsi, connaissant les valeurs de T_0 et c_0 et en estimant a priori le seuil de saturation S , il est possible d'extrapoler les estimations des taux de motorisation T_t lesquels combinés aux estimations des projections de populations permettent de projeter le volume du parc automobile.



Figure

2- 1 Schéma logistique de diffusion de l'équipement des ménages en automobile avec seuil de saturation de l'équipement.

Quelques applications assez récentes du modèle agrégé de motorisation des ménages (ou individus) montrent que cette approche reste prise comme outil de comparaison de l'évolution de taux de motorisation par pays [Ingram et Liu, 1997; Dargay et Gately, 1999 ; Whelan, 2007]. Dargay et Gately (1999) utilisent un modèle de type Gompertz [Gompertz, 1825], reconnu pour sa flexibilité supérieure à celle du modèle logistique [Verhulst, 1838, 1845, 1846, 1847], afin de prédire des taux de motorisation exprimés en véhicules pour 1000 habitants rapportés au PIB par tête pour 82 pays. Des études antérieures ont aussi utilisé une loi de Gompertz, notamment Hautzinger *et al.* (1978) mais aussi Franses (1994) ou encore Zachariadis *et al.* (1995).

Dargay et Gately (1999) reconnaissent que certaines variables non directement reliées aux revenus peuvent avoir des effets significatifs sur le niveau de motorisation des ménages. En règle générale les prévisions effectuées à l'aide de modèles agrégés cherchent à s'ajuster au mieux aux séries temporelles des taux de motorisation observés selon des critères de significativité statistique pour une structure donnée du modèle. Les points cruciaux étant liés aux choix de la spécification et des variables explicatives du modèle de motorisation ou d'équipement. Sharp (1973) montre ainsi qu'une modification dans le choix d'hypothèses (forme fonctionnelle, nombre de variables, choix des variables etc.) peut mener à obtenir des résultats différents dans les projections.

Certaines limites des modèles agrégés sont reconnues dans les années 70. Les principales critiques émises à l'encontre de ce type de modèle sont qu'il ne considère pas les impacts des mesures économiques et politiques ainsi que la dimension causale socio-économique. Dans le

sillage de ces critiques figurent aussi celle de l'utilisation d'une loi logistique qui postule la symétrie de la courbe de diffusion de l'équipement par rapport à son point d'inflexion.

En réponse à ces critiques, [Tanner \(1978\)](#) raffine le modèle en y incluant des variables de revenu et de coûts de motorisation et en développant une loi théorique de type « logistique » dotée d'un coefficient d'asymétrie avec le souci d'augmenter la qualité de l'ajustement du modèle théorique aux données de taux de motorisation par ménage. Le principal atout de cette loi dite « *loi de Tanner* » est d'augmenter la qualité de l'ajustement global en ajoutant de la flexibilité sur la position du point d'inflexion de la sigmoïde et en y ajoutant des variables explicatives du développement de la motorisation :

$$T_t = \frac{S}{1 + \frac{S - T_0}{T_0} \left(\frac{P}{P_0} \right)^{-\delta S} \left(\frac{M}{M_0} \right)^{-\gamma S} e^{-\varepsilon \cdot S \cdot (t - t_0)}}$$

Où P représente le PIB par tête et M les coûts réels de motorisation (P_0 et M_0 représentant ces grandeurs pour l'année de référence). La mise en application d'un tel modèle suppose une estimation préalable du seuil de saturation ainsi que des paramètres δ , γ et ε .

[Button et al. \(1982\)](#) s'inspirent de la spécification de [Tanner \(1978\)](#) pour présenter un modèle plus parcimonieux en terme de variables explicatives. Ce dernier n'incorpore que deux variables explicatives qui sont le revenu moyen des conducteurs (RC) et le nombre de permis (NP) :

$$T_t = \frac{S}{1 + \left(\frac{RC}{NP} \right)^{-\beta} + e^{-\alpha}}$$

Pour sélectionner les variables explicatives [Hirota \(2007\)](#) utilise une régression linéaire dont la variable endogène est le niveau de motorisation pour 1000 habitants. Il teste la corrélation du PIB par tête, du nombre de permis, et du prix du brut avec les taux de motorisation par individu au Japon. Il montre, pour le cas du Japon, que l'impact du prix du brut est négligeable par rapport aux deux autres variables (PIB par tête et nombre de permis). Pour expliquer ce phénomène, [Espey \(1998\)](#) fait remarquer que le comportement des agents doit être analysé suivant deux focales : l'usage et la détention automobile. Il démontre que les conducteurs tendent d'une part à diminuer les distances parcourues en réponse à une hausse du prix des carburants et d'autre part à remplacer leurs véhicules pour des modèles moins consommateurs

de carburants. Drollas (1984) classe les variables qui ont un effet sur les niveaux d'équipement en deux grandes classes selon qu'elles aient un impact de court ou de long terme. L'auteur fait remarquer que les individus motorisés tendent à diminuer l'usage de leur véhicule en réponse à une hausse de court terme du prix des carburants. Il montre d'autre part que les propriétaires de véhicules essence tendent à remplacer leurs véhicules pour des motorisations alternatives plus économiques (GPL, diesel, etc.) et qu'ils augmentent leur usage de transports en commun en réponse à une hausse durable des prix des carburants. Notons par ailleurs que de nombreuses études montrent que la hausse des prix des carburants n'implique pas de façon mécanique la baisse du niveau d'équipement des ménages. Notamment, Johansson et Schipper (1997) puis Hirota *et al.* (2005) font état d'un effet assez restreint de la variation des prix des carburants sur la variation des taux de motorisation.

D'autre part, bien que la hausse des revenus soit considérée comme la principale variable qui explique l'essor de l'automobile, Gakenheimer (1999) montre que pour les pays en voie de développement les revenus du quintile le plus riche de la population offre une meilleure explicativité du développement de l'équipement que le revenu moyen de la population.

2 Ajustement sur données françaises

Les séries de taux de motorisation par individus (voir figure 2-2) sont calculées comme des rapports de nombre de véhicules particuliers dont la série provient du Comité des constructeurs Français Automobile (CCFA) et de population française (INSEE) de 19 ans et plus (série INSEE couvrant 55 années : 1956 à 2010). Les séries de taux de motorisation par ménage sont calculées de la même façon en remplaçant la série de population d'individus par la série donnant le nombre de ménages (série INSEE couvrant 47 années : 1960 à 2006) (voir figure 2-3). L'ensemble des séries énoncées sont fournies dans l'annexe 2-1.

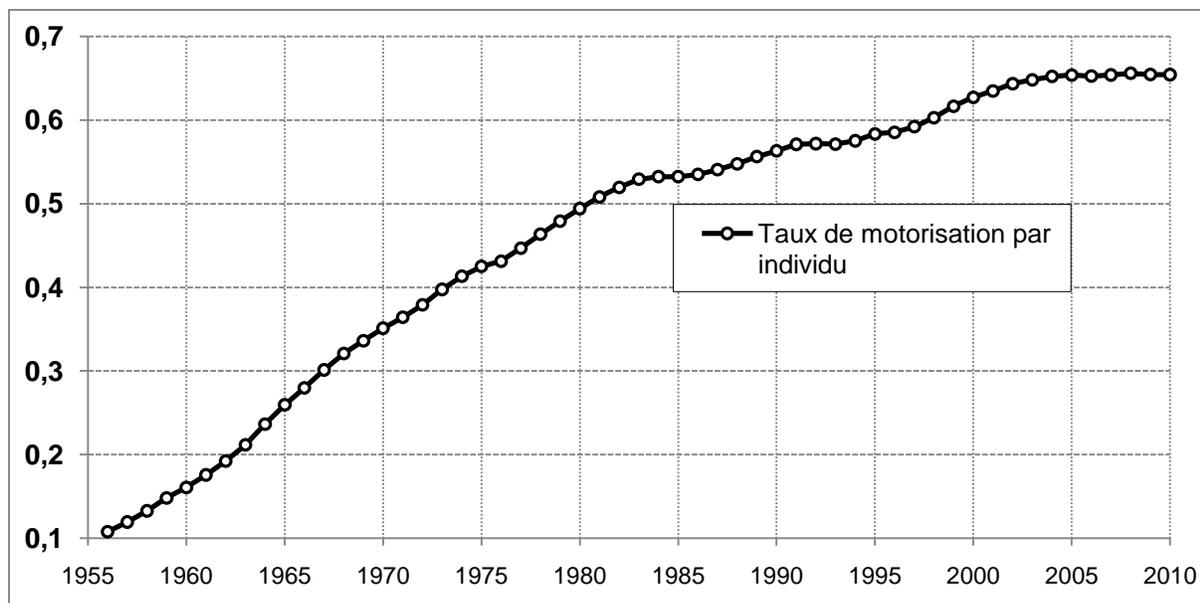


Figure 2- 2 Taux de motorisation par individu de 19 ans et plus du 1er janvier 1956 au 1er janvier 2010. Sources : CCFA, INSEE

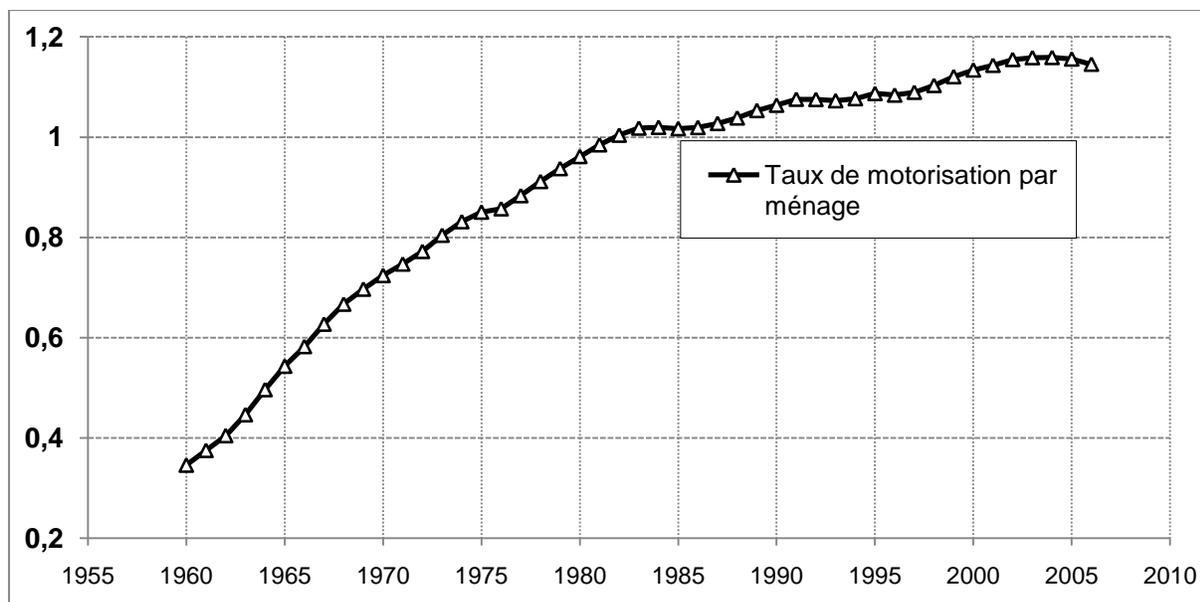


Figure 2- 3 Taux de motorisation par ménage du 1er janvier 1960 au 1er janvier 2010. Sources : CCFA, INSEE

La forme des courbes d'évolution des taux de motorisation des individus (figure 2-2) et des ménages (figure 2-3) met en évidence un plafond (autour de 0,65 véhicule par individu et de 1,18 véhicule par ménage) qui semble avoir été atteint au début des années 2000. Cette observation semble en accord avec l'hypothèse de [Marchetti \(1986\)](#) selon laquelle toute croissance démographique se heurte à l'émergence de forces qui induisent des phénomènes de saturation. Dans le cas qui nous intéresse, la croissance des taux de motorisation automobiles, ces forces de saturation résultent en particulier de l'existence de la constante dite universelle du

budget de temps de transport communément admise comme étant la loi de Zahavi [Zahavi et Ryan, 1980] ainsi que de la part des ressources et revenus consacrés par les hommes à leurs déplacements quotidiens qui ne peuvent croître indéfiniment puisqu'elles sont elles-mêmes régies par un seuil, un plafond maximal²⁷. Conformément à cette perspective, nous décidons d'ajuster (donc de « plaquer ») des courbes sigmoïdales à seuil de saturation sur les séries temporelles décrivant les évolutions passées du taux de motorisation des véhicules particuliers par individu (de 19 ans et plus) et par ménage. Un ajustement effectué sur des séries françaises de taux de motorisation par individu et par ménage devrait nous éclairer sur les questions du choix théorique de la (ou des) loi(s) qui guide(nt) la croissance du taux de motorisation des ménages français, sur la forme sigmoïdale de la courbe de taux de motorisation, sur l'existence et la position du point d'inflexion, et sur les niveaux de motorisation projetés à l'horizon 2020-2050.

Nous choisissons quatre lois de croissance correspondant chacune aux critères des expressions analytiques des lois théoriques susceptibles de guider le niveau de motorisation des ménages et individus en France. Les quatre lois énoncées sont issues de la démographie et des mathématiques de la croissance de la population humaine et animale à l'exception de la loi de Tanner (1978). Elles admettent par ailleurs de fortes similarités, elles sont toutes dotées d'un seuil de saturation et d'un point d'inflexion. Leur principale divergence se situe dans la liberté plus ou moins grande dans le positionnement du point d'inflexion, donnant plus ou moins de « flexibilité » à la forme paramétrique. Les quatre modèles (voir expressions mathématiques tableau 2-1) de croissance agrégés formulés par les lois :

- logistique [Verhulst, 1838, 1845, 1846, 1847]
- Gompertz [Gompertz, 1825]
- Tanner avec coefficient d'asymétrie [Tanner, 1978]
- Von Bertalanffy [Von Bertalanffy, 1938]

²⁷ Ce plafond est assez méconnu en raison de la disparité des choix individuels (multi-équipement), de leur vulnérabilité et de leur réaction à la hausse des prix des carburants ainsi qu'aux aspects réglementaires.

| Expression | Logistique | Gompertz | Tanner ²⁸ | Von Bertalanffy |
|---|--|--|---|---|
| Modèle mathématique | $y(t) = \frac{S}{1 + \alpha \cdot e^{-\beta \cdot (t-t_0)}}$ | $y(t) = S \cdot \exp\left(\alpha \left(e^{-\beta \cdot (t-t_0)}\right)\right)$ | $y(t) = \frac{S}{1 + \alpha \cdot (t-t_0)^{-\beta}}$ | $y(t) = S \cdot \left(1 - e^{-\beta \cdot (t-t_0)}\right)^\alpha$ |
| Seuil de saturation | S | S | S | S |
| Coordonnées du point d'inflexion P(X,Y) | $\left(\frac{\ln(\alpha)}{\beta}, \frac{S}{2}\right)$ | $\left(\frac{\ln(-\alpha)}{\beta}, \frac{S}{e}\right)$ | $\left(\frac{[\alpha(\beta-1)]^{\frac{1}{\beta}}}{\beta+1}, \frac{S(\beta-1)}{2\beta}\right)$ | $\left(\frac{\ln(\alpha)}{\beta}, S \cdot \left(\frac{\alpha-1}{\alpha}\right)^\alpha\right)$ |

Tableau 2- 1 Expression mathématique des modèles retenus

Les quatre modèles présentés possèdent la propriété particulière de pouvoir représenter le phénomène de diffusion de l'automobile à l'aide de courbes de formes sigmoïdales caractérisées par un point d'inflexion et un seuil de saturation. Ces modèles de croissance agrégés sont ajustés à l'aide de l'algorithme de Newton-Raphson sur les séries de taux de motorisation par ménage et par individu couvrant respectivement les années 1960 à 2006 (47 années) et les années 1956 à 2010 (55 années) en fixant la condition initiale t_0 en 1945, après la Seconde Guerre mondiale.

2.1. Méthode et algorithme d'ajustement non linéaire

Puisque nos quatre modèles présentés ne sont pas des modèles linéaires, deux solutions se présentent pour l'estimation des coefficients α et β soit la linéarisation des modèles, lorsqu'elle est possible, afin d'opérer un ajustement linéaire, soit d'effectuer l'ajustement sans modifier la forme en passant pas la méthode des moindres carrés non-linéaires.

Les modèles de régression sont assez souvent abordés du point de vue particulier des régressions linéaires qu'il est possible d'estimer directement par la méthode des moindres carrés ordinaires (souvent MCO ou OLS en anglais) cependant la famille de régressions linéaire est incluse au sein des modèles de régression dans la famille plus large des modèles de régression non-linéaire qu'il est possible d'estimer en recourant aux moindres carrés non-linéaires. Cette partie est consacrée à la méthode des moindres carrés non-linéaires dans le cas de modèles univariés c'est-à-dire possédant une unique variable dépendante.

²⁸ Modèle de Tanner avec coefficient d'asymétrie (β)

2.1.1. Estimation d'un modèle de régression non-linéaire

Soit un modèle non linéaire défini tel que :

$$y = f(x_i, \beta) + \varepsilon$$

$$\varepsilon \sim iid(0, \sigma^2)$$

L'estimation des paramètres du modèle de régression non-linéaire consiste à rechercher le vecteur des paramètres β qui minimise la somme des carrés des résidus (SCR) :

$$SCR(\beta) = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i, \beta))^2 \quad (1)$$

Pouvant aussi s'écrire sous forme matricielle :

$$SCR(\beta) = [y - f(x, \beta)]' [y - f(x, \beta)] \quad (2)$$

Dont la solution est donnée par la minimisation de la SCR:

$$\beta = \arg \min [y - f(x, \beta)]' [y - f(x, \beta)] \quad (3)$$

Ou bien par la maximisation de la log-vraisemblance :

$$L(\beta, \sigma^2) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{\frac{n}{2}}} \cdot \exp \left[-\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i, \beta))^2}{2\sigma^2} \right] \quad (4)$$

Les valeurs estimées du vecteur β ont des propriétés statistiques similaires à celles obtenues par les modèles linéaires, notamment des propriétés de consistance et de normalité asymptotique de l'estimateur lorsque la taille n de l'échantillon tends vers l'infini.

En dérivant l'expression (1) de la SCR par rapport à β on trouve :

$$\frac{\partial SCR(\beta)}{\partial \beta} = -2 \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i, \beta)] \frac{\partial f(x_i, \beta)}{\partial \beta} \quad (5)$$

La condition nécessaire pour minimiser la SCR est d'annuler l'équation (5). Ceci conduit à estimer des équations qui sont, en règle générale, non-linéaires. Leur résolution nécessite dans la grande majorité des cas de passer par des algorithmes d'optimisation numériques.

2.1.2. Algorithmes d'optimisation numériques

Il existe de nombreux algorithmes permettant d'effectuer des ajustements par la méthode des moindres carrés itératifs non linéaires. Bien que notre problème soit peu complexe au regard des modèles testés, puisqu'ils possèdent chacun au plus 3 paramètres à estimer et un nombre

d'observations peu élevé (au plus 55), il y a nécessité de donner plus d'explications sur le fonctionnement des algorithmes d'optimisation basés sur les critères de moindres carrés non linéaires puisque ces derniers représentent l'outil principal pour l'estimation des paramètres d'ajustement qui seront présentés dans différentes parties de ce mémoire.

Les algorithmes d'optimisation non linéaire sont nombreux et ne peuvent, de fait, tous être énumérés dans cette section. Cette section se fixe plutôt l'objectif d'apporter une lecture pédagogique par la description des algorithmes de Gauss-Newton et de Newton-Raphson qui figurent parmi les algorithmes les plus répandus et les plus utilisés pour l'estimation de paramètres par moindres carrés non-linéaires.

Il en existe cependant bien d'autres, parfois plus simples comme l'algorithme du gradient et celui de la plus grande pente (de l'anglais « *steepest descent* ») ou plus complexes comme l'algorithme de [Levenberg-Marquardt \(1963\)](#) qui introduit des subtilités permettant d'obtenir une convergence plus rapide. Notre approche se base sur la minimisation de la somme des carrés des résidus (SCR). Nous incitons le lecteur à se référer aux travaux de [Judge et al. \(1985\)](#) et de [Ruud \(2000\)](#) pour plus de détails techniques sur ces méthodes et à [Train \(2002\)](#) pour une description quasi-exhaustive et pédagogique de ces méthodes basées sur l'écriture de la fonction de vraisemblance.

2.1.2.1 Algorithmes de Gauss-Newton et de Newton-Raphson

L'algorithme de Gauss-newton est un élément important pour les procédures d'optimisation numériques dont on fait usage pour chercher les estimations par moindres carrés non linéaires. L'usage du terme « algorithme d'optimisation » pour le qualifier est quelque peu abusif puisqu'il s'agit d'une méthode de résolution d'équations non linéaires de type $f(x)=0$. Il a pour objectif de

minimiser la fonction objectif $\beta = \text{Min} \left[\sum_{i=1}^n (y_i - f(\beta, x_i))^2 \right]$ par recours à l'utilisation de

méthodes itératives locales convergentes.

Pour la méthode de Gauss-Newton, ce cheminement est basé sur l'usage du gradient de la fonction objectif qui est lié à la direction de descente, et du Hessien de la fonction objectif qui lui en donne la courbure donc le pas. Le schéma itératif, pour l'itération $s+1$, de la méthode de Gauss-Newton peut s'écrire sous la forme : $\beta_{s+1} = \beta_s + \lambda\beta$ où $\lambda\beta$ représente l'avancée marginale dans la direction de β_{s+1} à partir de β_s . Cette avancée se fait dans la direction indiquée par le gradient et avec un pas (ou distance d'avancée) inversement proportionnelle à la courbure donnée par le Hessien.

- L'expression du gradient G_j de la SCR est :

$$G_j = \frac{\partial SCR(\beta)}{\partial \beta_j} = -2 \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i, \beta)] \frac{\partial f(x_i, \beta)}{\partial \beta_j}$$

soit $r_i = y_i - f(x_i, \beta)$ nous avons :

$$G_j = 2 \sum_{i=1}^n r_i \frac{\partial r_i}{\partial \beta_j}$$

- L'expression de la Hessienne H_{jk} est obtenue en dérivant le gradient G_j par rapport

$$\text{à } \beta_k : H_{j,k} = 2 \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial r_i}{\partial \beta_j} \frac{\partial r_i}{\partial \beta_k} + r_i \frac{\partial^2 r_i}{\partial \beta_j \partial \beta_k} \right)$$

La méthode de Gauss-Newton ignore les dérivées d'ordre supérieur à deux, ce qui n'est pas le cas de la méthode de Newton-Raphson qui prend en compte l'expression complète.

En effet, la spécificité de la méthode de Gauss-Newton repose sur l'hypothèse selon laquelle il est possible de se passer des dérivées du second ordre qui sont considérées comme négligeables :

$$\left| \frac{\partial r_i}{\partial \beta_j} \frac{\partial r_i}{\partial \beta_k} \right| \gg \left| r_i \frac{\partial^2 r_i}{\partial \beta_j \partial \beta_k} \right| \Rightarrow H_{j,k} \approx 2 \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial r_i}{\partial \beta_j} \frac{\partial r_i}{\partial \beta_k} \right)$$

A l'inverse la méthode de Newton-Raphson ne considère pas cette approximation et garde l'expression complète de la hessienne :

$$H_{j,k} = 2 \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial r_i}{\partial \beta_j} \frac{\partial r_i}{\partial \beta_k} + r_i \frac{\partial^2 r_i}{\partial \beta_j \partial \beta_k} \right)$$

Ainsi, par définition de $\lambda\beta$ nous avons:

$$\lambda\beta = -\frac{G_j}{H_{j,k}} r \quad \text{avec} \quad r = \sum_{i=1}^n r_i$$

En remplaçant $\lambda\beta$ par $-\frac{G_j}{H_{j,k}}$ dans la relation de récurrence initiale on obtient le schéma

itératif de la méthode de Gauss-Newton :

$$\beta_{s+1} = \beta_s - \frac{G_j}{H_{j,k}} r \quad (6)$$

$$\approx \beta_s - \frac{\sum_{i=1}^n r_i \frac{\partial r_i}{\partial \beta_j}}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial r_i}{\partial \beta_j} \frac{\partial r_i}{\partial \beta_k} \right)} r$$

Concernant la méthode de Newton-Raphson le schéma itératif devient :

$$\beta_{s+1} = \beta_s - \frac{G_j}{H_{j,k}} r \approx \beta_s - \frac{\sum_{i=1}^n r_i \frac{\partial r_i}{\partial \beta_j}}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial r_i}{\partial \beta_j} \frac{\partial r_i}{\partial \beta_k} + r_i \frac{\partial^2 r_i}{\partial \beta_j \partial \beta_k} \right)} r$$

La formule (6), qui représente la méthode générale du schéma itératif est en réalité très intuitive. En effet, la direction est donnée par le gradient et donc par la pente de la tangente en β_t : lorsque la pente est négative on incrémente β_t (voir figure 2-4(a)) et lorsque la pente est positive, on décrémente β_t (voir figure 2-4(b)).

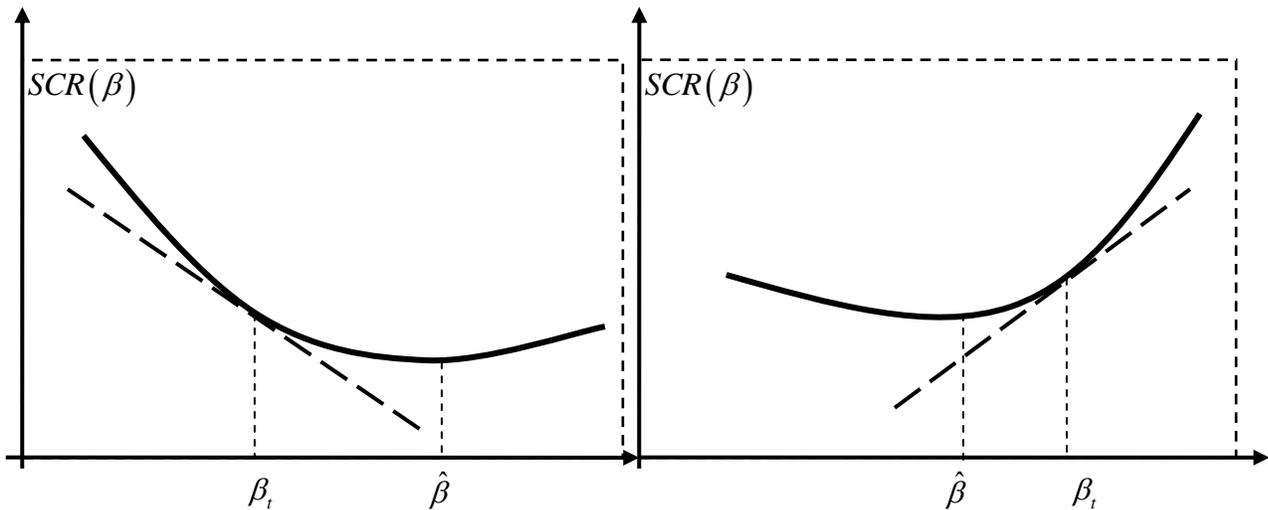


Figure 2- 4 (a) et (b) : La direction des pas suit la tangente.

On remarque que la longueur des pas est inversement proportionnelle à la valeur de la hessienne en β_t : lorsque la courbure est faible le pas est important (voir figure 2-5(a)), lorsque la courbure est élevée la longueur des pas doit être moins importante afin de ne pas dépasser le minimum recherché (voir figure 2-5(b)).

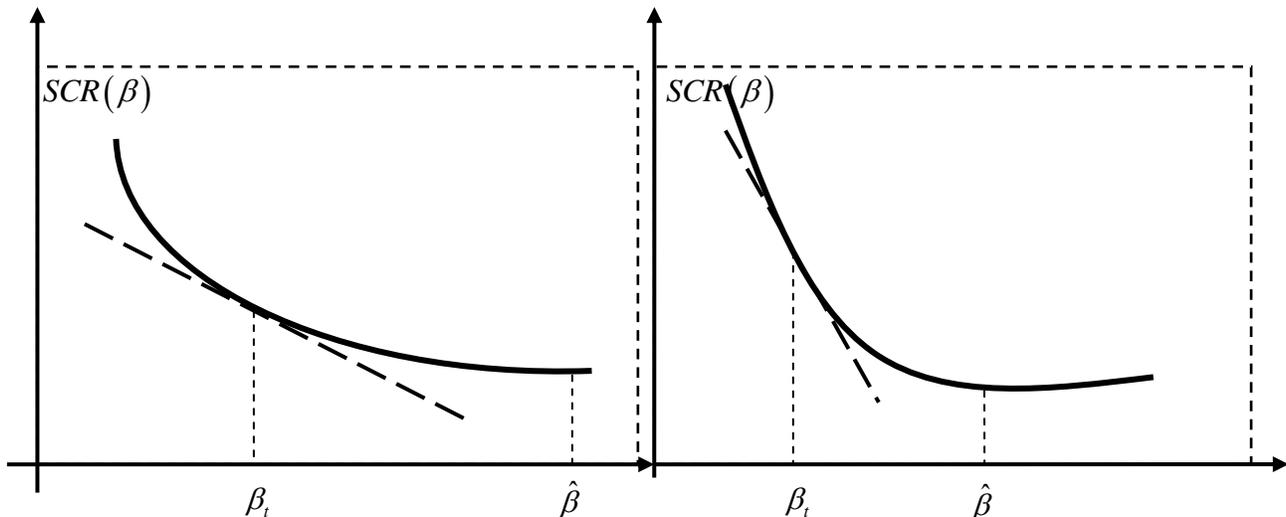


Figure 2- 5 (a) et (b) : La longueur des pas est inversement proportionnelle à la courbure.

L'algorithme de Gauss-Newton a pour propriété de converger en une itération lorsque la fonction objectif à minimiser est quadratique quelle que soit la valeur de départ. Ce résultat est démontré par Train (2002, pp. 192-193).

La formule du schéma itératif (formule (6)) est susceptible de nous guider vers une solution qui ne répond pas au problème posé consistant à trouver le(s) minimum(s) global(aux) de la SCR. Il arrive assez souvent que la solution trouvée soit un minimum local et non global. C'est une question essentielle trop souvent éludée par les modélisateurs ayant usage des algorithmes fournis dans les logiciels de calculs statistiques. Ce problème concerne *l'identifiabilité* du modèle de régression non-linéaire. Cette condition *d'identifiabilité* des paramètres de la régression est fondamentale puisqu'elle garantit l'unicité de la solution au problème de minimisation de la SCR.

2.1.2.2 Identifiabilité des paramètres

Tout problème de recherche d'un minimum global d'une fonction par un algorithme d'optimisation non-linéaire peut se heurter à l'existence d'un, de plusieurs, parfois même d'une infinité de minimum locaux (par exemple pour des fonctions de type sinusoïdales) qui répondent aux conditions d'arrêt du schéma itératif de l'algorithme (voir figure 2-6). Dans ce cas, si les conditions sont réunies pour qu'il soit découvert en premier (proche des paramètres fixés comme conditions initiales et se déplaçant dans sa direction), un minimum local sera exhibé à tort comme la solution du problème de minimisation globale.

Un modèle non linéaire est dit « identifié » par un ensemble d'informations données si, pour cet ensemble de données, il est possible de trouver un $\hat{\beta}$ unique qui minimise la $SCR(\beta)$. Pour garantir l'unicité de la solution $\hat{\beta}$ le modèle de moindres carrés non linéaires doit répondre à

une identification globale qui peut être établie formellement par la condition :

$$SCR(\hat{\beta}) < SCR(\beta^*) \quad \forall, \hat{\beta} \neq \beta^*$$

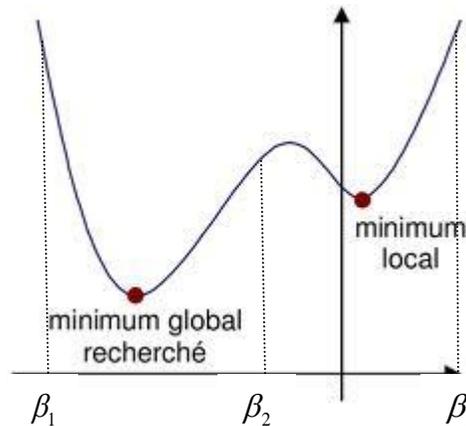


Figure 2- 6 Exemple de fonction SCR admettant un minimum local

L'exemple de la figure 2-6 est un cas symptomatique du problème d'identifiabilité. Pour cet exemple, une des conditions d'identifiabilité qui permet de trouver un $\hat{\beta}$ unique qui minimise la $SCR(\beta)$ est de savoir que la solution appartient à un intervalle bien précis qui va être la cible de nos recherches : $\hat{\beta} \in [\beta_1; \beta_2]$.

La condition d'identifiabilité des paramètres et donc de la zone de recherche du vecteur des paramètres constitue un problème complexe dans la méthode de résolution, même pour les logiciels statistiques les plus avancés sur la question.

Afin de mener à bien les ajustements non linéaires, tout comme pour les ajustements linéaires, il est nécessaire de s'appuyer sur des logiciels de calculs statistiques. La grande majorité des logiciels libres ou payants sont dotés de tels outils d'ajustements. Par exemple, pour ce qui est du logiciel libre , nous pouvons recourir à la fonction `nlm()` qui permet de minimiser une fonction quelconque. Le premier argument que l'on doit obligatoirement renseigner est le nom de la fonction à minimiser, pour ce qui est des ajustements non linéaires il s'agit bien sûr de la somme des carrés des résidus (*scr*). Le second argument à renseigner, lui aussi obligatoire, est le vecteur des conditions initiales (β_0) correspondant à la meilleure approximation possible des paramètres à estimer. Finalement les derniers arguments sont les valeurs x des abscisses et y des ordonnées. Ils sont facultatifs dans la plupart des problèmes de minimisation, sauf dans le cas qui nous concerne celui de la minimisation de la $SCR(\beta)$

Le programme, assez court, est alors donné par le script qui suit :

```
nlm(f = scr,  $\beta_0$ , x=x, yobs=yobs)
```

Un autre exemple est la procédure NLIN du logiciel SAS®. Cette dernière permet d'exécuter, de la même façon, une régression par les moindres carrés non linéaires. C'est la procédure que nous utilisons pour l'ensemble des régressions fournies dans ce mémoire de thèse. Nous pouvons donner un exemple de code, en considérant par exemple un ajustement des taux de motorisation par ménage par le modèle sigmoïdal de [Tanner \(1978\)](#) à seuil de saturation pour lequel les résultats sont fournis dans la section 3.1.2 :

```
proc nlin data=txmotménage method = Raphson;
parameters mu=0.9 beta=20 delta=1;
model vpm = delta/(1+(beta*(t-t0)**(-mu)));
output out=nlinout pred=p lcl=lcl ucl=ucl ;
run;
```

Dans le code considéré, l'option facultative *method* permet de choisir l'algorithme d'optimisation parmi un panel de 6 méthodes. Par défaut l'option choisie est celle de l'algorithme de Gauss-Newton. Pour les raisons de supériorité énoncées précédemment nous préférons utiliser l'algorithme de Newton-Raphson. L'option obligatoire *parameters* fixe les conditions initiales pour chacune des trois variables du modèle lui-même défini après l'instruction *model*. L'option *output* fixe en sortie les valeurs estimées pour tous les paramètres (*nlinout*), les valeurs prédites par le modèle (*pred*) ainsi que les intervalles de confiance de Wald donnés par défaut à 95% (*lcl* pour lower confidence limit et *ucl* pour upper confidence limit).

2.2. Critères quantitatifs sur la qualité de l'ajustement aux données

La méthode des moindres carrés non linéaires est un outil qui permet de fournir un cadre fondé sur des critères quantitatifs pour ajuster et estimer au plus près les paramètres d'un modèle théorique que l'on cherche à tester. Il n'existe cependant aucune norme, aucun cadre formel pour la sélection et l'usage des méthodes visant à évaluer la qualité de l'ajustement des modèles aux données, que l'on passe par une méthode visuelle (graphique) ou numérique (calcul). En conséquence, la question du critère de sélection d'un modèle théorique est essentielle lorsqu'il s'agit d'effectuer un choix parmi un panel de différents modèles. La plupart du temps, on dit du modèle théorique qui représente « au mieux » les données empiriques qu'il offre un meilleur ajustement aux données, c'est-à-dire qu'il présente la SCR la plus faible. Cependant, le critère de la SCR la plus faible n'est pas pertinent puisqu'il ne permet pas de comparer la qualité de plusieurs ajustements menés sur des séries de longueurs différentes.

Il existe pourtant une multitude d'indicateurs numériques et de tests permettant de rendre compte de la qualité de l'ajustement d'un modèle théorique sur des valeurs empiriques. Les plus

communs sont le khi-2 (ou khi carré ou encore χ^2), le coefficient de corrélation (de Pearson) ou encore le coefficient de détermination.

Certains indicateurs numériques permettent de prendre en compte à la fois la qualité de l'ajustement ainsi que la complexité du modèle en pénalisant l'augmentation du nombre de variables et de paramètres du modèle. Dans cette catégorie, on peut notamment citer la statistique de Fisher ou le coefficient de détermination ajusté, mais aussi parmi les critères basés sur le calcul de la vraisemblance le critère d'information d'Akaike (Akaike information criterion ou AIC) [Akaike, 1973 ; Bozdogan, 2000] ou le critère d'information bayésien (Akaike's bayesian information criterion ou BIC) [Akaike, 1973 ; Schwartz, 1978 ; Wasserman, 2000].

2.2.1. Coefficient de corrélation (ou de Pearson) et de détermination

Il existe deux échelles communes permettant d'indiquer l'intensité de la liaison entre deux séries. D'une part le coefficient de Pearson (ou coefficient de corrélation) (R) et d'autre part le coefficient de détermination (R^2). Ces derniers ont des propriétés très semblables.

Le coefficient de corrélation linéaire liant deux séries de même longueur $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ et $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ est donné par la relation suivante :

$$R_p = \frac{\sigma_{x,y}}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}}$$

Le coefficient de corrélation a une valeur comprise entre -1 et 1, mais plus il est proche de 1 et mieux les séries X et Y sont corrélées positivement et à l'inverse plus il est proche de -1 et mieux les séries X et Y sont négativement corrélées. Le coefficient de détermination met en relation la variance expliquée par rapport à la variance totale. Plus ce rapport est proche de 1 et plus l'explicativité du modèle est importante. Si $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ représente la série empirique $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ la série théorique obtenue par ajustement, le coefficient de détermination mesurant la qualité de l'ajustement du modèle théorique sur les valeurs empiriques est donné par :

$$R_d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}$$

Plus la valeur du coefficient de détermination est proche de 1, mieux les séries empiriques et théoriques sont corrélées.

2.2.2. Statistique du khi-2

La statistique du khi-2 se prête généralement à deux types d'exercices, les tests d'indépendance et l'évaluation de la qualité d'un ajustement, c'est cette dernière catégorie qui nous intéresse. En effet, la statistique du khi-2 peut être utilisée comme une mesure descriptive de la qualité d'un ajustement qui permet d'établir si une distribution de fréquence observée diffère d'une distribution théorique. La statistique du khi-2, appliquée à un test de mesure de la qualité d'un ajustement, est calculée en prenant la somme des carrés. La différence entre les valeurs empiriques (observées) et théoriques pour chaque observation divisées par les valeurs théoriques.

Ainsi, la statistique du khi-2 est donnée par :
$$X^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(x_i - y_i)^2}{y_i}$$

Certains travaux critiquent cependant le choix de la statistique du khi-2 comme mesure de la qualité d'un ajustement [Roberts et Pashler, 2000 ; Schunn et Wallach, 2005]. Les raisons de ces critiques sont nombreuses mais les principales tiennent au fait que la statistique du khi-2 ne pénalise pas la complexité du modèle puisque l'on peut augmenter le nombre de variables du modèle tant que la statistique du khi-2 diminue. D'autre part, les déviations du modèle sont exagérément importantes lorsque les mesures sont proches de zéro. Par exemple, un écart dans une mesure de proportion entre 0,02 et 0,01 est traité comme 100 fois plus important que l'écart entre 0,98 et 0,99. En effet :

$$\frac{(0.02 - 0.01)^2}{0.01} = 0,01 \qquad \frac{(0.99 - 0.98)^2}{0.98} \approx 0,0001$$

2.2.3. Statistique de Fisher

La statistique de Fisher permet de comparer la qualité de l'ajustement entre plusieurs modèles théoriques possibles. Si x_i est l'observation empirique, y_i la valeur théorique, n le nombre d'observations et p le nombre de paramètres, la statistique de Fisher (F) est donnée par :

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 * (n - p - k)}{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2 * (p + k)}$$

L'un des principaux avantages de cette statistique, est de permettre une pénalisation sur la complexité du modèle testé. Outre la statistique de Fisher, il existe de nombreux indicateurs pour formaliser le compromis entre la qualité d'un ajustement et la complexité du modèle.

Le coefficient de détermination ajusté permet aussi de tenir compte du nombre de paramètres dans le modèle. Mais l'impact de l'ajout de nouveaux paramètres reste trop peu répercuté dans le coefficient de détermination, c'est l'une des principales critiques adressée à cet indicateur. D'autre part ce n'est pas un véritable carré puisqu'il peut être négatif :

$$R_a^2 = 1 - \frac{N-1}{N-P} \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}$$

Le principal avantage de la statistique de Fisher, par rapport à celle du khi-2 par exemple, est de permettre la comparaison de deux modèles lorsque le modèle le plus compliqué (possédant le plus de paramètres et de variables explicatives) s'ajuste mieux (possède la SCR la plus faible) aux données que le modèle plus simple (possédant moins de paramètres et de variables explicatives). D'autre part, l'une des principales faiblesses du coefficient de détermination est sa tendance à croître artificiellement avec l'ajout de nouvelles variables au modèle. C'est principalement cet effet que permet de prendre en compte la statistique de Fisher. Celle-ci permet de savoir pour un modèle particulier si une baisse éventuelle de la SCR engendrée par l'ajout d'une variable supplémentaire justifie l'intégration de cette nouvelle variable dans le modèle.

La statistique de Fisher part de l'idée simple qu'il est équivalent d'intégrer ou de ne pas intégrer une nouvelle variable explicative dans un modèle donné si la croissance relative de la SCR est égale à la croissance relative en degrés de liberté du modèle. Tant que la décroissance relative de la SCR est plus importante que celle induite par l'ajout d'une variable supplémentaire au modèle, il est utile d'ajouter une variable explicative supplémentaire. Dès que la croissance relative du nombre de variables (aussi appelée croissance du degré de liberté) devient supérieure au niveau de la décroissance de la SCR il n'est plus utile d'ajouter de variable. Ceci peut se résumer ainsi : si deux modèles sont équivalents en qualité d'ajustement on préfère utiliser le plus simple.

Il existe de nombreuses méthodes qui introduisent une composante de pénalité sur la complexité d'un modèle [Grünwald, 2001 ; Myung, 2000]. Beaucoup de ces solutions sont relativement complexes et parfois applicables avec certaines restrictions, c'est pourquoi nous n'entrerons pas plus dans le détail de ces dernières.

La statistique de Fisher nous permet de créer une frontière entre explicativité et parcimonie d'un modèle, ce que ne permet pas le coefficient de détermination (R^2) qui a tendance à croître artificiellement avec l'ajout de nouvelles variables au modèle.

2.2.4. Tests retenus

La statistique de Fisher est un indicateur qui permet de comparer la qualité de différents ajustements effectués sur des formes fonctionnelles ayant des nombres de paramètres, de variables et un nombre d'observations différent. Ainsi pour chaque ajustement, nous privilégierons le choix de la forme fonctionnelle selon le critère de la statistique de Fisher (qui doit être la plus élevée possible) et la valeur du coefficient de détermination (R^2 qui doit être proche de 1). Rappelons que par définition les deux critères retenus sont en accord l'un avec l'autre sur la qualité de la modélisation lorsque les modèles comparés ont le même nombre d'observations, paramètres et variables.

Dans la section 3 nous abordons la question du choix de la forme fonctionnelle du niveau de motorisation par individu et ménage. Nous présentons et discutons les résultats obtenus à partir d'un ajustement non-linéaire de quatre fonctions sigmoïdales sur les taux de motorisation par ménage puis par individu à partir de l'algorithme de Newton-Raphson.

Une fois la meilleure des quatre formes fonctionnelles identifiée (tableau 2-1), elle sera sélectionnée puis adoptée selon des critères basés sur la qualité de l'ajustement global des taux de motorisation des ménages et des individus. Nous lui intégrons ensuite quelques variables macro-économiques (PIB, salaire brut etc..) sous condition que ces dernières améliorent la qualité de l'ajustement global et qu'elles répondent aux conditions de stationnarité. Cette dernière étape nous permettra de déterminer les variables clefs à l'origine de la hausse des taux de motorisation français.

3 Résultats des ajustements

Cette section est dédiée à la présentation et aux comparaisons des résultats d'ajustements opérés sur les taux de motorisation par ménage et individu (de 19 ans et plus) observés. Les résultats²⁹ issus des ajustements des différentes lois de croissance agrégées sont globalement bons. Les coefficients de détermination qui sont tous supérieurs à 0,999 montrent que les observations se conforment extrêmement bien à des spécifications de lois sigmoïdales dotées de points d'inflexions (voir tableaux 2-2 et 2-3). On note pourtant une légère différence de qualité d'ajustement entre deux catégories de modèles. En effet, les modèles logistiques et Gompertz sont assez rigides sur la position (l'ordonnée) du point d'inflexion. Ce n'est pas le cas pour les modèles Tanner et Von Bertalanffy qui offrent globalement une meilleure qualité d'ajustement aux données, ceci pouvant s'expliquer par une position du point d'inflexion en abscisse et en ordonnée qui est entièrement dépendante des paramètres pour ces derniers. Par conséquent, nous proposons une grille de lecture et d'interprétation des résultats qui sépare ces deux catégories de modèles par sous-sections. D'autre part, le critère de la statistique de Fisher est retenu comme le seul critère de qualité d'ajustement et de sélection du ou des modèles prédictifs des niveaux de motorisation, bien que le coefficient de détermination (R^2) soit systématiquement fourni pour les lecteurs habitués à cette échelle plus classique.

| Paramètres des lois³⁰ | It | Nb.Obs | Alpha (α) | Beta (β) | Seuil de Saturation | Intervalle de confiance de Alpha(α) à 95% | Intervalle de confiance de Beta(β) à 95% | Intervalle de confiance de S à 95% | R ² | Fisher |
|---|----|--------|--------------------|------------------|---------------------|--|--|------------------------------------|----------------|--------|
| Loi logistique | 9 | 47 | 2,0555 | 0,1204 | 1,1366 | [1,9331 ; 2,1779] | [0,1133 ; 0,1275] | [1,1233 ; 1,1499] | 0,99957 | 34747 |
| Gompertz | 12 | 47 | -3,5993 | 0,0910 | 1,1591 | [-3,8685 ; -3,3300] | [0,0866 ; 0,0955] | [1,1469 ; 1,1713] | 0,99976 | 61858 |
| Tanner | 16 | 47 | 3227,2 | 2,6193 | 1,2267 | [2121,7 ; 4332,8] | [2,5012 ; 2,7373] | [1,2082 ; 1,2451] | 0,99982 | 83781 |
| Von Bertalanffy | 7 | 47 | 2,5695 | 0,0794 | 1,1731 | [0,0747 ; 0,0842] | [2,3379 ; 2,8011] | [1,1595 ; 1,1867] | 0,99980 | 73236 |

Tableau 2- 2 Résultats des ajustements pour les taux de motorisation par ménage

²⁹ L'ensemble des paramètres estimés sont fournis avec une précision à 10^{-4} près afin de permettre au lecteur de retrouver les résultats des taux de motorisation à 10^{-2} parfois à 10^{-3} près. En règle générale et quel que soit le chapitre, chaque résultat sera présenté avec un maximum de précision significative afin de permettre au lecteur de retrouver au plus près chaque résultat et de pouvoir réutiliser chaque paramètre pour ses propres calculs.

³⁰ Le nombre d'itérations de l'algorithme de Newton-Raphson est donné en première colonne (It), le nombre d'observations est donné dans la deuxième colonne (Nb.Obs), le seuil de saturation est lui fourni dans la quatrième colonne.

| Paramètres des lois | It | Nb. Obs | Alpha (α) | Beta (β) | Seuil de Saturation | Intervalle de confiance de Alpha(α) à 95% | Intervalle de confiance de Beta(β) à 95% | Intervalle de confiance de S à 95% | R ² | Fisher |
|------------------------|----|---------|--------------------|------------------|---------------------|--|--|------------------------------------|----------------|--------|
| Loi logistique | 10 | 55 | 2,6572 | 0,1046 | 0,6476 | [2,4802 ; 2,8341] | [0,0979 ; 0,1114] | [0,6363 ; 0,6588] | 0,99899 | 17190 |
| Gompertz | 8 | 55 | -3,2632 | 0,0716 | 0,6744 | [-3,4550 ; -3,0715] | [0,0680 ; 0,0753] | [0,6638 ; 0,6850] | 0,99953 | 36122 |
| Tanner | 12 | 55 | 1278,2 | 2,1768 | 0,7525 | [909,8 ; 1646,6] | [2,0734 ; 2,2802] | [0,7329 ; 0,7721] | 0,99965 | 50302 |
| Von Bertalanffy | 5 | 55 | 1,9485 | 0,0544 | 0,7022 | [1,7935 ; 2,1035] | [0,0503 ; 0,0585] | [0,6875 ; 0,7169] | 0,99962 | 44490 |

Tableau 2- 3 Résultats des ajustements pour les taux de motorisation par individus de 19 ans et plus

Les intervalles de confiance de nos ajustements sont calculés à l'aide de la formule de Wald :

$$\hat{n}_i \pm \sigma_i * St\left(n - p, 1 - \frac{\alpha}{2}\right) \text{ où } \hat{n}_i \text{ représente la valeur estimée, } \sigma_i \text{ l'écart-type, } St \text{ la loi de student,}$$

n le nombre d'observations (55), p le nombre de paramètres (3) et puisque nous donnons des intervalles de confiance à 95% nous prenons $\alpha = 0,05$.

3.1. Modélisation des taux de motorisation par ménage

3.1.1 Modèles logistique et Gompertz

L'usage des modèles logistique et Gompertz pour l'ajustement des taux de motorisation par ménage donne des résultats relativement satisfaisants. On peut noter que le modèle de Gompertz s'ajuste mieux avec une statistique de Fisher (F-Stat) égale à 61 858, contre 34 747 pour le modèle logistique (voir tableau 2-2) et un coefficient de détermination égal à 0,9995 (voir tableau 2-2) ($R^2=0,9990$ pour le modèle logistique). Le gain de qualité à l'ajustement du modèle Gompertz réside sans doute dans le positionnement du point d'inflexion qui n'a plus la contrainte d'être le centre de symétrie de la courbe comme dans le cas du modèle logistique. Le point d'inflexion est observé en 1961 pour le modèle logistique et quelques années plus tard en 1969 pour le modèle Gompertz. Ceci démontre que l'année à laquelle se produit le fléchissement de la motorisation des ménages est nettement anticipée avec un modèle logistique.

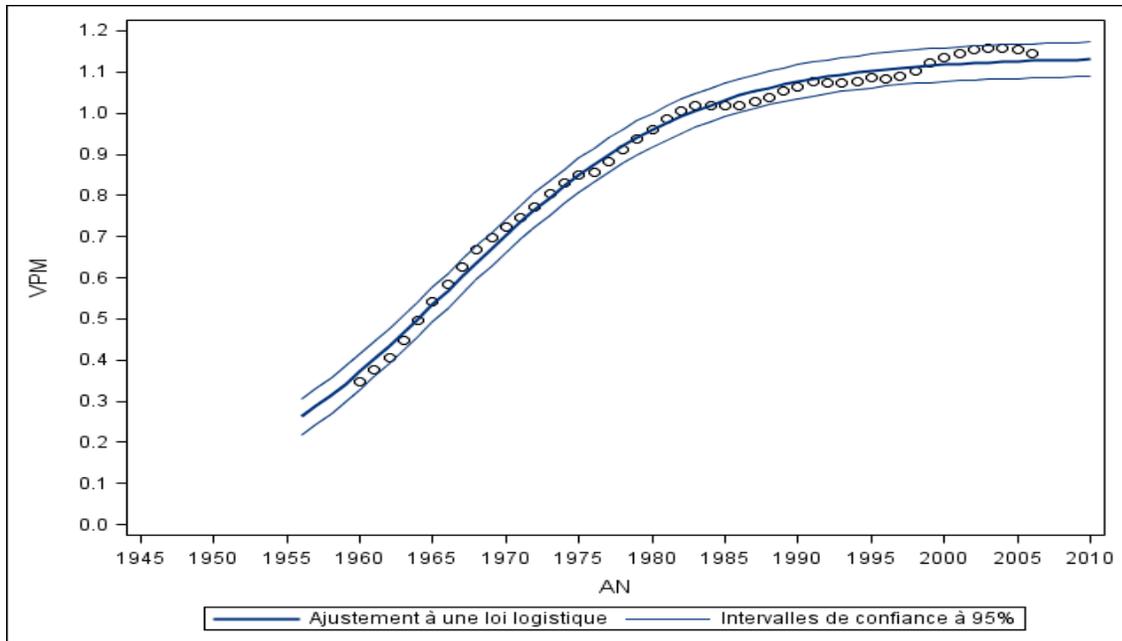


Figure 2- 7 Ajustement du taux de motorisation par ménage par une loi logistique

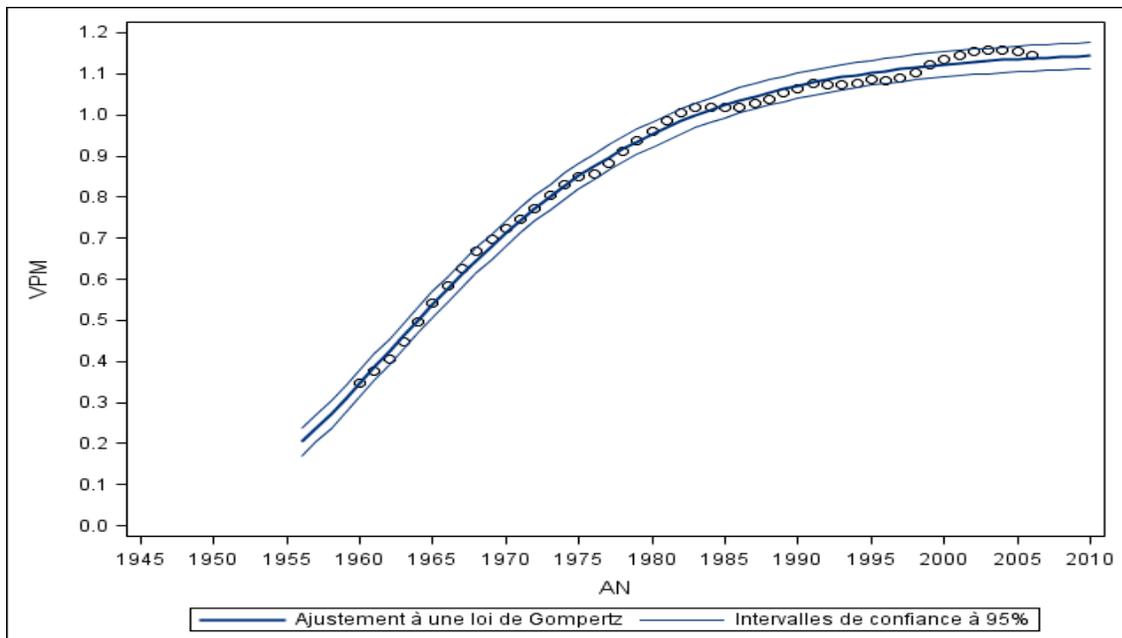


Figure 2- 8 Ajustement du taux de motorisation par ménage par une loi de Gompertz

Le calibrage du modèle logistique exhibe un niveau de saturation de l'équipement estimé à environ 1,137 véhicule par ménage. Ce seuil de saturation est pratiquement atteint dès l'année 2030, pour un taux de croissance du parc qui fléchit fortement au-delà de cette date. Le seuil de saturation du modèle Gompertz, plus important, s'élève à 1,159 véhicule par ménage. Ce seuil de saturation est atteint moins rapidement que dans le cas du modèle logistique, néanmoins dès 2050 (1,1482 veh/mén) le taux de motorisation estimé s'approche fortement du seuil (1,1484 veh/mén).

3.1.2 Modèles Tanner et Von Bertalanffy

Au regard des critères retenus, la qualité des ajustements obtenus à partir des modèles de Tanner et Von Bertalanffy sont supérieurs à ceux des modèles logistique et Gompertz. Le coefficient de détermination est sensiblement égal 0.9998 pour les deux modèles et la statistique de Fisher s'élève à 83 781 pour le modèle de Tanner et 73 236 pour le modèle de Von Bertalanffy. Le point d'inflexion se situe en 1975 pour le modèle Tanner et en 1977 pour le modèle Von Bertalanffy. On note que le fléchissement de la motorisation des ménages intervient dans la période entre les chocs pétroliers de 1973 et 1979.

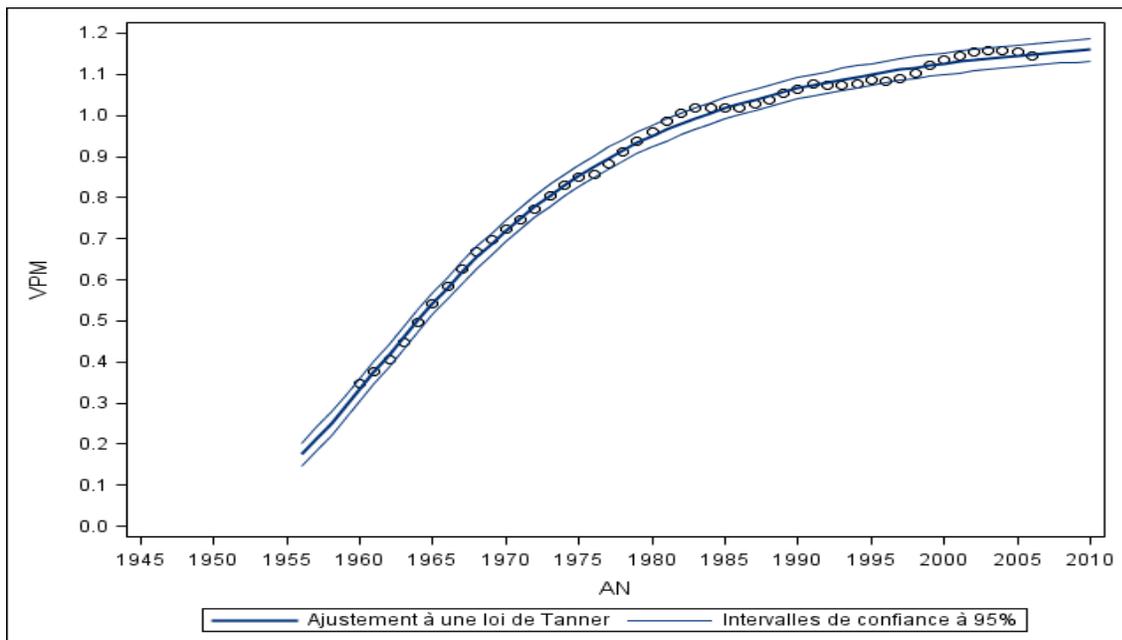


Figure 2- 9 Ajustement du taux de motorisation par ménage par une loi de Tanner

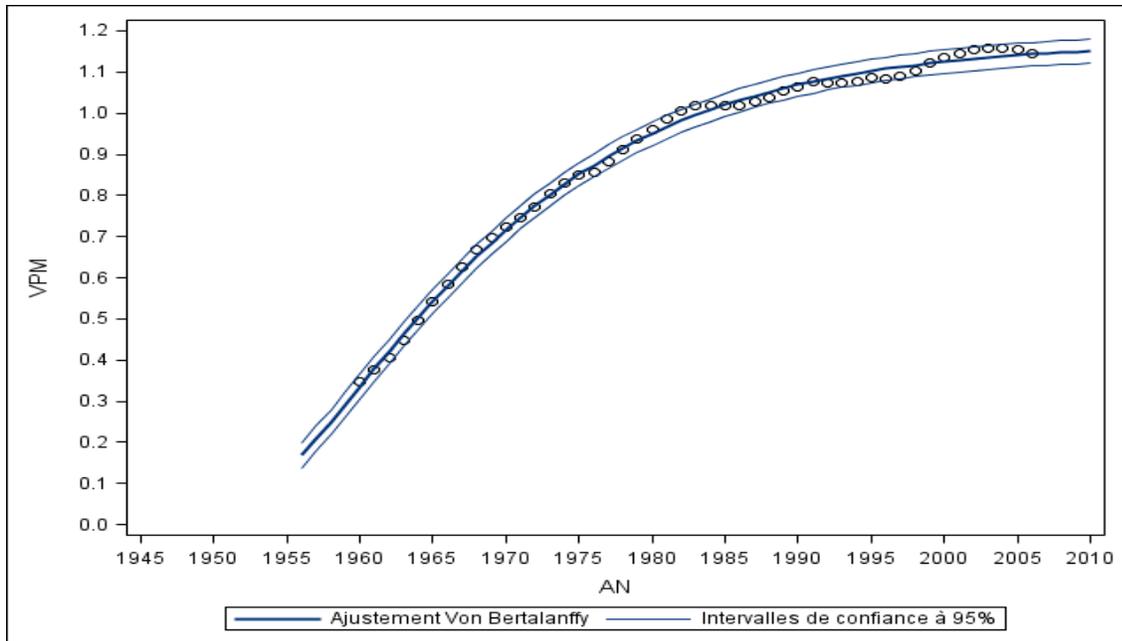


Figure 2- 10 Ajustement du taux de motorisation par ménage par une loi de Von Bertalanffy

Le seuil de saturation, correspondant à la valeur théorique du taux de motorisation lorsque l'on fait tendre le temps vers l'infini dans chaque modèle, s'élève respectivement à 1,23 et 1,17 véhicule par ménage pour le modèle de Tanner et Von Bertalanffy. Concernant les prévisions à moyen terme, le modèle de Tanner prévoit 1,18 véhicule par ménage en 2020. Pour le même horizon, le modèle Von Bertalanffy prédit 1,16 véhicule par ménage.

3.1.3 Projections des taux de motorisations par ménage

Bien que les quatre modèles de croissance soient tous spécifiés à l'aide de lois sigmoïdales, les résultats prédictifs de ces derniers restent assez hétérogènes, les résultats montrent que le premier couple de modèles (logistique et Gompertz) prédit des niveaux de motorisation inférieurs à ceux du second couple (Tanner et Von Bertalanffy). Ceci montre que les lois logistique et Gompertz ont tendance à sous-estimer les taux de motorisation si l'on considère que les modèles qui s'ajustent le mieux à nos données permettent d'effectuer les projections les plus proches des observations passées. Les résultats des projections synthétisées sur le tableau 2-4 montrent que le modèle Tanner, qui offre la meilleure qualité d'ajustement, estime un taux de motorisation par ménage de 1,17 en 2015 et de 1,18 en 2020 ce qui est largement supérieur aux résultats obtenus par les autres modèles testés.

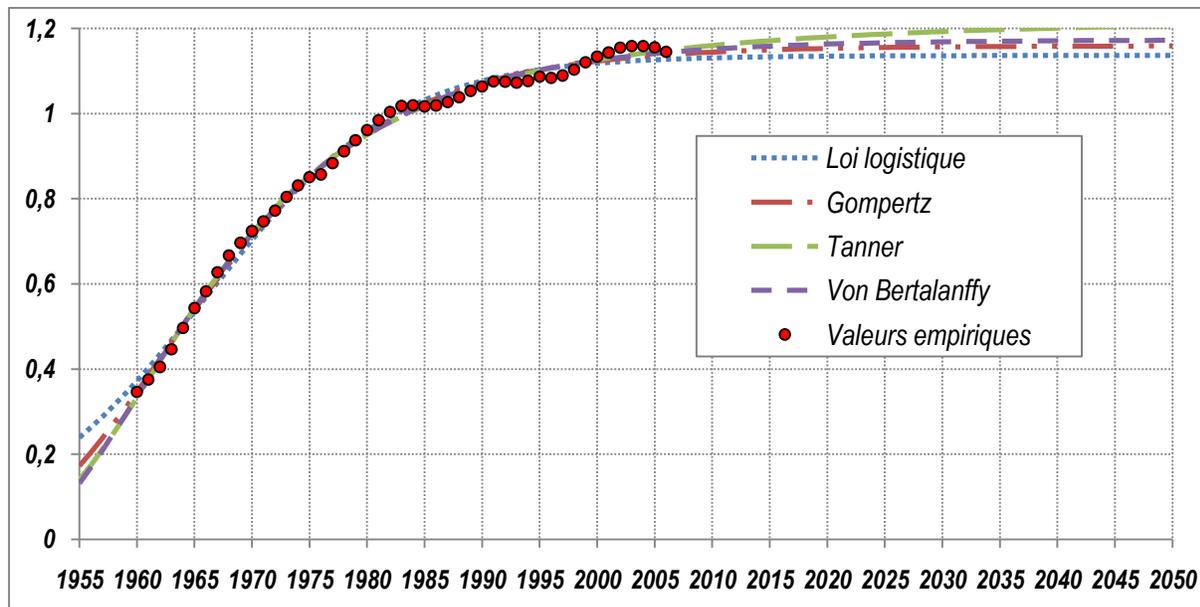


Figure 2- 11 Ajustements des taux de motorisation par ménage et projection à 2050

| Années | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2050 | Seuil |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Loi logistique | 1,1335 | 1,1349 | 1,1357 | 1,1361 | 1,1363 | 1,1364 | 1,1366 | 1,1366 |
| Gompertz | 1,1498 | 1,1532 | 1,1553 | 1,1567 | 1,1576 | 1,1581 | 1,1587 | 1,1591 |
| Tanner | 1,1712 | 1,1800 | 1,1870 | 1,1927 | 1,1973 | 1,2011 | 1,2074 | 1,2267 |
| Von Bertalanffy | 1,1584 | 1,1632 | 1,1664 | 1,1686 | 1,1701 | 1,1711 | 1,1722 | 1,1731 |

Tableau 2- 4 Projections à moyen et long terme des taux de motorisation par ménage

3.2. Modélisation des taux de motorisation par individu

Comme pour les taux de motorisation des ménages, les résultats issus des ajustements par les modèles de Tanner et Von Bertalanffy sont bien meilleurs que ceux obtenus par les lois logistique et Gompertz. D'autre part, les modèles de Tanner et Von Bertalanffy peuvent être considérés comme équivalents en termes de qualité d'ajustement même si la statistique de Fisher est très légèrement à l'avantage du premier (50 302 contre 44 490). En outre, bien que possédant tous deux des spécifications très distinctes, il est assez difficile de les distinguer visuellement sur un graphique (voir figure 2-11).

3.2.1 Modèles logistique et Gompertz

Les résultats obtenus par des ajustements sur les taux de motorisation par les lois logistique et Gompertz semblent satisfaisants principalement parce que ces modèles prennent en compte le caractère sigmoïdal de la courbe représentant les taux de motorisation des individus. La qualité de l'ajustement aux données est exhibée par une statistique de Fisher (F-Stat=17 190 pour le modèle logistique et F-Stat=36 122 pour le modèle Gompertz) et donne un léger avantage au modèle Gompertz. Les points d'inflexion se situent

respectivement en 1965 pour le modèle logistique et en 1973 pour le modèle Gompertz montrant ainsi très tôt le fléchissement de la motorisation individuelle.

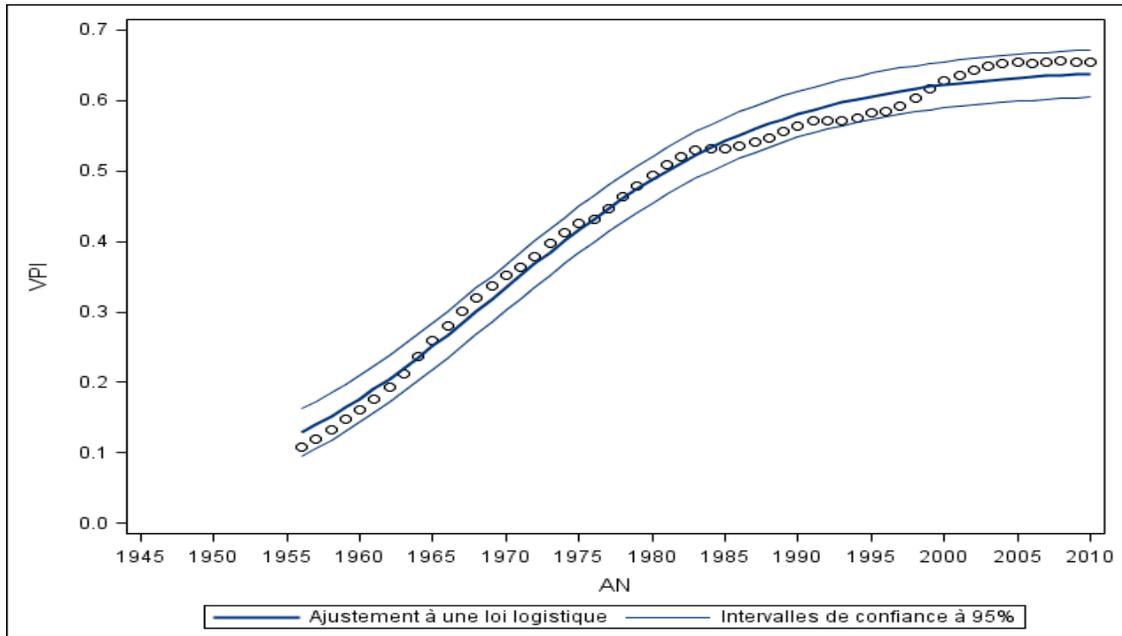


Figure 2- 12 Ajustement des taux de motorisation par individu de 19 ans et plus en France par une loi logistique

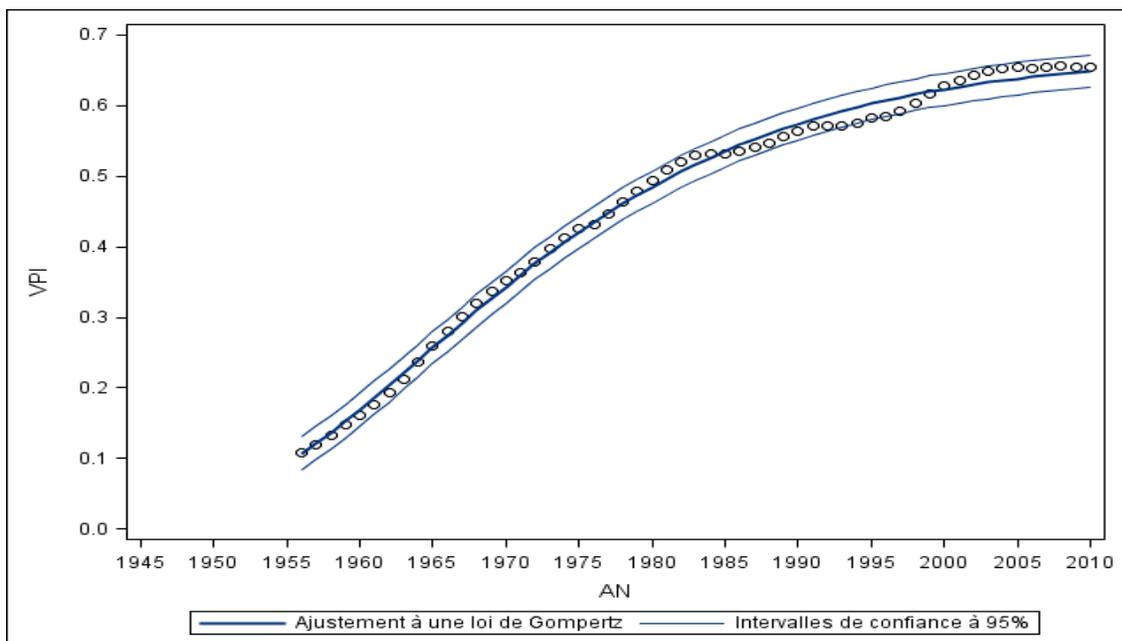


Figure 2- 13 Ajustement des taux de motorisation par individu de 19 ans et plus en France par une loi de Gompertz

Les seuils de saturation estimés par les modèles logistique ($R^2=0.9990$, F-Stat=17 190) et Gompertz ($R^2=0.9995$, F-Stat=36 122) sont respectivement estimés à 0,65 et 0,67 véhicule

par individu de 19 ans et plus. En 2020 le modèle logistique estime le taux de motorisation à 0,64 veh/ménage, pour la même année le modèle Gompertz prévoit 0,65 véh/ménage.

3.2.2 Modèles Tanner et Von Bertalanffy

L'analyse des évolutions passées de la motorisation met en évidence l'asymétrie de la croissance réelle bien représentée par les spécifications théoriques des modèles de Tanner et de Von Bertalanffy. Ces deux modèles semblent par ailleurs adaptés à la modélisation de courbes de croissance de taux de motorisation en forme de sigmoïde. Les gains en termes d'ajustement sur le couple formé par les modèles logistique et Gompertz s'expliquent sans nul doute par leur capacité, de part leur spécification, à permettre une grande liberté sur la position du point d'inflexion. Pour ces modèles la position des points d'inflexion, situés en 1975 pour le modèle de Tanner et en 1978 pour le modèle de Von Bertalanffy montrent que l'évolution historique de l'équipement des individus en âge de conduire ralentit sa croissance dès la fin des années 70 et plus précisément dans la période qui sépare les deux premiers³¹ chocs pétroliers de 1973 et 1979. Durant cette période, d'importantes fluctuations de la demande de véhicules neufs autour d'une tendance haussière pouvait être un élément annonciateur d'une phase transitoire ou l'on passait d'une croissance marginale à la décroissance marginale du taux de motorisation par ménage (ou par individu). Toutefois, après ce ralentissement, la croissance de la motorisation restera soutenue jusque dans les années 2000.

³¹2008 est reconnue comme l'année du 3^e choc pétrolier, le baril ayant atteint un pic à 147 dollars suite à une envolée surprise des prix du pétrole.

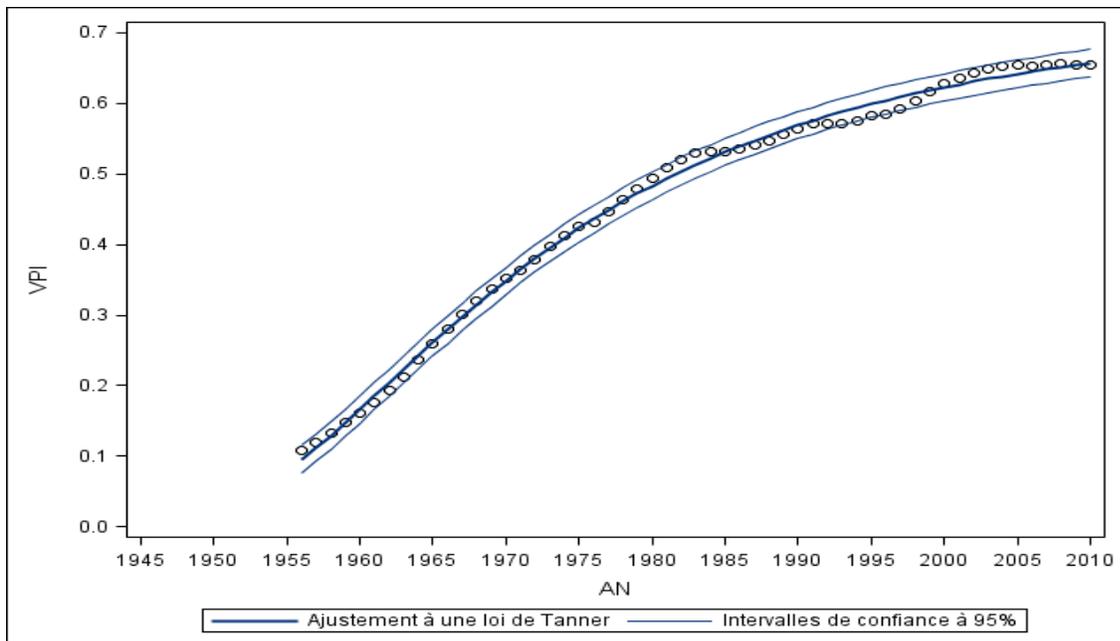


Figure 2- 14 Ajustement des taux de motorisation par individu de 19 ans et plus en France par une loi de Tanner

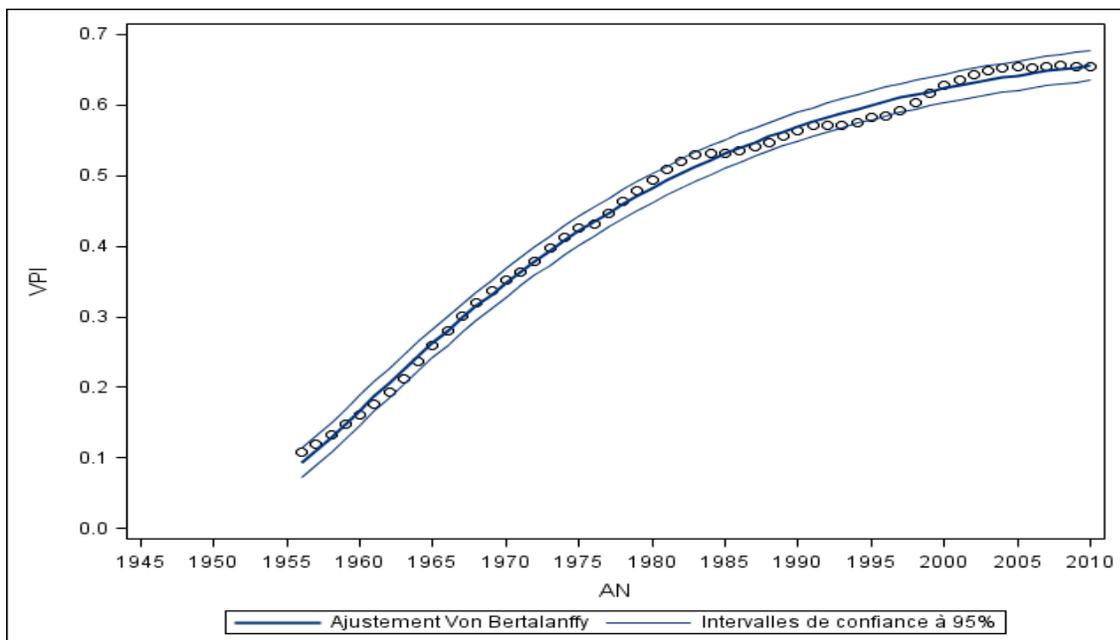


Figure 2- 15 Ajustement des taux de motorisation par individu de 19 ans et plus en France par une loi de Von Bertalanffy

Les seuils de saturation, relativement différents pour les deux modèles, sont estimés à 0,75 veh/individu pour le modèle Tanner et 0,70 veh/individu pour le modèle Von Bertalanffy. Pour autant, on ne doit pas perdre de vue la définition mathématique de ce seuil de saturation qui correspond à la situation théorique ou le temps tend vers l'infini, situation qui

ne se présente jamais dans la réalité. Par exemple, si l'on regarde le niveau de prévision pour 2020, les modèles de Tanner et Von Bertalanffy estiment des taux de motorisation très proches et sensiblement égaux à 0,68 véh/individu de 19 ans et plus. A l'horizon 2050, les modèles de Tanner et Von Bertalanffy estiment des niveaux de motorisation par individus assez différents puisqu'ils sont respectivement estimés à 0,72 et 0,70 véh/individu (voir tableau 2-5).

3.2.3 Projections des taux de motorisation par individu de 19 ans et plus

Les remarques que nous pouvons formuler concernant la qualité d'ajustement des quatre modèles théoriques aux taux de motorisation par individu sont assez similaires à celles qui ont été faites pour les ajustements sur taux de motorisation par ménage. Le modèle Tanner, qui offre la meilleure qualité d'ajustement, estime un taux de motorisation par individu de 19 ans et plus de 0,67 en 2015 et de 0,68 en 2020 (voir tableau 2-5).

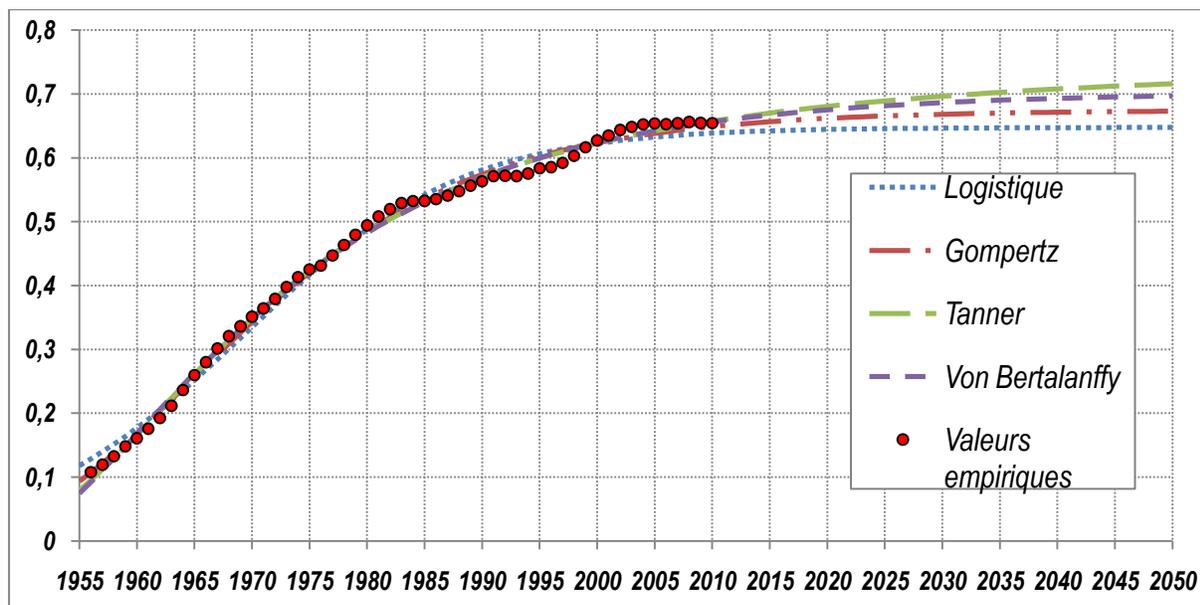


Figure 2- 16 Prévisions des niveaux de motorisation par individus et projection à 2050

| Années | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2050 | Seuil |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Loi logistique | 0,6422 | 0,6444 | 0,6457 | 0,6465 | 0,6469 | 0,6472 | 0,6475 | 0,6476 |
| Gompertz | 0,6565 | 0,6618 | 0,6656 | 0,6682 | 0,6701 | 0,6714 | 0,6729 | 0,6744 |
| Tanner | 0,6700 | 0,6804 | 0,6891 | 0,6963 | 0,7025 | 0,7077 | 0,7160 | 0,7525 |
| Von Bertalanffy | 0,6669 | 0,6752 | 0,6816 | 0,6865 | 0,6902 | 0,6931 | 0,6969 | 0,7022 |

Tableau 2- 5 Projections à moyen et long terme des taux de motorisation par individus

3.2.4. Ajustements sur données antérieures à 2001

Nous savons que les statistiques de volume du parc automobile sont issues pour partie du comptage des ventes de vignettes pour la période antérieure à 2001 et pour partie d'estimations effectuées annuellement par le CCFA basées sur des lois de survies depuis 2001. Il est donc utile de mener des prédictions pour la période 2001 à 2010 à partir d'un nouvel ajustement de la loi de Tanner sur la sous-période pré-2001 (1956 à 2001) afin de les comparer avec les statistiques du CCFA. L'objectif de cet exercice est de quantifier et expliquer un éventuel écart entre les résultats du modèle et les séries statistiques de parc du CCFA. Dans le même élan, nous comparons l'ajustement des taux de motorisation des ménages et des individus par une loi de Tanner effectué sur l'ensemble des données (jusqu'en 2010) avec celui effectué uniquement sur des données antérieures à 2001.

| Ajustement de lois | Nb. Obs. | Alpha (α) | Beta (β) | S | Intervalle de confiance de Alpha(α) à 95% | Intervalle de confiance de Beta(β) à 95% | Intervalle de confiance de S à 95% | R ² | Fisher |
|---------------------------|----------|--------------------|------------------|--------|--|--|------------------------------------|----------------|--------|
| <i>Ménages Tanner</i> | 42 | 3982,2 | 2,6984 | 1.2085 | [2,5750 ; 2,8217] | [2572,4 ; 5392,1] | [1,1889 ; 1,2281] | 0,9998 | 82469 |
| <i>Individus Tanner</i> | 42 | 1703,0 | 2,2975 | 0.7189 | [2,1818 ; 2,4131] | [1168,5 ; 2237,6] | [0,6973 ; 0,7404] | 0,9995 | 44248 |

Tableau 2- 6 Résultats des ajustements pour les taux de motorisation par individus et ménages sur données antérieures à 2001

Les estimations de taux de motorisation par ménage ou individu obtenues par ajustement sur données antérieures à 2001 sont inférieures à celles obtenues par ajustement sur la série complète (1956 à 2010 pour les individus et 1960 à 2006 pour les ménages). Ces dernières sont elles-mêmes inférieures aux données empiriques exprimées, rappelons le, comme des rapports de parc CCFA et de population INSEE (ménages ou individus) (voir tableau 2-7).

En effectuant un ajustement à l'aide d'une loi de Tanner sur données antérieures à 2001, nous obtenons des seuils de saturation estimés à 1,21 [1,19 ; 1,23] véh/ménage et 0,72 [0,70 ; 0,74] véh/individus de 19 ans et plus (voir tableau 2-7). Ces résultats sont légèrement inférieurs à ceux tirés de l'ajustement effectué sur la série complète (jusqu'en 2010) qui donnait 1,23 [1,21 ; 1,25] veh/ménage et 0,75 [0,73 ; 0,77] véh/individus de 19 ans et plus (voir tableau 2-7).

Le parc estimé au 1^{er} janvier 2010 par le modèle Tanner sur taux de motorisation individuels, s'élève à 31 004 milliers de véhicules particuliers ce qui est relativement proche du volume du parc estimé par le CCFA à 31 050 milliers de véhicules. En estimant le parc à 30 553 milliers de véhicules particuliers, le modèle Tanner ajusté sur les données antérieures à 2001 sous-estime le parc d'environ 500 milliers d'unités (voir tableau 2-7).

En outre, le parc estimé par le modèle de Tanner ajusté sur des taux de motorisation par ménage offre de moins bonnes estimations que le modèle estimé sur taux de motorisation

individuels. En effet, avec 30 500 et 30 234 milliers de véhicules estimés au 1^{er} janvier 2010 en utilisant respectivement les résultats du modèle Tanner sur la série complète et sur la série pré-2001, les écarts avec le parc du CCFA sont relativement importants. En effet, ces écarts sont estimés à 500 milliers d'unités pour le modèle ajusté sur données complètes et à 800 milliers d'unités pour le modèle ajusté sur la série pré-2001 (voir tableau 2-7).

| Catégorie | Ajustement de lois | Taux de motorisation | | | Population ³² (milliers de ménages ou d'individus de 19 ans et plus) | | | Parc Automobile (milliers de véhicules) | | |
|-----------|--------------------|----------------------|--------|--------|---|--------|--------|---|--------|--------|
| | | 2005 | 2010 | 2020 | 2005 | 2010 | 2020 | 2005 | 2010 | 2020 |
| Individus | Tanner pré 2001 | 0,6307 | 0,6439 | 0,6633 | | | | 28 834 | 30 553 | 32 889 |
| | Tanner | 0,6419 | 0,6574 | 0,6804 | 45 587 | 47 163 | 49 583 | 29 262 | 31 004 | 33 736 |
| | Observé | 0,6540 | 0,6544 | n.c. | | | | 29 900 | 31 050 | n.c. |
| Ménages | Tanner pré 2001 | 1,1365 | 1,1498 | 1,1680 | | | | 29 401 | 30 234 | 32 710 |
| | Tanner | 1,1454 | 1,1599 | 1,1800 | 25 871 | 26 295 | 28 006 | 29 632 | 30 500 | 33 047 |
| | Observé | 1,1557 | n.c. | n.c. | | | | 29 900 | 31 050 | n.c. |

Tableau 2- 7 Comparaison des estimations de taux de motorisation par ménages des modèles Tanner ajustés sur les données de périodes différentes (pré 2001 : 1956 à 2001 et complète 1956 à 2010)

3.3. Modèles de croissance agrégés de la motorisation avec variables exogènes

Le modèle de Tanner avec coefficient d'asymétrie (β) est selon les critères retenus (coefficient de détermination et statistique de Fisher) le modèle théorique qui représente le mieux les valeurs passées des niveaux d'équipement automobile des ménages et des individus de 19 ans et plus. Nous utilisons la spécification de Tanner, afin de tester l'introduction dans le modèle de variables explicatives. Seules seront retenues les variables exogènes les plus significatives pour expliquer les variations conjoncturelles de la motorisation dépendant elle-même de la demande de véhicules neufs ainsi que du déclassement des véhicules anciens.

Les modèles paramétriques agrégés n'ont par définition aucun pouvoir explicatif concernant les variations conjoncturelles des taux de motorisation annuels. La compréhension de ces variations est pourtant essentielle car elles sont pour partie liées à la connaissance des

³² Issues pour 2020 des projections de populations INSEE, [Robert-Bobée, 2006] pour les individus de 19 ans et plus et du scénario I du modèle Omphale [Dekneudt et al., 2003] pour le nombre de ménages.

déterminants économiques et historiques de la demande automobile. Pour rendre compte de ces variations conjoncturelles il est nécessaire d'introduire dans le modèle sélectionné des variables qui ont pu jouer un rôle dans l'évolution et la variation des taux de motorisation. Pour ce faire, la spécification retenue sera celle de [Button et al. \(1982\)](#) qui est proche de celle de [Tanner \(1978\)](#) :

$$T_t = \frac{S}{1 + e^{\left[-\prod_{i=1}^n Y_i\right]} + \alpha \cdot \left[\left(\prod_{i=1}^n X_i\right)^\gamma\right]} \cdot t^{-\beta}$$

où X_i et Y_i représentent les variables explicatives, t le temps, β le coefficient d'asymétrie.

Afin d'isoler et de discriminer les déterminants économiques de l'évolution historique de la motorisation individuelle à l'échelle nationale depuis 1956 nous décidons d'injecter au modèle quelques séries annuelles longues Insee. Mais l'objectif de cet exercice n'est valable que si certaines variables permettent d'améliorer la qualité de l'ajustement global du modèle c'est à dire d'augmenter son explicativité au regard du critère de Fisher.

[Tanner \(1978\)](#) avait inclus des variables de revenu et de coûts de motorisation. [Hirota \(2007\)](#) teste notamment la corrélation du PIB et du nombre de permis. Nous décidons ainsi de tester quelques séries macroéconomiques annuelles longues (1946 à 2010) issues des comptes nationaux de l'Insee telles que le PIB par tête (PIBT), le PIB (PIB) et certaines de ses composantes à prix courant telles que :

- les dépenses de consommation finale (DCF)
- la demande intérieure hors stocks (DIHS)
- la formation brute de capital fixe (FBCF)

Ces séries macroéconomiques ont pour objectif d'expliquer les variations structurelles des comportements de motorisation des ménages après la seconde guerre mondiale. La croissance du PIB explique notamment la capacité de l'industrie automobile française à produire des véhicules en masse et à bas coût entraînant une accélération de la motorisation des ménages. D'autre part, nous introduisons deux variables ayant trait directement au pouvoir d'achat des ménages français:

- l'indice d'évolution du salaire moyen net³³ (indice Insee annuel de 1951 à 2008 en base 100 en 1951). (ISM)
- l'indice de prix des automobiles (indice annuel de 1963 à 1983 de base 100 en 1970 issu de l'indice des prix des 295 postes Insee). (IPA)³⁴

Ces variables sont introduites dans le but de mettre en lien les variations conjoncturelles des taux de motorisation avec celles du pouvoir d'achat. L'ajout de variables explicatives nous expose à certaines difficultés liées à une combinaison élevée d'ajustements rendue possible par le nombre important de séries et des problèmes de multicollinéarité associés. Ainsi, le nombre d'ajustements qu'il est possible d'effectuer en introduisant le produit de l'une ou de plusieurs de ces séries pour Y_i et X_i est très élevé. L'introduction de plusieurs séries ne permet pas forcément d'améliorer le modèle global principalement en raison de problèmes de multicollinéarité engendrés par l'introduction simultanée d'au moins deux variables ayant des caractéristiques similaires, par exemple le PIB et l'une de ses composantes pour Y_i ou X_i .

Pour finir nous ne devons pas négliger la question de la stationnarité des séries, afin d'éviter ce qu'on appelle communément les « régressions fallacieuses », c'est-à-dire l'univers des régressions introduisant des séries non stationnaires qui présentent artificiellement un bon coefficient de détermination. Généralement, on opère le passage de l'état non-stationnaire à l'état stationnaire d'une série en la différenciant autant de fois que nécessaire (n fois). On dit alors que la variable est intégrée d'ordre n (ou $I(n)$) s'il faut la différencier n fois pour qu'elle devienne stationnaire, la série contient alors n racines unitaires. Pour tester la stationnarité de nos séries nous choisissons le test de stationnarité³⁵ de Kwiatkowski, Phillips, Schmidt et Shin (1992) couramment appelé « test de KPSS » afin de déterminer l'ordre d'intégration de chaque variable et pour chaque modèle, puisqu'il est reconnu pour être l'un des tests les plus puissants pour tester la stationnarité d'une série.

Le test de KPSS permet de tester l'hypothèse nulle de stationnarité (autour d'une tendance ou d'une constante) contre l'alternative de présence de racine unité. Dans le test de KPSS deux cas sont étudiés:

³³ Champ : salariés du secteur privé et semi-public, y compris les apprentis et les stagiaires ; salaires nets de prélèvements (cotisations sociales, CSG et CRDS) ; France.

³⁴ L'indice du prix des automobiles (IPA) n'est disponible qu'entre 1963 à 1983 c'est la raison pour laquelle la somme des carrés des résidus de chaque modèle qui intègre cette variable est peu élevée. Rappelons que notre critère de choix est la statistique de Fisher qui prend aussi en compte le nombre des variables et les degrés de libertés de chaque modèle en plus de la somme des carrés des résidus d'ajustement.

³⁵ Il existe aussi la famille des tests de racine unitaire dont font partie Dickey-Fuller (DF), Dickey-Fuller Augmenté (ADF), Phillips-Perron (PP), etc.

1/ $y_t = r_t + \varepsilon_t$ où $\varepsilon_t \sim I(0)$, $r_t = r_{t-1} + u_t$ tel que $u_t \sim BB(0, \sigma_u^2)$

2/ $y_t = \beta t + r_t + \varepsilon_t$ où $\varepsilon_t \sim I(0)$, $r_t = r_{t-1} + u_t$ tel que $u_t \sim BB(0, \sigma_u^2)$

La statistique³⁶ du test est donnée par l'expression :
$$\pi = \frac{\sum_{t=1}^T \hat{S}_t^2}{T^2} \frac{1}{\hat{e}_{T,K}^2}$$

On refuse l'hypothèse de stationnarité c'est-à-dire $H_0 : \sigma_u^2 = 0$ (contre $H_1 : \sigma_u^2 > 0$) lorsque la valeur obtenue est supérieure à la valeur critique correspondante.

Concernant les résultats, nous constatons qu'aucune formulation par la combinaison de séries macroéconomiques ne parvient à apporter une meilleure valeur explicative (selon le critère de Fisher) au modèle de croissance formulé sans variable expliquant le taux de motorisation par ménage. L'introduction du taux de motorisation par individu comme unique variable exogène pour modéliser le taux de motorisation par ménage permet d'importantes améliorations selon le critère de Fisher, mais cette spécification ne passe pas le test de KPSS.

Certains modèles cherchant à expliquer le taux de motorisation par individu introduisent de la multicollinéarité partielle (repérée par une variance des coefficients trop élevée ou bien par la non significativité de certaines variables) ainsi que ceux qui ne passent pas le test de KPSS de stationnarité sont écartés. Ces procédures réduisent fortement le nombre de modèles satisfaisants. Nous recensons finalement 6 modèles qui passent le test de KPSS (plus de détails sur le test de KPSS ainsi que les résultats des tests pour les 6 modèles sont fournis en annexe 2-2).

En outre, nous constatons durant des essais préliminaires que les ajustements effectués à l'aide des séries en niveau apportent rarement les améliorations escomptées au modèle global mais que le passage au taux de croissance des séries (notées Δ) apporte d'importantes améliorations mesurées par les critères du coefficient de détermination et de la statistique de Fisher. On peut effectivement s'attendre à ce qu'une baisse (resp. hausse) de pouvoir d'achat en t provoque une baisse (resp. hausse) latente (en t , $t+1$ ou $t+2$) des ventes de véhicules neufs ou d'occasion et donc des niveaux de motorisation.

³⁶ La statistique du test est fondée sur les sommes partielles : $\hat{S}_t = \sum_{i=1}^t \hat{u}_i$ Ainsi que sur la variance de

long-terme :
$$\hat{e}_{T,K}^2 = \frac{\sum_{t=1}^T \hat{u}_t^2}{T} + 2 \sum_{k=1}^K \left(1 - \frac{k}{K+1}\right) + \frac{\sum_{t=k+1}^T \hat{u}_t \hat{u}_{t-k}}{T}$$

| Modèles testés | Y _i | X _i | Fisher | SCR |
|-----------------|---|--------------------------------|---------------|-----------------|
| Modèle 1 | <i>PIB</i> | <i>ISM</i> | 38 833 | 0.00392 |
| Modèle 2 | <i>ISM</i> | <i>PIB</i> | 33 410 | 0.00456 |
| Modèle 3 | <i>ISM</i> | $\Delta PIBT$ | 49 052 | 0.003104 |
| Modèle 4 | <i>ISM</i> | ΔPIB | 53 656 | 0.002777 |
| Modèle 5 | <i>ISM*ΔPIB</i> | ΔDCF | 71 738 | 0.002077 |
| Modèle 6 | <i>ISM*PIB</i> | ΔDCF | 71 147 | 0.002140 |

Tableau 2- 8 Ajustements introduisant des variables économiques au modèle motorisation des individus

Le tableau 2-8 résume la structure et la qualité des ajustements pour les six modèles retenus. Notons qu'ils introduisent tous des variables macroéconomiques et de pouvoir d'achat. Dans un second temps, il s'agit de tester la pertinence de certains choix et combinaisons de variables suivant les critères de la statistique de Fisher. Le tableau 2-8 montre que les modèles qui améliorent notre modèle initial (sans variables explicatives) sont au nombre de 3 : les modèles 4, 5 et 6 (en gras dans le tableau 2-8). Parmi ces trois modèles, c'est le modèle n°5 qui offre le meilleur ajustement aux données selon le critère du Fisher global (F-Stat=71738). Ce modèle est construit en recourant au taux de croissance annuel du PIB : $\Delta PIB = \frac{PIB_t - PIB_{t-1}}{PIB_t}$,

l'indice d'évolution du salaire moyen net (ISM) et au taux de croissance des dépenses de consommation finale $\Delta DCF = \frac{DCF_t - DCF_{t-1}}{DCF_t}$.

Le modèle retenu se formule ainsi :

$$T_t = \frac{S}{1 + e^{[-ISM*\Delta PIB]} + \alpha \cdot [(\Delta DCF)^\gamma]} \cdot t^{-\beta}$$

| Ajustement | It N | Alpha (α) | Beta (β) | Gamma (γ) | S | Intervalle de confiance de Alpha(α) à 95% | Intervalle de confiance de Beta(β) à 95% | Intervalle de confiance de Gamma (γ) à 95% | Intervalle de confiance de S à 95% | R ² | Fisher |
|---------------|-------|--------------------|------------------|--------------------|--------|--|--|---|------------------------------------|----------------|--------|
| <i>Button</i> | 18 52 | 1353,1 | 2,0562 | -0,1270 | 0,8129 | [1055,2; 1651,1] | [1,9726 ; 2,1398] | [-0,1558 ; -0,0982] | [0,7851 ; 0,8408] | 0,9999 | 71738 |

Tableau 2-9 Résultats des ajustements pour les taux de motorisation (par individus de 19 ans et plus) en intégrant les variables de taux de croissance du PIB de l'indice d'évolution du salaire moyen net et du taux de croissance des dépenses de consommation finale

Les variables sélectionnées améliorent l'ajustement global et expliquent les variations conjoncturelles du taux de motorisation par une évolution du taux de croissance du PIB du salaire moyen net et des dépenses de consommation finale. Nous montrons que ces indicateurs

macroéconomiques ont eu un impact considérable sur le développement à la fois historique et conjoncturel de la motorisation des Français (voir tableau 2-9 et figure 2-17).

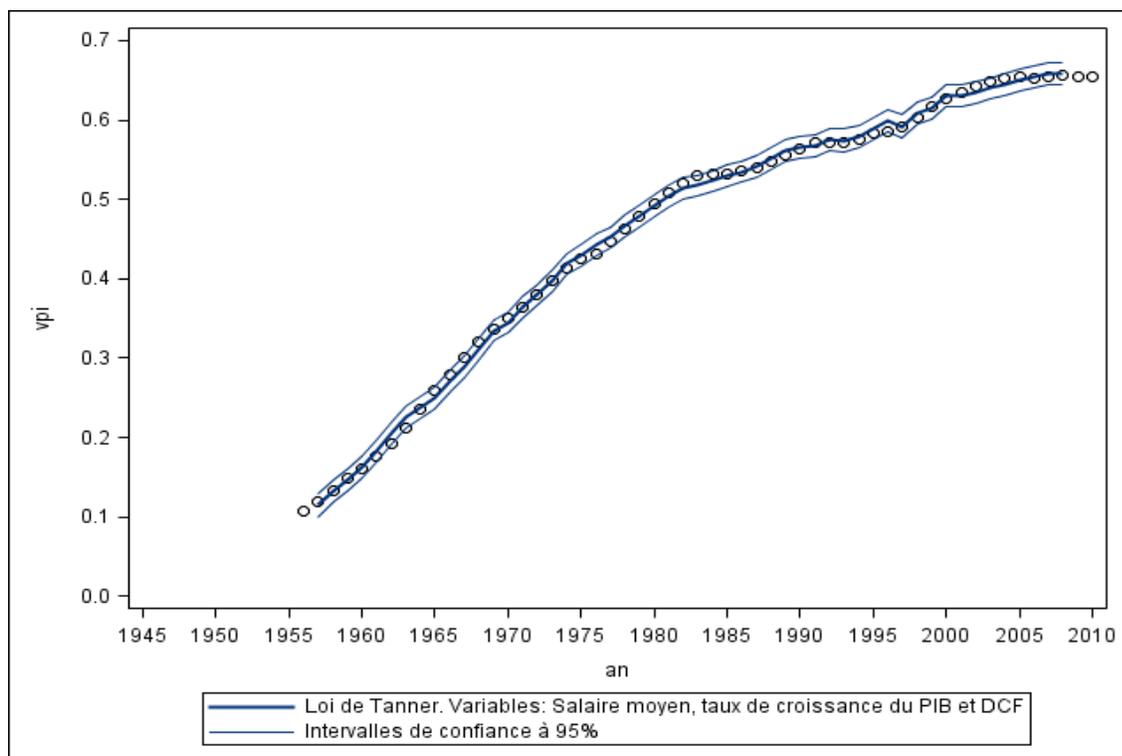


Figure 2- 17 Ajustement des taux de motorisation par individu de 19 ans et plus en France par une loi de Tanner incluant l'indice d'évolution du salaire moyen, le taux de variation du PIB et le taux de variation des dépenses de consommation finale

Le taux de croissance du PIB couplé à l'indice d'évolution du salaire moyen permet la prise en compte de la croissance du niveau de vie général des Français pour expliquer la croissance de la motorisation. La variation des dépenses de consommation finale permet d'expliquer de manière assez fine les variations conjoncturelles de la demande en véhicules depuis 1956. Le modèle obtenu permet une grande explicativité de la croissance historique du niveau de motorisation³⁷ des individus de 19 ans et plus en France (voir figure 2-17).

³⁷ La croissance du volume du parc automobile trouve ainsi son explication dans la hausse du niveau de vie des français couplée à une capacité de production de l'industrie automobile de véhicules accessibles au plus grand nombre comme l'emblématique Citroën 2CV incarnation de la voiture populaire solide et bon marché qui s'est vendue à plus de 5,1 millions d'exemplaires entre octobre 1948 et juillet 1990.

CONCLUSION

Ce chapitre vise à tester l'usage des modèles agrégés pour l'estimation de la taille du parc. Nous constatons que les modèles agrégés se prêtent raisonnablement à des ajustements sur des taux de motorisation par ménage ou par individu.

La simplicité de spécification qui caractérise l'approche agrégée explique son large succès passé ou présent. La modélisation agrégée est efficace dans le cadre d'une démarche prévisionnelle classique consistant à s'appuyer sur les tendances passées pour extrapoler les niveaux futurs en hypothésisant un seuil de saturation des niveaux de motorisation. Ces modèles sont pertinents pour comparer des évolutions observées ou projetées pour différents pays [Dargay et Gately, 1999]. Il est assez aisé d'adapter les projections en fonction des hypothèses faites sur l'évolution de la croissance démographique (nombre de ménages ou individus en âge de conduire) en recourant à un modèle agrégé.

Ce chapitre s'est aussi fixé l'objectif de répondre à la question du choix de la spécification théorique de la fonction sigmoïdale de motorisation des ménages. Préalablement aux ajustements nous explicitons le cadre des algorithmes d'optimisation non linéaire puis celui concernant la qualité des ajustements non linéaires en montrant que le critère de Fisher est un bon indicateur pour juger la qualité des ajustements.

Nous montrons, en procédant à des ajustements qui recourent aux moindres carrés non linéaires, que malgré de bons résultats en termes d'ajustement sur données de taux de motorisations, les modèles de Gompertz et logistique sont surclassés en qualité d'ajustement par les modèles Tanner et Von Bertalanffy. Ceci nous pousse à considérer les modèles agrégés de Tanner et de Von Bertalanffy comme les meilleurs candidats, que ce soit pour la modélisation des valeurs passées ou pour les projections futures.

Nous montrons que le modèle de Tanner, auquel nous associons la spécification de [Button et al. \(1982\)](#), est le modèle qui s'ajuste le mieux aux tendances passées des taux de motorisation (des ménages ou des individus de 19 ans et plus). Dans un second temps, nous introduisons des variables explicatives dans la spécification théorique du modèle agrégé de motorisation retenu afin d'isoler les déterminants historiques et macroéconomiques de la demande automobile et de la motorisation. Nous montrons alors que l'évolution historique de la série de taux de motorisation individuel est corrélée avec l'indice d'évolution du salaire moyen, la variation du PIB et de la variation de la demande de consommation finale. Nous ne trouvons aucune spécification des taux de motorisation par ménage qui réponde aux critères de stationnarité et d'amélioration du modèle sans variables exogènes.

Outre la question essentielle du choix de la fonction sigmoïdale et de sa spécification théorique, l'une des grandes problématiques abordées concerne l'existence d'un seuil de saturation de la motorisation. Les modèles agrégés fixent par définition un seuil de saturation dont on peut alors estimer le niveau. De fait, les modèles agrégés ne permettent pas de savoir si l'hypothèse émise sur l'existence du seuil de saturation est vérifiée. Il s'agit de l'une des principales critiques adressée aux modèles agrégés. On ne peut en effet, tester une proposition qui est supposée vraie à priori et qui constitue l'hypothèse de tous les modèles agrégés d'équipement ou de motorisation des ménages.

Une hypothèse alternative et assez nouvelle issue des différents travaux de [Goodwin \(2010a\)](#), [\(2010b\)](#), [\(2010c\)](#), [\(2010d\)](#), [\(2011\)](#) concerne l'hypothèse du « peak car » c'est-à-dire un effet de saturation ponctuel immédiatement suivi d'une décroissance des taux de motorisation. C'est une hypothèse qu'il faut considérer mais qui reste difficile à prouver de manière formelle. Goodwin trouve cependant deux principaux arguments pour défendre son hypothèse, d'une part le « peak-oil » et d'autre part l'arrivée à maturité du marché automobile et la stagnation observée des ventes de véhicules neufs dans les pays industrialisés.

Enfin, concernant les critiques adressées au modèle agrégé, soulignons qu'il ne permet ni de rendre compte de la structure démographique des individus à travers l'estimation du profil-type de l'équipement automobile le long du cycle de vie, ni de la structure du parc automobile. Le chapitre 3 montre que la problématique du vieillissement du parc automobile qui correspond à l'accroissement de l'âge moyen des véhicules particuliers souligne la nécessité de mieux comprendre l'évolution dynamique de la structure du parc automobile par génération de véhicules et catégories de motorisation (essence/diesel). Ceci n'est à l'évidence pas possible par l'application des modèles agrégés même s'ils restent très attractifs en raison de la possibilité qu'ils offrent au modélisateur de comprendre l'évolution générale de l'équipement et d'effectuer des projections de taux de motorisation ou d'équipement suivant l'hypothèse de l'existence de seuil de saturation.

Chapitre 3 : Vieillissement du parc automobile français (1984-2008) : facteurs et enjeux

SOMMAIRE

| | |
|---|------------|
| CHAPITRE 3 : VIEILLISSEMENT DU PARC AUTOMOBILE FRANÇAIS (1984-2008) : FACTEURS ET ENJEUX | 87 |
| INTRODUCTION | 89 |
| 1. LE PARC AUTOMOBILE FRANÇAIS SUBIT UN « VIEILLISSEMENT STRUCTUREL » | 91 |
| 1.1. <i>Effet de la diésélisation sur le parc automobile.....</i> | <i>97</i> |
| 1.1.1. Effet de la diésélisation sur le vieillissement du parc automobile..... | 97 |
| 1.1.2. Effet de la diésélisation et question du déploiement technologique..... | 102 |
| 1.1.2.1 Raisonement en stock..... | 103 |
| 1.1.2.2 Raisonement en flux (part de marché)..... | 106 |
| 1.2. <i>Effet du multi-équipement sur le vieillissement du parc automobile.....</i> | <i>107</i> |
| 1.2.1. Activité féminine et multi-équipement..... | 109 |
| 1.2.2. Etalement urbain et multi-équipement | 110 |
| 1.3. <i>Effet de la démocratisation et de la diffusion sociale de la voiture particulière.....</i> | <i>110</i> |
| 1.4. <i>Effet de la stagnation des immatriculations de véhicules neufs</i> | <i>111</i> |
| 2. LE VIEILLISSEMENT DU PARC AUTOMOBILE SELON LA DOUBLE DIMENSION : AGE ET KILOMETRAGE AU COMPTEUR..... | 113 |
| 2.1. <i>Durée de vie et longévité kilométrique du parc automobile</i> | <i>113</i> |
| 2.2. <i>Durée de vie et longévité kilométrique par type de motorisation.....</i> | <i>123</i> |
| CONCLUSION | 134 |

INTRODUCTION

L'âge moyen des véhicules qui composent le parc automobile est un indicateur qui permet d'appréhender la question des émissions polluantes moyennes de ce dernier. L'augmentation de l'âge moyen du parc peut être la conséquence d'une baisse de la diffusion de véhicules neufs et/ou de la diminution du déclassement des plus vieilles générations de véhicules. Cette hausse de l'âge moyen est considéré comme un facteur aggravant de l'impact environnemental des véhicules particuliers principalement en matière de hausse des d'émissions de polluants locaux et parfois en matière de GES [CEMT, 1999] (Gaz à Effet de Serre, principalement CO₂). Cette hausse de l'âge moyen du parc automobile, constatée depuis au moins 25 années [Dumont et Ledet, 1985 ; Amatusse et Madre, 1986 ; Lambert et Madre, 1989] est communément appelée « *vieillessement du parc automobile* ».

Le volume des émissions globales associées au parc automobile dépend à la fois de son volume mais aussi de sa structure. La structure peut être définie et analysée sous diverses formes qui peuvent être des catégories, l'âge, la catégorie de cylindrée, de puissance (réelle ou fiscale), l'énergie (essence, diesel, GPL, hybride, électrique, etc.) ou encore par niveau technologique (normes Euros).

La structure du parc automobile influe, au même titre que son volume, sur la quantité de polluants locaux et de GES émis. Il est donc essentiel d'adopter une vision qualitative des véhicules qui composent le parc. Une approche qualitative est même décisive sur le calcul des niveaux d'émissions puisqu'elle peut permettre d'attribuer un bénéfice à la fois sur les émissions et sur le bilan énergétique provenant du déploiement technologique de véhicules à faibles coefficients d'émissions lorsqu'ils viennent en remplacement de véhicules plus émetteurs.

Ces connaissances nous apportent un éclairage crucial sur le niveau d'impact du parc sur l'environnement en matière d'émissions de polluants locaux ou de GES. Le vieillissement du parc n'as pas le même effet sur les polluants et les émissions de GES.

La connaissance du niveau d'émissions de polluants d'un parc nécessite une bonne compréhension de l'évolution du vieillissement du parc, du déploiement des nouvelles technologies et de la répartition du parc par norme Euros. La mesure de l'évolution des niveaux d'émissions de GES liée à l'efficacité énergétique (ou à la consommation unitaire de carburants) nécessite quant à elle une connaissance précise de la structure du parc en matière d'évolution de la cylindrée, puissance réelle (ou fiscale) et de poids des véhicules.

L'évolution de l'âge moyen permet d'indiquer de combien d'années en moyenne sont datées les technologies des véhicules en circulation. Deux raisons majeures nous donnent une

indication sur la relation qui existe entre l'âge moyen d'un véhicule et son niveau d'émission (mesuré à partir d'un coefficient d'émission).

D'une part, les normes Européennes sont devenues de plus en plus contraignantes pour les nouvelles générations de véhicules au fur et à mesure des avancées techniques permises par la réduction des coûts contribuant à l'équipement en masse des véhicules neufs de pots catalytiques, filtre à particules, downsizing (réduction de la cylindrée pour une puissance réelle constante), etc. Les équipementiers et constructeurs automobiles s'adaptent en apportant des réponses technologiques aux exigences de réductions d'émissions de polluants.

D'autre part, à mesure qu'un véhicule vieillit, il surconsomme par rapport à son niveau de consommation conventionnelle et en conséquence son niveau d'émission en polluants et GES augmentent avec l'âge. Bien que corrélées à l'âge moyen du parc automobile, les émissions de GES, restent néanmoins mesurables à travers les coefficients de consommations unitaires mesurés en litres par kilomètre.

Nous nous attachons ainsi dans ce chapitre à démontrer que le parc automobile subit un vieillissement progressif depuis au moins 1984 selon nos estimations effectuées sur le panel Parc Auto (Sofres) et depuis au moins 1972 selon les travaux de [Amatousse et Madre \(1986\)](#) et de [Lambert et Madre \(1989\)](#) laissant penser que ce vieillissement est d'ordre structurel.

On estime que l'âge moyen du parc automobile passe de 6 ans en 1990 à près de 8,2 ans en 2008 présageant d'une stagnation des générations anciennes de véhicules dans le parc automobile. Le vieillissement observé du parc automobile français depuis 1990 est souvent expliqué par le phénomène de diésélisation du parc automobile, les voitures diesel ayant la réputation d'une longévité plus importante. Cependant, nous observons que le parc de véhicules à moteur diesel est plus jeune en moyenne (~ 7ans en 2008) que celui de véhicules à moteur essence (~ 10 ans en 2008), ce qui permet d'exclure, au moins à court terme, la diésélisation comme une explication du vieillissement du parc automobile français.

Les explications de cet allongement de la durée de vie moyenne depuis 1972 sont nombreuses et certaines d'entre elles comme le multi-équipement et l'étalement urbain ont d'ores et déjà été identifiées [[Cauret et al., 2001](#)].

Le multi-équipement des ménages contribue de façon importante sur le vieillissement du parc automobile puisque les ménages conservent généralement leurs véhicules les plus anciens après l'acquisition d'un véhicule neuf [[Cauret et al., 2001](#)]. L'écart d'âge moyen mesuré à partir du panel Parc Auto (Sofres) en 2008 est relativement important entre les véhicules uniques dans le ménage qui ont 7,1 ans et les véhicules secondaires qui ont 13,4 ans. L'âge moyen des véhicules secondaires subit une très forte hausse de près de 5,4 ans entre 1984 et 2008 puisqu'il passe de 8 à 13,4 ans. A titre indicatif, en 1984, les véhicules uniques avaient 5,4 ans,

et sur la période 1984 à 2008 l'âge de ces véhicules augmente à la marge de 1,7 an en passant à 7,1 ans en 2008.

Parmi les raisons sociales ayant contribué au multi-équipement des ménages deux d'entre elles sont déterminantes. D'une part, le développement de l'activité féminine et donc la croissance de la biactivité au sein des ménages, a fortement contribué au développement du second véhicule par l'apport d'une source de revenu supplémentaire au sein des ménages français [Cauret *et al.*, 2001 ; Robin, 2010]. D'autre part l'étalement urbain insuffisamment accompagné par une offre de transport public explique aussi la dépendance automobile qui contribue au multi équipement des ménages et au vieillissement du parc automobile [Cauret *et al.*, 2001].

Mais le multi-équipement des ménages n'est pas seul à expliquer le vieillissement du parc automobile puisque nous montrons que la démocratisation et la diffusion sociale de la voiture particulière correspondant à l'accession à l'équipement par des ménages modestes non équipés et la stagnation des immatriculations de véhicules neufs semblent être des causes importantes du vieillissement du parc automobile.

Ce chapitre s'attache par ailleurs à montrer qu'il est nécessaire de renouveler l'approche classique du vieillissement du parc automobile qui exploite de manière exclusive la dimension de l'âge des véhicules. Le recours à la dimension du kilométrage affiché au compteur est crucial car il permet de discriminer la longévité kilométrique des véhicules et de relier la durée de vie des véhicules à leur usage. La diésélisation du parc automobile est un facteur qui nous pousse à considérer la dimension du kilométrage affiché au compteur pour caractériser les différences de durée de vie (entre essence et diesel par exemple) par des différences d'usages.

1. Le parc automobile français subit un « vieillissement structurel »

Une exploitation des vagues annuelles du panel Parc-Auto sur 25 années couvrant les années 1984 à 2008 montre, dans la lignée des travaux déjà conduits sur le parc français depuis près de 25 années [Dumont et Ledet, 1985 ; Amatusse et Madre, 1986 ; Lambert et Madre , 1989 ; Gallez, 1994a; Robin, 2010], un vieillissement assez net du parc automobile : de 6,2 ans en 1993, l'âge moyen du parc passe à 7,2 ans en 2003 puis à 8,2 ans en 2008 (voir figure 3-1). Dumont et Ledet (1985) avaient déjà observé à partir des statistiques relatives à la vignette automobile un certain vieillissement du parc durant la période 1972 à 1983. Leurs conclusions se fondent sur l'observation d'une croissance importante du nombre de vignettes délivrées aux véhicules de plus de 20 ans dans le parc puisque ce nombre est multiplié par 4,5 entre 1972 et 1983. A titre de comparaison, le nombre total de vignettes délivrées est multiplié par 1,5 entre 1972 et 1983. Ils observent en outre, sur la même période, que le nombre de vignettes délivrées

pour les véhicules de moins de 5 ans (respectivement dont l'âge est compris entre 5 et 20 ans) est multipliée par 1,38 (respectivement par 1,72). [Amatousse et Madre \(1986\)](#) observent, à partir des Enquêtes de Conjoncture Au près des Ménages (ECAM), le phénomène de vieillissement du parc automobile, en remarquant que l'âge moyen du parc automobile avait progressé de façon régulière entre 1972 et 1985 en passant de 4,5 à 6,1 ans.

[Lambert et Madre \(1989\)](#) mesurent le vieillissement du parc automobile, à partir des ECAM, en estimant l'âge médian du parc et de différentes catégories de véhicules qui le composent comme les véhicules d'occasion, neufs, de différentes marques (Citroën, Renault, Peugeot, Talbot, étrangères) afin d'isoler les causes du vieillissement du parc automobile. Ils observent un vieillissement du parc automobile en montrant que l'âge médian des véhicules du parc passe de 3,8 ans en 1972 à 5,1 ans en 1988 et isolent la hausse du nombre de véhicules d'occasion dans le parc comme le principal facteur du vieillissement.

Le panel Parc-Auto nous permet d'observer le rajeunissement du parc à la fin des années 80 (1987 à 1990). Il s'explique principalement par la nette progression des immatriculations de véhicules neufs et par la hausse des durées de détention de ces dernières [[Lambert et Madre, 1989](#)]. A partir de 1992-1993, les ventes de véhicules neufs ont baissé et le parc a vieilli, passant de 6,1 ans en 1992 à 6,5 ans en 1994. Les primes gouvernementales, liant l'achat d'un véhicule neuf à la mise à la casse d'un véhicule ancien entre 1994 et 1996 n'ont pas vraiment interrompu mais plutôt ralenti ce mouvement de vieillissement. Ce dernier n'a cessé de se creuser depuis 1990 (voir figure 3-1), excepté durant la période de mise en place des primes de 1994 à 1996 (*balladurette* mise en place de février 1994 à juin 1995 et la *juppette* d'octobre 1995 à octobre 1996) où l'âge moyen est passé de 6,5 ans en 1994 à 6,4 ans en 1995 et 1996.

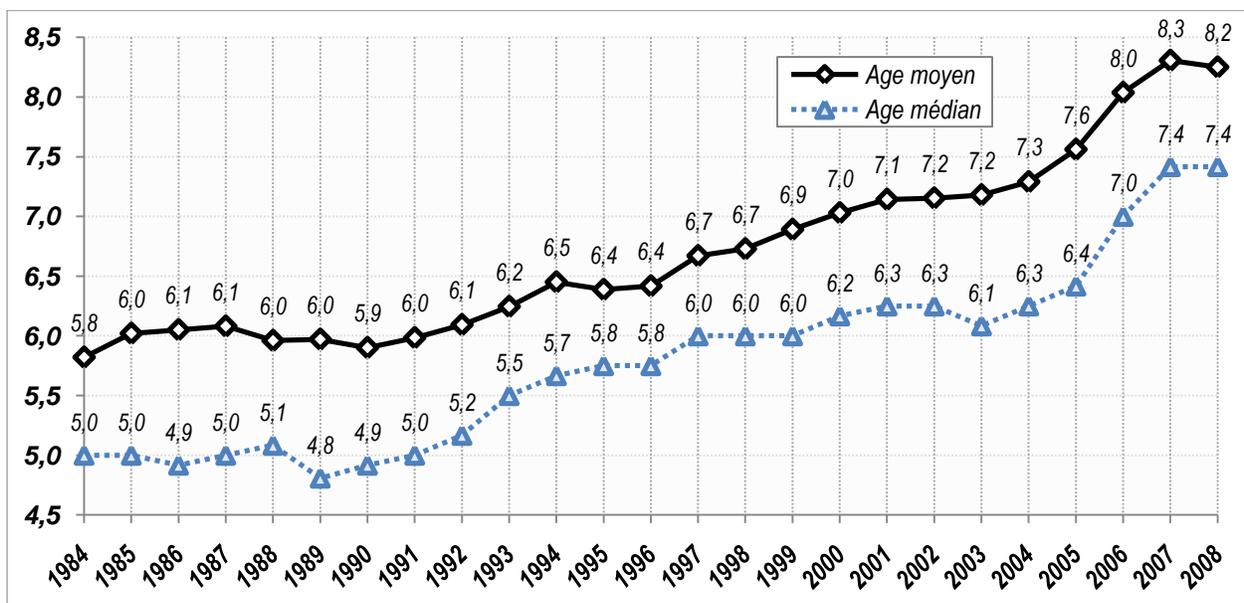


Figure 3- 1 Evolution de l'âge moyen du parc automobile entre 1984 et 2008. Source : Panel Parc-Auto-Sofres

D'autre part, nous observons une croissance quasi-continue du kilométrage au compteur (ou kilométrage total) sur la période 1984 à 2008 (voir figure 3-2). Dans la littérature, ce phénomène est très souvent relié à la diésélisation du parc qui s'est accentuée depuis 1990, puisque les véhicules à moteur diesel ont une longévité kilométrique (ou réserve kilométrique) supérieure à celle des véhicules à moteur essence (sauf GPL) et que leur proportion dans le parc augmente continuellement. Cette proportion passe de 16,5% en 1990 à près de 54% en 2008 (voir tableau 3-1 et figure 3-6).

Cette croissance du kilométrage moyen au compteur s'explique également par le multi-équipement des ménages correspondant à la croissance du pourcentage de ménages possédant deux véhicules ou plus. En effet, la seconde voiture est souvent achetée d'occasion et possède en moyenne un kilométrage au compteur plus élevé que la première. Par ailleurs la mise au rebut des véhicules secondaires est repoussée en raison d'un kilométrage annuel moins important (usage moins intense) que celui du véhicule principal. Ainsi le multi-équipement des ménages qu'il faut relier à l'augmentation de la proportion des véhicules secondaires est l'une des causes de la croissance du kilométrage cumulé moyen du parc automobile français.

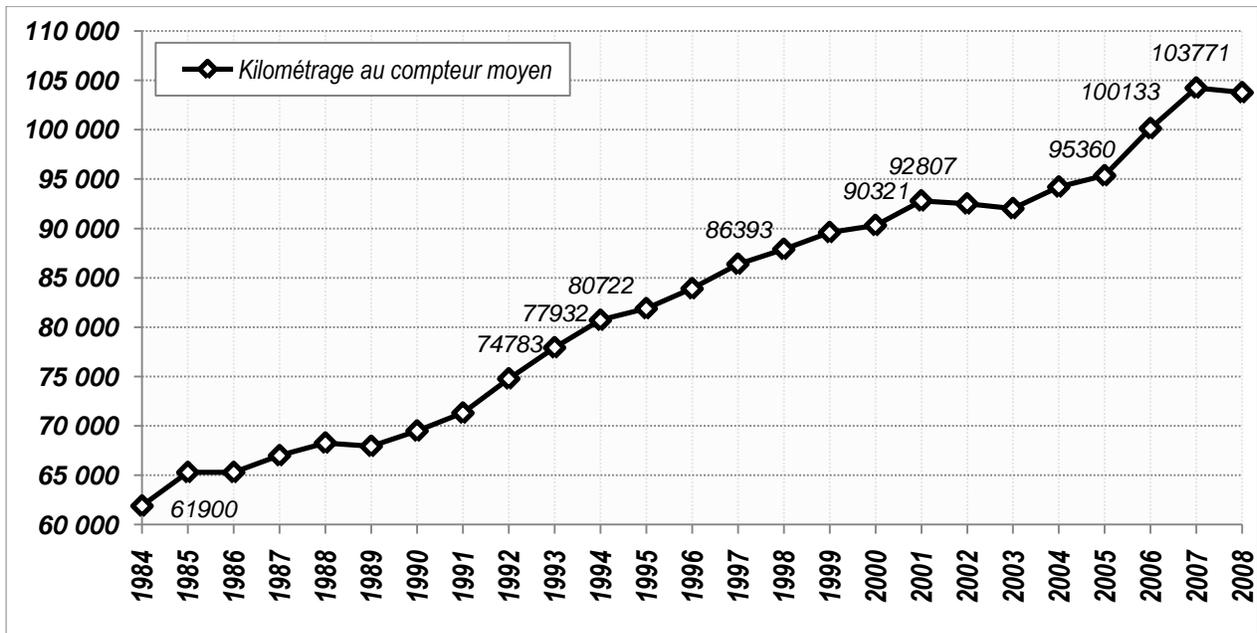


Figure 3- 2 Moyenne par année du Kilométrage affiché au compteur. Source : vagues annuelles « Parc Auto »

L'âge d'un véhicule est en règle générale bien corrélé avec son kilométrage total. Mais cette corrélation peut évoluer dans le temps. D'autre part il est important de comparer l'évolution temporelle conjointe des deux facteurs pour comprendre la contribution marginale de chaque facteur sur le vieillissement du parc. Nous choisissons d'évaluer la croissance conjointe de l'âge moyen et du kilométrage cumulé moyen du parc automobile français en croisant les dimensions de l'âge moyen du parc (en abscisse) avec le kilométrage cumulé moyen (en ordonnée) pour chaque année (voir figure 3-3).

On note une hausse de la proportion des véhicules qui cumulent âge et kilométrage élevés au sein du parc. Ce mouvement de vieillissement peut aussi être mesuré par le taux de croissance de la courbe qui relie les points de périodicité annuelle dont les ordonnées et les abscisses sont respectivement données par le kilométrage total et l'âge moyen du parc. Cette courbe reste sur un sentier de croissance quasi-constant pour les périodes 1996 à 2001 puis 2005 à 2008.

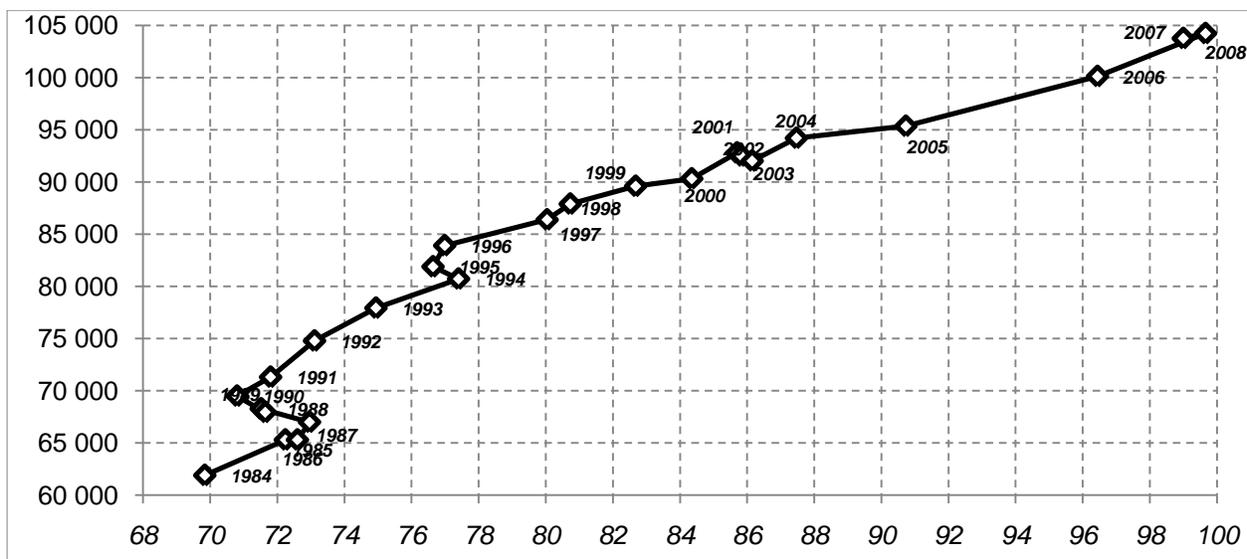


Figure 3- 3 Moyennes annuelles du couple de points : âge en mois (abscisses), kilométrage au compteur (ordonnée). Source : vagues annuelles « Parc Auto »

Par ailleurs, le constat de cette augmentation conjointe de l'âge moyen et du kilométrage au compteur s'explique par une modification de la structure du parc par catégorie d'âge et de kilométrage. On observe ainsi l'évolution de la structure d'âge qui montre un net recul de la part des véhicules les plus jeunes au profit des véhicules les plus anciens.

Les figures 3-4 et 3-5 montrent que les proportions de véhicules les plus jeunes et les moins utilisés régressent en faveur de celles de véhicules plus vieux et accumulant les kilomètres avec le temps. En effet, la part de véhicules d'âge compris entre 200 mois³⁸ (16,7 ans) et 250 mois (20,8 ans) passe de 2% en 1992 à près de 7% en 2007-2008. La proportion de véhicules affichant un kilométrage au compteur compris entre 150 000 et 200 000 km passe de 3% en 1984 à 13% en 2008.

Ce phénomène est même antérieur à 1984 puisque [Amatousse et Madre \(1986\)](#) avaient montré que l'évolution de la structure d'âge présente une large diminution de la proportion des véhicules de moins de 6 ans qui passe de 65,4% du parc en 1972 à 50,3% en 1985. Ils avaient aussi mis en évidence que les véhicules de moins de deux ans constituaient la classe d'âge la plus touchée en passant de 20,9% du parc en 1972 à 12,4% en 1985 (-8,5 points).

³⁸ L'âge en mois est calculé comme le temps qui sépare la date théorique de remise du questionnaire Parc Auto à la SOFRES (la plupart du temps en février de l'année qui suit l'année de la vague) et la date de construction du véhicule. Le mois de construction n'est pas connu pour toutes les années de l'enquête, notamment les années 1986 à 1989. Ces mois de construction sont alors simulés par un tirage aléatoire suivant une loi uniforme pondéré par le volume mensuel des immatriculations pour l'année considérée.

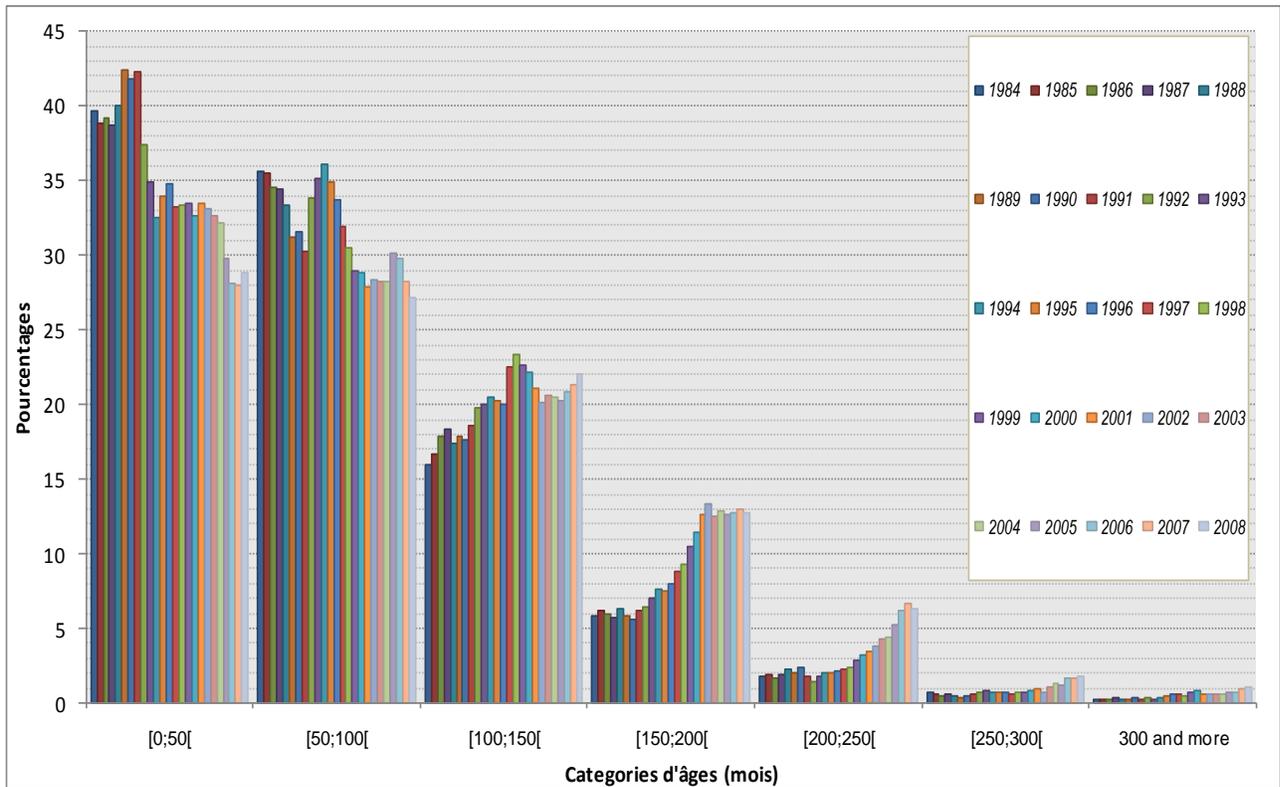


Figure 3- 4 Proportion des véhicules par tranche d'âge (en mois). Source : vagues annuelles « Parc Auto »

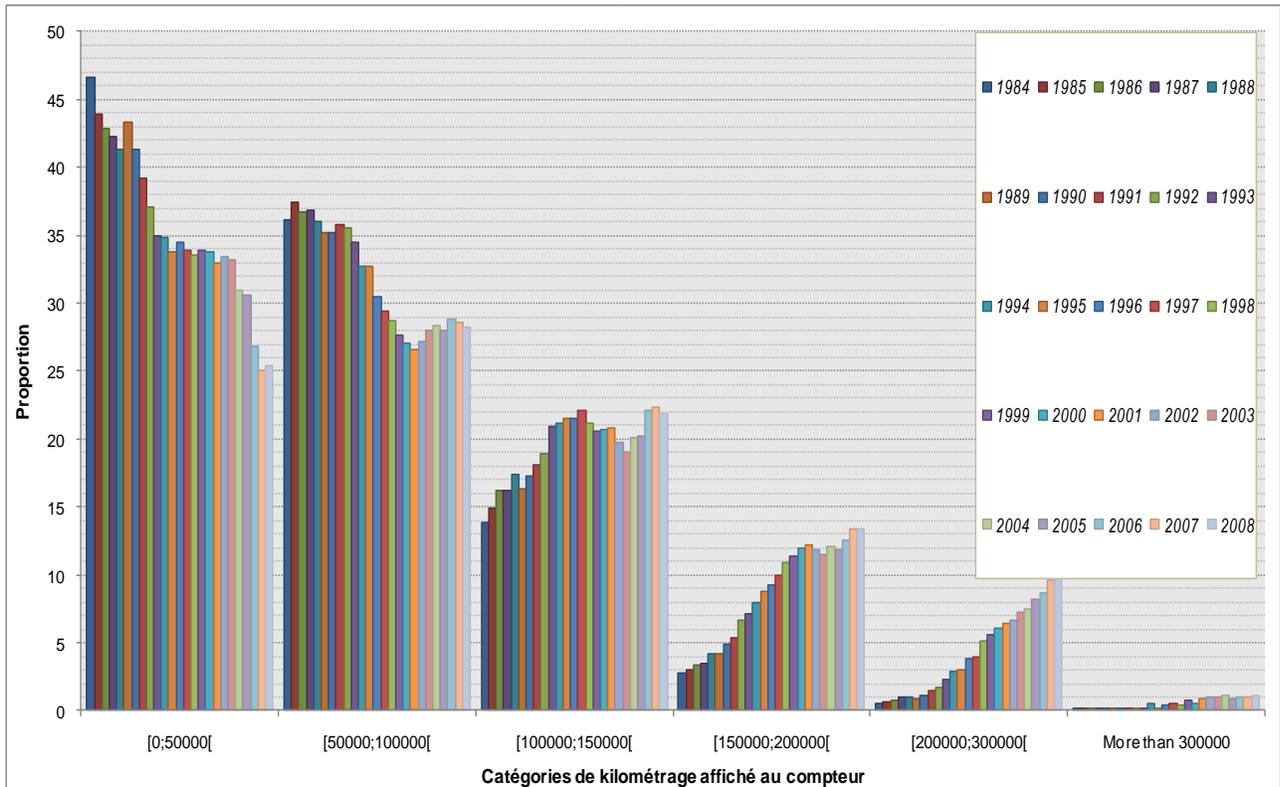


Figure 3- 5 Proportion des véhicules par tranches de kilométrage compteur. Source : vagues annuelles « Parc Auto »

La mise en perspective des vagues annuelles du panel Parc Auto sur la période 1984 à 2008 nous permet de montrer un vieillissement structurel du parc automobile. Les raisons qui sont souvent associées pour expliquer le vieillissement du parc automobile sont le multi-équipement des ménages et la diésélisation du parc automobile [Gallez et Couturier, 2000]. Dans la partie suivante, nous chercherons à examiner les contributions de la diésélisation du parc automobile et du multi-équipement sur le vieillissement du parc automobile.

1.1. Effet de la diésélisation sur le parc automobile

La longévité kilométrique des véhicules à moteur diesel est plus importante que celle des véhicules à moteur essence, or en 2007, la proportion de véhicules à moteur diesel dans le parc devient majoritaire (plus de 51%). Dans ce contexte, cette section tente de comprendre la contribution des véhicules à moteur diesel sur le processus de vieillissement du parc automobile.

1.1.1. Effet de la diésélisation sur le vieillissement du parc automobile

Le phénomène de diésélisation du parc automobile, correspond au processus de diffusion des véhicules particuliers à moteur diesel au sein du parc automobile. Ce processus est considéré comme une cause majeure du vieillissement du parc automobile d'autant plus que la France est, au sein de l'Europe, le pays le pays où le diesel a le plus de succès tout comme la Belgique et l'Autriche dans une plus faible mesure. Quatre principaux arguments ont milité en faveur de la diésélisation du parc automobile français :

- La fiscalité favorable au développement du diesel et l'existence d'un écart de prix à la pompe suffisamment significatif attire encore aujourd'hui les ménages les plus mobiles par souci de rationalité économique. La fiscalité des prix à la pompe a été (et reste) nettement à l'avantage des véhicules à moteur diesel malgré la loi de finance de 1999 qui se donnait l'objectif de réduire le différentiel des prix des carburants entre gazole et super sans plomb en prévoyant une hausse progressive de la TICPE (taxe intérieure de consommation sur les produits pétroliers) sur le gazole de 7 centimes par litre pendant 7 ans. Les taxes sur le super sans plomb 95 ont dépassé les 80% du prix final à la pompe en 1999 (contre 71% en 1990). L'écart des taxes entre le sans plomb et le gazole, entre fin 1990 et fin 2010, étant de 8% en moyenne. D'autre part la TICPE (taxe intérieure de consommation sur les produits énergétiques anciennement appelée TICPE) reste inchangée à des valeurs respectives de 0.6069€ et 0.4284€ par litre de carburant sans plomb 95 et gazole entre les années 2007 et 2011. Le prix unitaire du carburant hors taxes étant à peu près équivalent puisque en 2000 il faut compter 0,34€ pour le sans plomb 95 et 0,32€ pour le gazole. On observe toutefois un resserrement du différentiel

de prix depuis quelques années. En 1995, un écart de 0.25€ pour un prix à la pompe de 0.60€ pour le gazole représente un écart relatif de 42% entre essence et gazole. En 2010, un écart de 0.20€ avec un prix à la pompe du gazole de 1.15€ représente seulement un écart de 17%.

- L'engouement des ménages et des entreprises pour la motorisation diesel est aussi largement expliquée par l'avantage que possèdent les véhicules à moteur diesel en matière de longévité kilométrique par rapport à une motorisation essence [Kostopoulou, 1997]. En effet les véhicules à moteur diesel peuvent parcourir à cylindrée égale plus de kilomètres pendant leur durée de vie. Ainsi, la dépréciation de la valeur monétaire du véhicule se fait moins rapidement dans le cas d'un véhicule à moteur diesel et les ménages soucieux du prix de revente de leur véhicule n'y sont pas insensibles.
- L'évolution technique proposée joue aussi un rôle central dans le choix de motorisation. Les moteurs diesel sont intrinsèquement plus efficaces énergétiquement parlant que les moteurs à essence, le gasoil contenant par volume environ 10% d'énergie en plus que l'essence permet une plus grande autonomie. Autrement dit, à niveau technologique comparable, un véhicule à moteur diesel peut parcourir une plus longue distance à quantité égale de carburant qu'un véhicule essence. La consommation unitaire d'un véhicule à moteur diesel est plus faible que pour un véhicule essence, en 2009 le SOeS estime à partir du panel SECODIP³⁹ qu'un véhicule essence consomme en moyenne 7,63 litres pour cent kilomètres (l/100 km) et qu'un véhicule à moteur diesel consomme 6,36 l/100km c'est près de 1,2 litres en moins [CCTN, 2010]. Ceci explique d'autant plus l'engouement des ménages pour ce carburant même si l'écart de consommation unitaire entre diesel et essence se resserre durant la période comprise entre 1990 à 2009 passant progressivement de 1,95 à 1,24 l/100km [CCTN, 2010].
- Pour finir, depuis 1983, les motorisations diesel ont connu les plus importantes innovations technologiques [Hivert, 1996 ; Prieto, 2004], concernant la motorisation turbo diesel, l'introduction de l'injection directe à haute pression puis à rampe commune (*Common Rail*) permettant d'augmenter la pression (près de 1200 bars) et ainsi le couple moteur et la puissance développée à cylindrée identique et même inférieure grâce au downsizing⁴⁰. D'autre part, les constructeurs ont considérablement élargi l'offre puisque

³⁹ La société SECODIP a mis en place depuis 1987 un panel de 3300 voitures particulières. Les conducteurs notent sur un carnet leurs achats de carburant et les kilométrages au compteur correspondants. Ces informations sont renvoyées chaque semaine à SECODIP. L'exploitation donne des résultats mensuels, trimestriels et annuels de consommations unitaires de carburants par catégories de véhicules.

⁴⁰ Technique qui consiste à réduire la taille de la cylindrée d'un moteur, tout en gardant la même puissance. Ainsi, un moteur 1,6 L peut rivaliser en performances avec un 2 L, tout en consommant moins.

les véhicules à moteur diesel sont déclinés sur l'ensemble des gammes des constructeurs alors que très peu de gammes étaient concernées au début des années 70-80. Aujourd'hui, la motorisation diesel est présente sur les segments des berlines classiques, les breaks, les SUV (sport utility vehicle), les 4X4. Mais aussi sur les segments tels que les coupés, les cabriolets et les véhicules haut de gamme (par exemple : Mercedes classe S AMG, BMW série 7, Jaguar X-Type). Et pour preuve de cette avancée technique du moteur diesel, on voit pour la première fois en 2006 apparaître aux 24 Heures du Mans deux prototypes Audi alimentés au gasoil⁴¹ qui remportent la course en faisant un tir groupé, ce qui constitue une véritable révolution même s'il s'agit d'une course d'endurance qui favorise les véhicules qui minimisent le nombre d'arrêts au stand. Ainsi, les innovations apportées au diesel ont permis à cette motorisation de devenir attrayante compte tenu d'un agrément de conduite amélioré (souplesse, reprises, etc.) et d'un maintien des avantages issus des premiers moteurs diesel (robustesse, consommation de carburant, etc.).

Dans un tel contexte, la proportion de véhicules à moteur diesel dans le parc est en perpétuelle croissance (voir tableau 3-1) et la part de véhicules à moteur diesel dans les ventes de véhicules neufs a dépassé les 50% en 2000 et atteint 77,3% en 2008 (voir tableau 3-2). Si le nombre de véhicules particuliers diesel en circulation en 1970 estimée à 6000 exemplaires peut nous sembler dérisoire, à l'heure actuelle plus d'un véhicule en circulation sur deux est diesel. La proportion dans le parc de véhicules à moteur diesel passe de 7% en 1985 à plus de 51% en 2007 pour atteindre 53,9% en 2008 et 58% en 2010 (voir, tableau 3-1 et figure 3-6).

| Année | 1985 | 1990 | 1995 | 2000 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Pourcentage de véhicules diesel dans le parc | 7,0 | 16,5 | 29,9 | 36,7 | 46,6 | 48,4 | 51,0 | 53,9 | 56,2 | 58,0 |

Tableau 3- 1 Pourcentage de véhicules diesel dans le parc. Sources : « Parc-Auto » et CCFA pour 2009 et 2010

Cela est rendu possible grâce à l'injection directe et à l'adjonction d'un turbo. (Définition CCFA : <http://www.ccfa.fr/+-downsizing-+.html>)

⁴¹ En 2006, Audi engage deux Audi R10 Diesel dotées d'un moteur V12 TDI de 5499 cm³, 4 soupapes par cylindre, deux arbres à cames. L'introduction du carburant se fait par un système de rampe commune (Common Rail) moderne, à plus de 1.600 bars. En course, les voitures réalisent un doublé historique. Site : <http://www.les24heures.fr/index.php/content/view/209/1/>

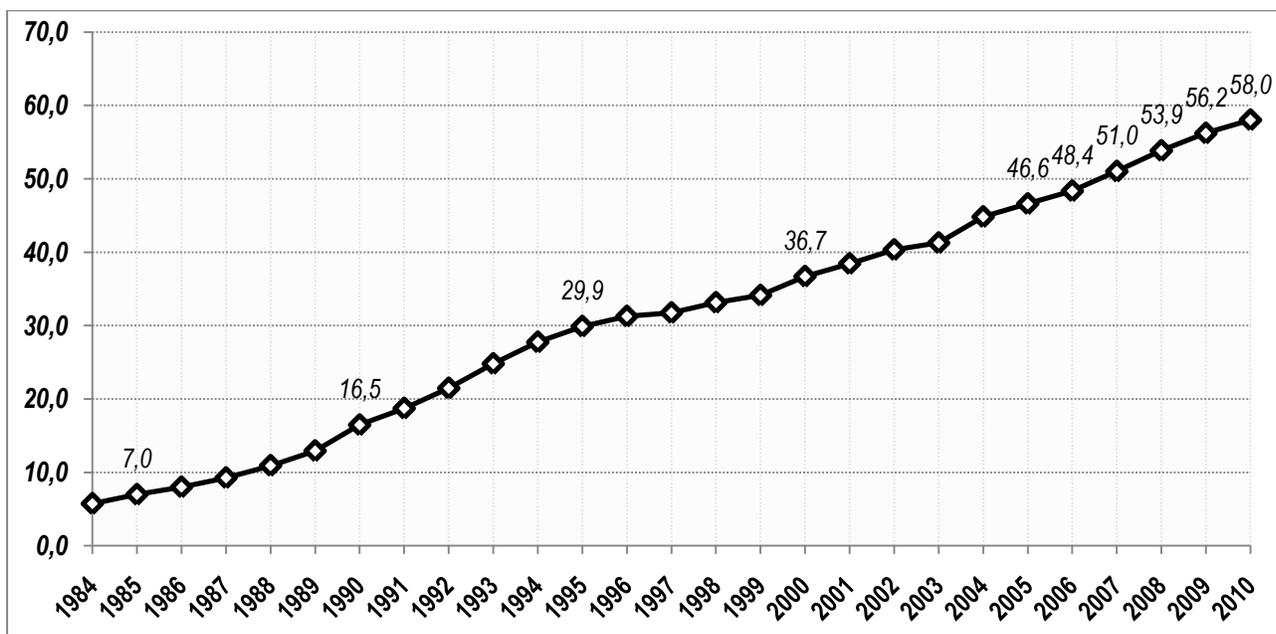


Figure 3- 6 Proportion des véhicules à motorisation diesel dans le parc français. Source : « Parc-Auto »

| Immatriculations de véhicules diesel | 1990 | 1995 | 2000 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 |
|--------------------------------------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| en unités | 762 054 | 897 698 | 1 046 485 | 1 353 914 | 1 392 925 | 1 429 037 | 1 427 697 | 1 525 439 | 1 584 438 |
| en % des immat. totales | 33,0% | 46,5% | 49,0% | 67,4% | 69,2% | 69,1% | 71,4% | 73,9% | 77,3% |

Tableau 3- 2 Immatriculations de véhicules diesel en unités et en pourcentage des immatriculations totales. Source : CCFA

Afin de mieux saisir l'effet de la diésélisation du parc sur son vieillissement deux approches complémentaires sont à considérer :

- Une approche par flux de nouveaux entrants. Le phénomène diésélisation est relativement nouveau : en 2008 les immatriculations de véhicules à moteur diesel, avec plus de 3 véhicules sur 4 sont dorénavant beaucoup plus importantes que celles des véhicules à moteur essence depuis 2001. Par conséquent, le flux de véhicules à moteur diesel entrants (nouvellement immatriculés) abaissent fortement l'âge moyen du parc ainsi que l'âge moyen des véhicules à moteur diesel relativement à l'âge moyen du parc puisque leur nombre croît continuellement jusqu'en 2008 (voir tableau 3-2).
- Une approche par stock permettant de mesurer l'effet de la proportion des plus vieux véhicules à moteur diesel sur le parc engendrant un éventuel vieillissement. Gallez (1994a) puis Gallez et Couturier (2000) montrent en comparant des lois de survie empiriques essence et diesel pour les générations de voitures particulières construites après les années 80 que les paramètres de durée de vie médiane ne sont pas significativement différents. Ce phénomène doit être infirmé ou confirmé pour les années 2000 à 2008 en comparant la durée de vie des véhicules à moteur essence et diesel, c'est l'un des principaux objectifs du chapitre 4.

La conjecture selon laquelle le phénomène de diésélisation serait responsable du vieillissement du parc a pour origine des considérations techniques qui admettent qu'à priori un véhicule à moteur diesel possède une durée de vie supérieure à celle d'un véhicule essence. Cependant, les véhicules à moteur diesel s'ils sont soumis à un usage plus intense peuvent voir leur durée de vie relativement amoindrie au regard de celle des véhicules à motorisation essence. Gallez et Couturier (2000) justifient une durée de vie équivalente pour les deux catégories de motorisation par un usage plus important des véhicules à moteur diesel comparativement essence. Ils montrent que pendant la période 1985 à 1997, le kilométrage moyen annuel d'une voiture diesel passe de 21 000 à 19 000 km environ, et que le kilométrage d'une voiture à essence est relativement stable, autour de 11 500 km par an. Selon Gallez et Couturier (2000) l'écart entre les intensités d'utilisation des véhicules est compensé par une plus grande robustesse des voitures diesel, ou bien par une stratégie de remplacement des véhicules par les ménages très différente selon le type de carburant. Par ailleurs, selon Hivert (1996), « *en passant au diesel, un automobiliste modifie ses comportements de mobilité en augmentant son kilométrage de 21%, alors qu'il parcourait déjà un kilométrage élevé avec son ancienne voiture à essence (de 16 000 km/an avant à 19 360 km/an après remplacement, soit 3 360 km/an en moyenne (plus ou moins 470))* ». Un examen de la durée de vie des véhicules particuliers par type de motorisation pourra permettre d'évaluer la contribution des véhicules à moteur diesel sur le phénomène de vieillissement du parc. La section 2.1 de ce chapitre (2.1-Durée de vie et longévité kilométrique par type de motorisation) tente de répondre à cette question en explorant et en comparant l'âge des véhicules de plus de 20 ans par type de motorisation pour les vagues 2000 à 2008 du panel Parc Auto.

Nos observations montrent que l'âge moyen des véhicules à moteur essence est plus élevé que celui de leurs homologues à moteur diesel. En effet, l'âge moyen des véhicules à moteur essence croît continuellement entre 1984 et 2008 en passant de 6,1 ans à 9,9 ans. L'âge moyen des véhicules à moteur diesel est de 4 ans en 1984. Cet âge décroît de 4,2 à 3,8 ans avec une diffusion relative assez importante entre 1985 et 1990 puis croît avec un fléchissement en 1995 qui s'explique par les « primes à la casse ». Il atteint finalement l'âge de 6,9 ans en 2008.

L'écart d'âge moyen entre véhicules à moteur essence et diesel (voir tableau 3-3 et figure 3-7) passe de 2,1 ans en 1984 à 3 ans en 2008. Par ailleurs l'âge moyen du parc automobile est toujours supérieur à celui des véhicules à moteur diesel qui le composent. Ceci tend à prouver qu'il n'y a pas de relation causale entre le vieillissement du parc et la diffusion des véhicules à moteur diesel. Mais au-delà de cette remarque, on montre surtout que les véhicules à moteur diesel contribuent au rajeunissement du parc en supplantant progressivement la motorisation essence dans le parc à disposition des ménages. L'explication de ce phénomène est simple : la diffusion des véhicules à moteur diesel est plus récente.

| Age moyen par année | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 00 | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Diesel | 4,0 | 4,2 | 4,1 | 4,1 | 3,9 | 3,7 | 3,8 | 3,8 | 4,1 | 4,4 | 4,8 | 4,8 | 5,1 | 5,5 | 5,8 | 5,9 | 6,2 | 6,2 | 6,3 | 6,3 | 6,4 | 6,6 | 6,8 | 6,9 | 6,9 |
| Essence | 6,1 | 6,2 | 6,2 | 6,3 | 6,3 | 6,3 | 6,5 | 6,6 | 6,9 | 7,2 | 7,4 | 7,4 | 7,4 | 7,5 | 7,5 | 7,8 | 8,1 | 8,3 | 8,2 | 8,4 | 8,6 | 9,0 | 9,4 | 9,8 | 9,9 |

Tableau 3- 3 Age moyen des véhicules en fonction de la motorisation (essence, diesel). Source : « Parc Auto »

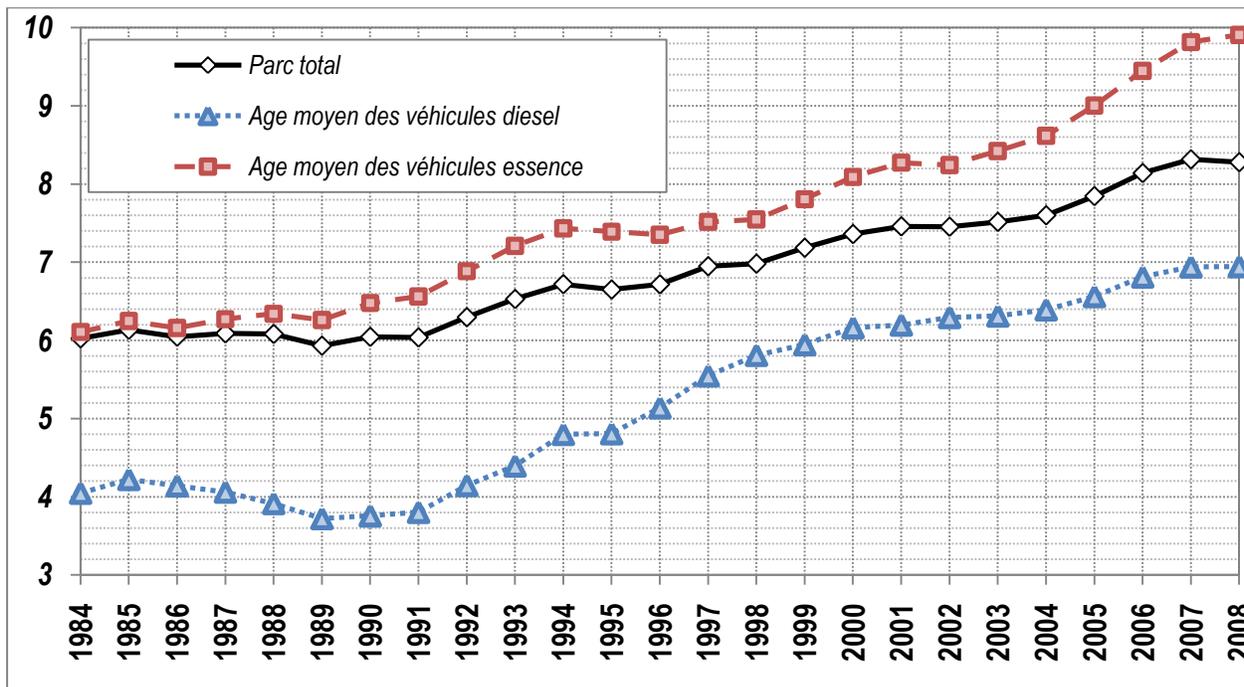


Figure 3- 7 Age des véhicules par type de motorisation (diesel/essence) dans le parc français. Source : « Parc Auto »

1.1.2. Effet de la diésélisation et question du déploiement technologique

L'essor et le déploiement des véhicules à moteur diesel au sein du parc automobile depuis les années soixante-dix est l'un des seuls exemples sur le moyen ou le long terme du développement d'une motorisation alternative à celle du moteur essence classique. Le déploiement de la technologie diesel, si elle peut être qualifiée de technologie alternative, est intéressante à observer puisqu'elle permet une meilleure compréhension des processus de diffusion en flux (nouvelles immatriculations) ou en stock (proportion de la motorisation dans le parc) de nouvelles technologies de véhicules (agrocarburants, charbon liquéfié, piles à combustibles, air comprimé, hybrides, électriques, etc.). Cela doit tout de même être relativisé car chaque contexte est différent, mais aussi car le processus de diffusion technologique est influencé par de nombreux facteurs tel que les coûts intégrant les prix d'acquisition, les coûts de fonctionnement qui dépendent des coûts de l'énergie, d'entretien, de la durée de vie, taxes directes et indirectes, etc. Notons par ailleurs que le déploiement de différentes technologies

conjointes peuvent interférer les unes sur les autres. Il faut dissocier deux types d'approches possibles pour mesurer le déploiement technologique :

- La première raisonne en stock en mesurant la proportion de véhicules d'une caractéristique technologique donnée au sein du parc à chaque période depuis la date d'apparition de la technologie. Raisonner en stock permet de comprendre la diffusion structurelle de celle-ci dans le parc.
- La seconde optique raisonne en flux, c'est-à-dire en part de marché. Cette optique privilégie le processus de diffusion conjoncturel en calculant à chaque période la proportion des véhicules immatriculés possédant caractéristique technologique donnée relativement aux immatriculations annuelles totales (proportion dans les entrants). Cette dernière optique permet de comprendre la diffusion d'une technologie quelconque comme l'évolution d'une part de marché (rapport du nombre d'immatriculations de la population d'étude sur le nombre d'immatriculations totales) associée à une technologie donnée.

L'exemple de la diffusion du véhicule à moteur diesel dans le parc français est le seul cas réel de diffusion observable et quantifiable à l'échelle du parc automobile. Les modèles, logistique [Sauvant, 2002] et gompertzien sont souvent associés au processus de diffusion en stock d'un équipement au sein d'un marché.

1.1.2.1 Raisonnement en stock

Attardons nous en premier lieu sur le processus de diffusion des véhicules à moteur diesel dans le parc en raisonnant en stock. Un ajustement non-linéaire sur des taux de diésélisation du parc automobile par des lois logistique [Sauvant, 2002] et Gompertz (avec un seuil de saturation à 100% uniquement pour la loi Gompertz) de 1970 à 2010 montre que la loi logistique offre le meilleur ajustement avec un coefficient de détermination élevé (R^2 proche de 0.999) (voir figures 3-8 et 3-9 ; tableaux 3-4 et 3-5). Les points d'inflexion concernant les modèles Gompertz et logistique se sont révélés assez proches et sont respectivement observés en 2000 et en 1999, indiquant un certain ralentissement relatif de la diésélisation du parc. Selon le modèle logistique dès 2015, 62% [59 ; 65]⁴² du parc est alimenté au gasoil, cette proportion estimée passe à 65% [61 ; 68] en 2020 puis à 67% [63 ; 71] en 2030 (voir tableau 3-4 et figure 3-8). Par ailleurs, le modèle logistique estime que le seuil de saturation de la proportion de véhicules à moteur diesel dans le parc se situe autour de 68% [64 ; 72].

Ces résultats sont tout de même à nuancer car ils sont calculés toutes choses égales par ailleurs et le déploiement de nouvelles technologies comme les véhicules hybrides ou

⁴² Intervalles de confiance de Wald à 95%.

Chapitre 3 Vieillessement du parc automobile français (1984-2008) : facteurs et enjeux

électriques par exemple pourrait parasiter la part de marché du diesel et donc sa diffusion estimée dans le parc.

| Année | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 |
|--|-------|-------|-------|-------|
| Pourcentage de véhicules diesel dans le parc | 61,77 | 64,81 | 66,39 | 67,20 |

Tableau 3- 4 Pourcentage de véhicules diesel dans le parc selon le modèle logistique

| Ajustement | It | N | Alpha (α) | Beta(β) | Seuil de saturation | Intervalle de confiance de Alpha(α) à 95% | Intervalle de confiance de Beta(β) à 95% | Intervalle de confiance de S à 95% | R ² | Fisher |
|----------------|----|----|--------------------|-----------------|---------------------|--|--|------------------------------------|----------------|--------|
| Loi logistique | 10 | 41 | 0,1436 | 64,3816 | 67,9812 | [0,1362 ; 0,1511] | [56,0250 ; 72,7382] | [64,8573 ; 71,1051] | 0,99911 | 14260 |
| Loi Gompertz | 63 | 41 | -6,3123 | 0,0608 | 100 | [0,0594 ; 0,0622] | [-6,5685 ; -6,0560] | [100 ; 100] | 0,99903 | 12018 |

Tableau 3- 5 Résultats des ajustements par les lois logistique et Gompertz

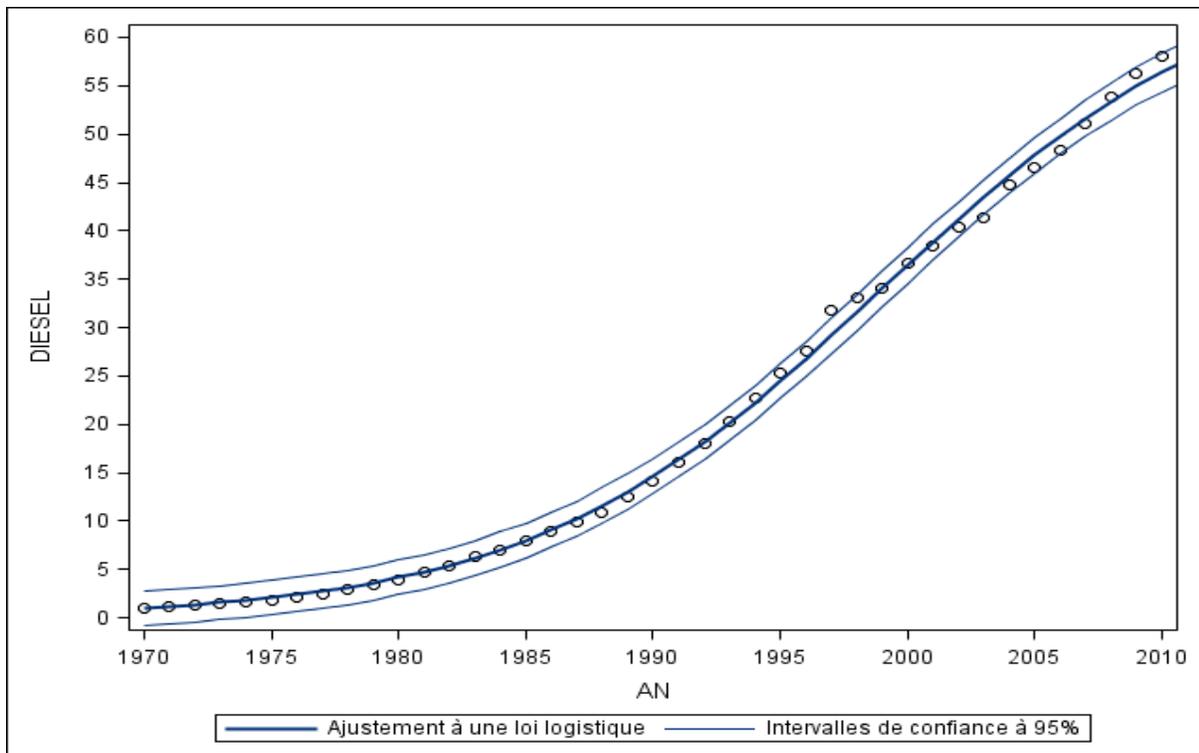


Figure 3- 8 Ajustement des taux de diésélisation du parc automobile par une loi logistique

D'après le modèle Gompertz, en 2020, 74% [71 ; 76] du parc serait composé de véhicules à moteur diesel (voir figure 3-10). Les résultats obtenus par le modèle Gompertz sont assez discutables car ils permettent, de part le résultat sur le seuil de saturation, de voir à terme un parc automobile avec 100% de véhicules à moteur diesel. Ce scénario semble assez fortement irréaliste au vu de l'attachement de certains consommateurs à la motorisation essence, du rattrapage du prix du super par celui du gazole amorcé depuis quelques années et de la diffusion de nouvelles technologies, en compétition avec le diesel, comme les véhicules propres et électriques.

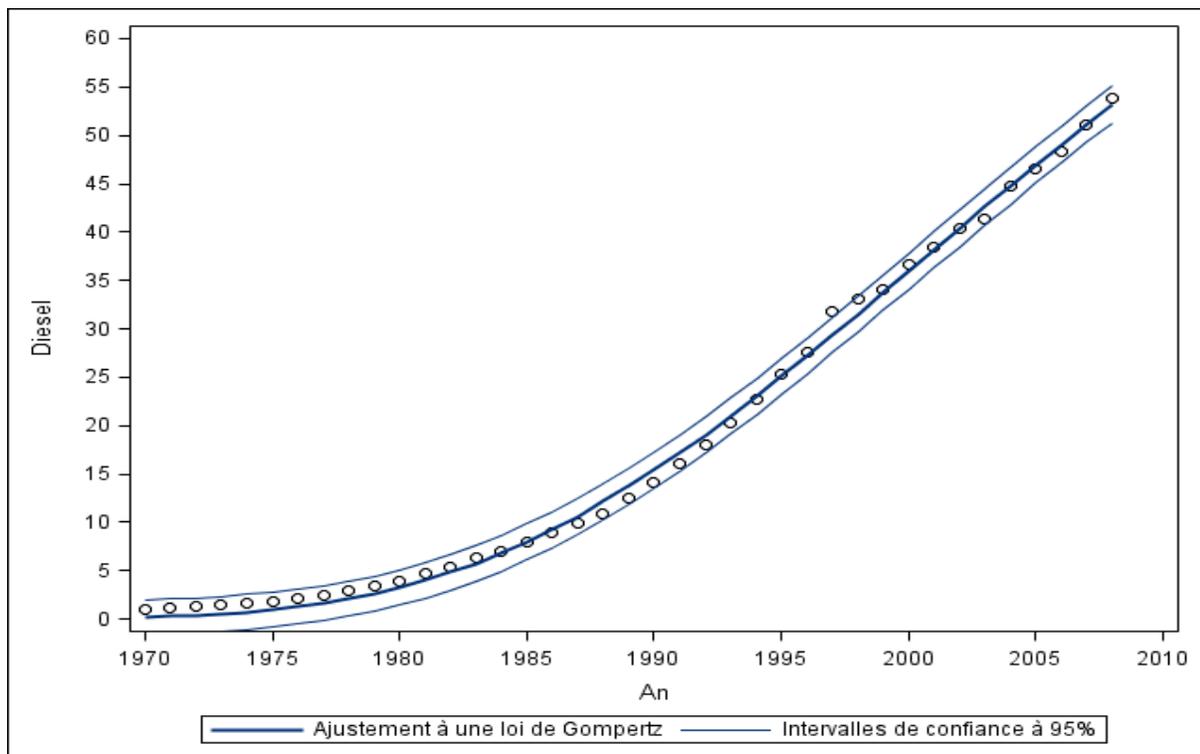


Figure 3- 9 Ajustement des taux de diésélisation du parc automobile par une loi de Gompertz

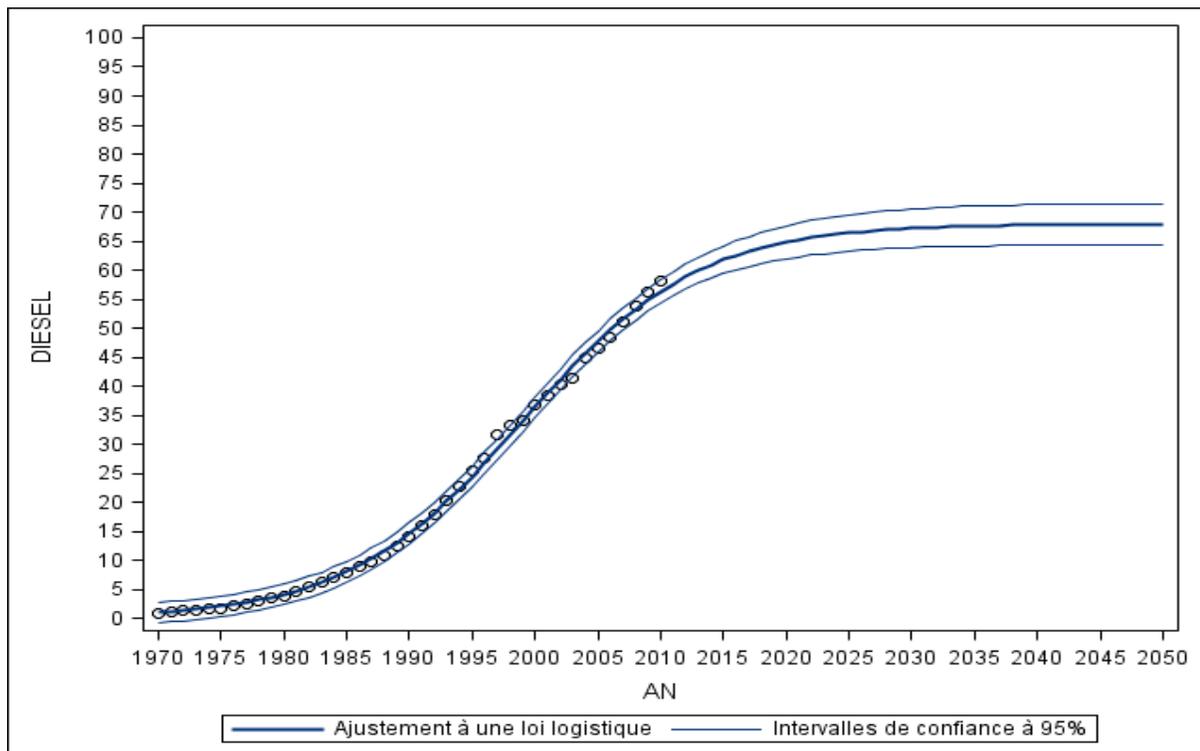


Figure 3- 10 Modèle théorique de prévision de la diésélisation du parc automobile par une loi logistique

1.1.2.2 Raisonement en flux (part de marché)

Raisonner en flux suppose d'aborder le processus de diésélisation du parc comme l'évolution du rapport du nombre d'immatriculations de véhicules à moteur diesel sur le volume d'immatriculations totales. La diffusion des véhicules à moteur diesel exprimée en pourcentage d'immatriculations totales représente l'attractivité technologique du véhicule à moteur diesel (voir figure 3-11) poussée par la compétitivité prix et performance de cette motorisation. La hausse de diffusion par flux d'entrants de véhicules à moteur diesel est moins « lisse » que celle mesurée en stock puisqu'elle subit certaines variabilités et inflexions notamment à partir de 1995 (jusqu'en 2002). Le creux observé à partir de 1995 sur la part de marché des véhicules à moteur diesel s'explique principalement par la mise en place des primes au remplacement (ou « primes à la casse ») durant la période 1994 à 1996.

En effet, l'âge minimum des véhicules éligibles à la prime dans le cadre du dispositif dit « Balladur » mis en place de février 1994 à juin 1995 était de 10 ans. Pour le cas du dispositif dit « Juppé » actif de septembre 1995 à septembre 1996 l'âge minimum d'éligibilité est passé à 8 ans. Sachant d'autre part que le taux de véhicules à moteur diesel présents dans le parc était largement minoritaire (23% en 1995) pour un âge moyen très en dessous de l'âge du parc de l'époque (4,8 ans en 1994), ceci nous amène à conclure que la plupart des véhicules éligibles aux primes et retirés de la circulation (1 327 milliers de véhicules concernés par les deux dispositifs) sont des véhicules à moteur essence qui ont été pour la plupart remplacés par des véhicules de même motorisation.

D'une manière plus marginale, on remarque aussi que les chocs sur la demande affectent particulièrement la motorisation diesel en raison de son coût d'acquisition plus élevé en moyenne que la motorisation essence (à gamme équivalente). La demande de véhicules à moteur diesel est alors plus sensible aux aléas économiques comme la récession de 1992-1993, le phénomène de stagflation en 1982, les chocs pétroliers (1973, 1979, 2008). En effet, le choix d'acquisition d'un véhicule à moteur diesel qui tient au différentiel du prix des carburants peut être freiné en période de crise par le coût d'acquisition d'une motorisation diesel, supérieur à celui d'une essence de gamme équivalente.

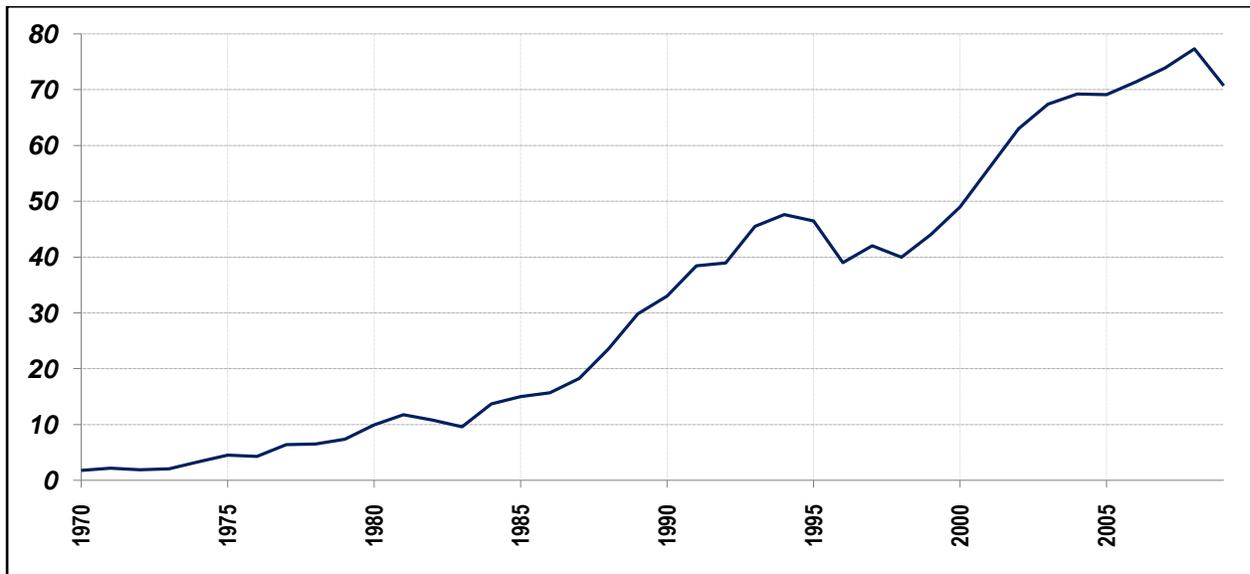


Figure 3- 11 Diffusion des véhicules diesel dans le parc automobile (proportion d'immatriculations de véhicules diesel dans les immatriculations totales)

Nous avons montré que le parc de véhicules à moteur diesel vieillit, cependant l'âge moyen des véhicules à moteur diesel est inférieur à celui de la population composée par les véhicules à moteur essence. Cet argument est suffisant pour démontrer que la diésélisation du parc ne pèse pas sur le vieillissement du parc automobile français relativement à la population de véhicules à moteur essence. Dans la section suivante nous questionnons l'impact du multi-équipement des ménages sur le vieillissement.

1.2. Effet du multi-équipement sur le vieillissement du parc automobile

Près de 40% des ménages sont multi-équipés en 2010. Par ailleurs, depuis de nombreuses années le nombre de ménages multi-équipés augmente plus rapidement que le nombre de ménages accédant à l'équipement [Hivert, 2010]. On observe cependant une légère stabilisation en 2007 avec 36,6% des ménages multi-équipés en 2008 contre 37,8% en 2007 [Hivert, 2010].

La croissance des taux de motorisation des ménages français (voir chapitre 2) est une première explication de la tendance au vieillissement du parc puisque les véhicules secondaires ont un âge moyen plus élevé que le véhicule principal des ménages. En 2008, le véhicule secondaire avait un âge moyen estimé à 13,4 ans contre 10,4 ans pour le véhicule principal et 7,1 ans lorsque le véhicule est le seul du ménage (voir figure 3-13 et tableau 3-6). Ainsi, l'écart d'âge moyen mesuré à partir du panel Parc-Auto en 2008 est relativement important entre les véhicules uniques dans le ménage qui ont 7,1 ans et les véhicules secondaires qui ont 13,4 ans. D'autre part, l'âge moyen des véhicules secondaires subit une hausse de près de 5,4 ans en passant de 8 à 13,4 ans durant la période 1984 à 2008. A titre indicatif en 1984 les véhicules uniques ont 5,4 ans, et sur la période 1984 à 2008 l'âge de ces véhicules augmente à la marge de 1,7 an.

Chapitre 3 Vieillesse du parc automobile français (1984-2008) : facteurs et enjeux

| Année | Age du véhicule | | | Parc total |
|-------|-----------------|-----------|------------|------------|
| | Seul | Principal | Secondaire | |
| 1984 | 5,4 | 7,9 | 8,0 | 6,0 |
| 1985 | 5,6 | 7,7 | 8,5 | 6,1 |
| 1986 | 5,5 | 7,9 | 8,0 | 6,0 |
| 1987 | 5,5 | 8,0 | 7,5 | 6,1 |
| 1988 | 5,3 | 8,1 | 9,0 | 6,1 |
| 1989 | 5,3 | 7,8 | 8,1 | 5,9 |
| 1990 | 5,3 | 8,0 | 9,3 | 6,0 |
| 1991 | 5,3 | 8,0 | 9,2 | 6,0 |
| 1992 | 5,6 | 8,0 | 9,5 | 6,3 |
| 1993 | 5,7 | 8,5 | 9,3 | 6,5 |
| 1994 | 5,9 | 8,6 | 9,3 | 6,7 |
| 1995 | 5,8 | 8,5 | 9,6 | 6,7 |
| 1996 | 5,9 | 8,5 | 10,4 | 6,7 |
| 1997 | 6,1 | 8,8 | 10,6 | 6,9 |
| 1998 | 6,2 | 8,9 | 9,9 | 7,0 |
| 1999 | 6,3 | 9,0 | 11,3 | 7,2 |
| 2000 | 6,4 | 9,3 | 12,1 | 7,4 |
| 2001 | 6,4 | 9,6 | 11,3 | 7,5 |
| 2002 | 6,4 | 9,5 | 11,2 | 7,5 |
| 2003 | 6,5 | 9,6 | 11,3 | 7,5 |
| 2004 | 6,5 | 9,7 | 11,3 | 7,6 |
| 2005 | 6,7 | 10,0 | 11,7 | 7,8 |
| 2006 | 7,0 | 10,4 | 12,1 | 8,1 |
| 2007 | 7,1 | 10,4 | 13,9 | 8,2 |
| 2008 | 7,1 | 10,4 | 13,4 | 8,2 |

Tableau 3- 6 Age moyen des véhicules en fonction du statut du véhicule dans le ménage (unique, principal ou secondaire). Source : « Parc-Auto »

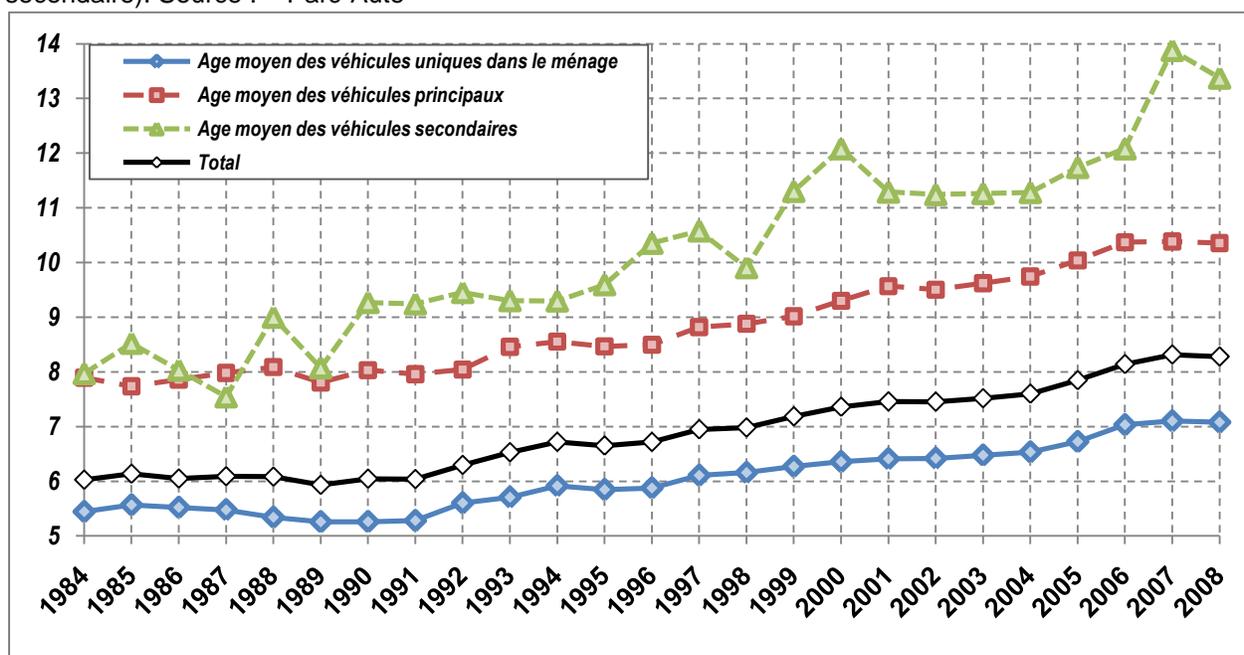


Figure 3- 12 Age moyen des véhicules en fonction du statut dans le ménage (unique, principal ou secondaire). Source : « Parc Auto »

La seconde voiture des ménages présente la particularité d'être relativement vieille et d'être réservée aux parcours de type "saut de puce". Elle est fréquemment la conséquence d'un

nouvel équipement puisque la voiture nouvellement acquise ne remplace pas l'ancienne, elle la relègue à d'autres usages. Considérée comme fatiguée et moins fiable, l'ancienne voiture est souvent utilisée pour les trajets secondaires du ménage. Elle n'est alors plus utilisée pour les longs trajets comme les déplacements type vacances ou pour les trajets domicile-travail, sauf lorsqu'ils sont relativement courts. Elle sert alors souvent aux déplacements de type « domicile-gare » lorsque le trajet principal est effectué en train. Ces trajets sont très éprouvants pour les moteurs puisqu'il s'agit dans une majorité de cas de trajets urbains dont la distance n'excède pas deux kilomètres et qui ne laissent pas suffisamment de temps pour une montée en température optimale à une mécanique souvent déjà assez éprouvée par l'usage.

L'apparition des véhicules secondaires au sein des ménages a permis d'accompagner et même soutenir le développement de l'activité féminine et l'émancipation des adolescents devenus jeunes conducteurs. Les femmes l'utilisent pour aller travailler mais aussi pour faciliter toute une catégorie d'activités liées à la vie du ménage comme faire les courses, conduire les enfants à l'école, à la crèche ou vers les centres de loisirs, sportifs ou culturels. Les véhicules contribuant au multi-équipement des ménages sont aussi souvent destinés aux jeunes conducteurs (nouveau permis) qui héritent des véhicules de leurs parents. Ils en font usage pour une mobilité de jeune étudiant ou actif, c'est-à-dire pour se rendre à l'université ou plus généralement sur leur lieu d'étude ou de travail mais aussi pour leurs déplacements de loisirs. D'autre part le véhicule secondaire n'est pas toujours un véhicule acheté d'occasion pour la circonstance puisque dans de nombreux cas, c'est l'ancien véhicule toujours en état de fonctionner qui est relégué pour les trajets secondaires du ménage, permettant ainsi de limiter la dépréciation par l'usage du véhicule nouvellement acquis.

1.2.1. Activité féminine et multi-équipement

Deux facteurs communément avancés pour expliquer le phénomène de multi-équipement des ménages. D'une part le développement de l'activité féminine après 1970 et l'étalement urbain. Le développement de l'activité féminine s'est traduit par de nouveaux besoins de mobilités manifestés par la mère de foyer et motivés par une source de revenu supplémentaire au sein du ménage qui ont largement contribué au multi-équipement des ménages. Robin (2010) montre notamment à partir des enquêtes nationales transport (ENTD) que 76% des femmes de plus de 55 ans possèdent le permis en 2008 contre 64% en 1994 et 47% en 1982. Les hommes se situant à un niveau élevé de taux de possession du permis ne gagnent que 2 points sur la période 1994 à 2008. Robin (2010) montre en outre que le phénomène de rattrapage se manifeste également dans la fréquence de conduite puisque les femmes disposant du permis sont 80% à conduire régulièrement (toutes les semaines) en 2008 contre 77% en 1994 (+3

points). Alors que dans le même temps, la fréquence de conduite des hommes est restée stable autour de à 87% de conducteurs réguliers sur la période 1994-2008.

1.2.2. Etalement urbain et multi-équipement

Le multi-équipement s'explique aussi par l'étalement urbain [Andan, 1994 ; Beaucire, 1996 ; Dupuy, 1999, 2006] qui repose sur une logique de localisation qui implique de s'éloigner du centre ville pour s'installer en périphérie afin de diminuer ou de stabiliser le coût résidentiel (coût du loyer ou de remboursement du crédit au mètre carré). L'étalement urbain lorsqu'il n'est pas accompagné d'une offre de transport en commun suffisante provoque ainsi une dépendance à l'automobile [Dupuy, 1999, 2006 ; Collet, 2007]. Cette dépendance ayant pour effet de pousser au développement extensif du système de mobilité recourant à l'automobile. En effet, la localisation dans des espaces moins densément desservis par les services (hôpitaux, pharmacie, boulangerie, hypermarché etc.), avec une offre en transports collectifs à faible fréquence de passage et des distances trop élevées pour la marche ou le vélo, pousse les ménages à acquérir des véhicules secondaires afin de réaliser l'ensemble de leurs déplacements en automobile, en plus du domicile-travail quotidien.

Le multi-équipement a sans conteste participé au vieillissement du parc automobile. Mais il n'est pas une cause en soi, nous expliquons ce multi-équipement par le développement de la biactivité au sein des ménages [Robin, 2010] et par l'étalement urbain [Andan, 1994 ; Beaucire, 1996 ; Dupuy, 1999, 2006]. L'objet de la partie suivante est de montrer l'impact sur le vieillissement du parc de l'accession à la propriété des ménages les plus modestes grâce au développement du marché d'occasion.

1.3. Effet de la démocratisation et de la diffusion sociale de la voiture particulière

Depuis la fin des années 1990, 80% des ménages sont équipés tandis que 20% ne le sont pas [Hivert, 2010]. En 1960, seuls 3 foyers sur 10 étaient équipés. L'équipement automobile a beaucoup bénéficié de la diffusion sociale de l'automobile, qui correspond à la réduction des inégalités en matière d'équipement depuis les années 70. Durant cette période de nombreux ménages modestes ont pu acquérir une « première » voiture [Hivert, 2010].

L'essor du marché du véhicule d'occasion et l'apparition de véhicules de gammes inférieures a participé à la baisse du prix moyen des véhicules et à leur démocratisation. L'évolution de la taille du marché d'occasion depuis 1980 en témoigne (voir tableau 3-7). Le ratio des ventes de véhicules d'occasion sur ventes de véhicules neufs augmente depuis 1980 (~ 2,4) pour finalement stagner autour de 2,6 à 2,7 depuis 2003.

Chapitre 3 Vieillessement du parc automobile français (1984-2008) : facteurs et enjeux

| IMMATRICULATIONS | Unités | 1980 | 1990 | 1995 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 |
|-------------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Voitures neuves (N) | Milliers | 1 873 | 2 309 | 1 931 | 2 134 | 2 255 | 2 145 | 2 009 | 2 014 | 2 068 | 2 001 | 2 065 | 2 050 | 2 269 |
| Voitures d'occasion (O) | Milliers | 4 441 | 4 759 | 4 129 | 5 082 | 5 396 | 5 457 | 5 322 | 5 444 | 5 383 | 5 466 | 5 571 | 5 393 | 5 240 |
| Rapport O/N | | 2,4 | 2,1 | 2,1 | 2,4 | 2,4 | 2,5 | 2,6 | 2,7 | 2,6 | 2,7 | 2,7 | 2,6 | 2,6 |

Tableau 3- 7 Immatriculations de véhicules diesel en unités et en pourcentage des immatriculations totales.
Source : CCFA

Lambert et Madre (1989) ont montré que le vieillissement du parc automobile s'expliquait pour partie par l'évolution du marché de l'occasion. Ils ont observé que la part des voitures acquises d'occasion augmentait dans le parc automobile après être resté stable autour de 49% jusqu'en 1980, cette proportion a ensuite augmenté pour atteindre 54% en 1988. Ils ont ensuite montré que l'âge à l'achat des voitures d'occasion a augmenté en passant de 3,1 ans pour le parc de 1974 à 3,4 ans pour celui de 1986.

Le marché du neuf est fortement dépendant de la santé du marché d'occasion puisque pour les ménages le budget nécessaire à l'achat du véhicule neuf est souvent en relation avec la valeur résiduelle de l'ancien véhicule sur le marché d'occasion. La diffusion sociale et l'accession à la propriété automobile est facilitée par la possibilité d'acheter un véhicule sur le marché d'occasion à des prix devenus abordables pour de petits budgets.

L'accession à l'équipement des ménages modestes en besoin de mobilité poussé par la baisse des prix sur le marché des véhicules d'occasion profite à l'aggravation du vieillissement du parc automobile. D'autre part, aucune étude recensée ne discute le phénomène de multi-équipement des ménages à bas revenus qui peut aussi contribuer fortement au vieillissement du parc automobile par la croissance de la détention de vieux véhicules.

Avec la croissance de la mobilité, le développement inéluctable de l'équipement et le multi-équipement des ménages modestes passe par le marché des véhicules d'occasion. Pourtant les marchés du neuf et de l'occasion sont intimement liés et le développement du marché d'occasion peut se faire au détriment du marché du neuf. La baisse ou la stagnation des ventes de véhicules neufs peut alors être une raison de la hausse de l'âge moyen du parc automobile.

1.4. Effet de la stagnation des immatriculations de véhicules neufs

Nous avons vu que l'explication globale du vieillissement du parc dépend des phénomènes de multi-équipement des ménages et de diffusion sociale de l'équipement. Cependant, la stabilisation du volume des immatriculations de véhicules neufs dans le parc joue, en tant que facteur démographique, un rôle de premier plan sur le vieillissement du parc automobile. Ce déterminant entre en compte dans ce que l'on peut appeler les facteurs de renouvellement du parc. Le mouvement démographique naturel du parc automobile évoluant selon deux

Chapitre 3 Vieillessement du parc automobile français (1984-2008) : facteurs et enjeux

mouvements opposés, les entrées composées des immatriculations de véhicules neufs et les sorties correspondant à la mise au rebut des véhicules.

Le vieillissement, permet alors de mettre en évidence la stagnation du taux de natalité alors que les déclassements du parc s'accroissent. Autrement dit, le flux de nouveaux entrants (ou taux de natalité) n'est plus suffisant pour compenser la baisse du taux de déclassement des vieux véhicules qui aurait permis une stabilisation de l'âge moyen du parc.

En effet, les immatriculations de véhicules neufs stagnent après 1990, année faste pour le marché automobile (~ 2 300 milliers de véhicules immatriculés). Il faut tout de même souligner qu'avec près de 2 250 000 véhicules vendus en France, les années 2001 et 2009 sont aussi des années où les volumes des ventes atteignent des sommets en France (voir figure 3-13).

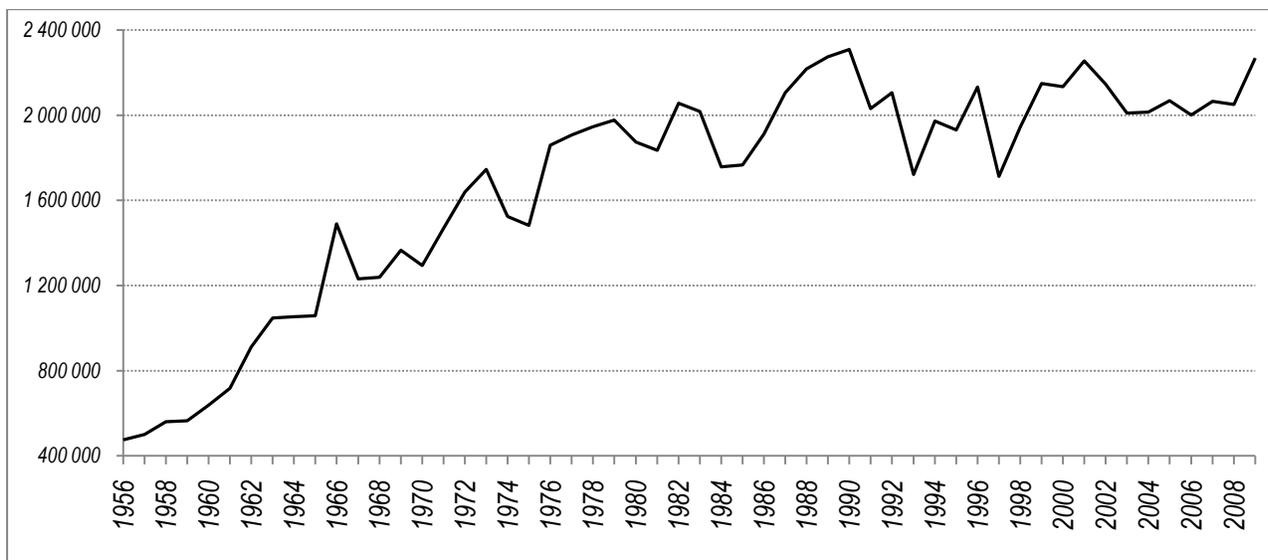


Figure 3- 13 Immatriculations de véhicules particuliers neufs au 31 décembre en France entre 1956 et 2009.
Source : CCFA

Dans le même temps, le volume du parc automobile ne cesse de croître. Le vieillissement du parc automobile s'explique par un effet mécanique global résultant d'une relative stabilité des immatriculations de véhicules neufs donc du flux des entrants (ou des naissances). L'objet du chapitre 4 sera de vérifier si s'ajoute ce phénomène celui d'une baisse du déclassement des véhicules particuliers pouvant entraîner un ralentissement global du renouvellement du parc automobile. Nous aurons alors l'ensemble des variables démographiques permettant de calculer le solde naturel (S) du parc automobile tel que ce solde est donné par les immatriculations de véhicules neufs (I) auquel on retranche les déclassements (D) ce qui donne pour chaque période de temps t : $S_t = I_t - D_t$

2. Le vieillissement du parc automobile selon la double dimension : âge et kilométrage au compteur

La durée de vie d'un véhicule peut être fortement raccourcie si son parcours annuel moyen est important. Au contraire il est possible de garder son véhicule à un âge avancé s'il est peu utilisé. Dans le cas où le véhicule est soumis à une faible intensité d'usage, il peut voir sa durée de vie s'allonger fortement, c'est en partie le cas pour les véhicules de collection. Par exemple, les propriétaires de véhicules de collection compensent l'usage qu'ils en font par une attention plus marquée qui se manifeste par un coût d'entretien plus important que la moyenne. A l'opposé des véhicules de collection, on trouve les conducteurs de taxis qui ont un usage intense de leur véhicule pouvant atteindre un usage annuel proche de 80 000 à 100 000 km/an. A un tel rythme le déclassement d'un taxi est estimé de l'ordre de 3 à 4 ans (voire 5 à 6 ans si le véhicule est très robuste).

Ainsi, chaque véhicule peut être représenté symboliquement par une réserve kilométrique ou un potentiel en kilométrage que l'on peut associer au concept de robustesse du véhicule lui-même en lien avec le prix d'achat du véhicule, la marque, la gamme. La durée de vie du véhicule résulterait de l'usage qui correspond, en théorie et dans l'hypothèse d'un marché sans transaction, à la vitesse à laquelle l'automobiliste parvient à atteindre le kilométrage maximal avant défaillance. Pour comprendre le lien qui existe entre processus de vieillissement ou plus généralement l'âge moyen du parc automobile et la durée de vie des véhicules particuliers, il semble important d'examiner minutieusement l'usage des véhicules en complément de leur âge. S'il est vrai que pour l'ensemble du parc automobile, l'âge se trouve assez bien corrélé avec le kilométrage affiché au compteur, il n'en est pas de même pour une substantielle proportion des véhicules qui composent le parc. Nous décidons d'introduire la dimension du kilométrage affiché au compteur en complément de l'âge du véhicule pour étudier l'évolution temporelle du couple âge-usage des véhicules particuliers.

2.1. Durée de vie et longévité kilométrique du parc automobile

Dans cette section nous cherchons à nous pencher sur la dimension kilométrique du vieillissement à partir du kilométrage affiché au compteur. L'observation du vieillissement des véhicules n'est alors plus uniquement considérée suivant la dimension temporelle mais aussi à travers le prisme de l'usage cumulé. Chaque véhicule (V) observé est alors discriminé selon le couple âge (a), kilométrage au compteur (km): $V(a, km)$, permettant de placer la population de véhicules pour une année donnée (pour chaque année du panel dans notre cas) dans le cadran supérieur droit d'un repère orthonormé selon les dimensions de l'âge et du kilométrage.

La figure 3-14 présente les résultats de la représentation des populations de véhicules comme des couples de points $V(a, km)$ pour chaque année du panel Parc Auto allant de 1984 à 2008. Par souci d'homogénéité et de comparabilité des axes de représentation, tous les véhicules d'âge supérieur à 400 mois (33 ans et 4 mois) ont été retirés par exemple pour éviter de garder les véhicules de collection et certains points aberrants. De la même façon, tous les véhicules dont le kilométrage au compteur dépasse 400 000 kilomètres ont été mis de côté afin d'éviter les (rares) erreurs de déclarations dans chaque vague du panel Parc Auto.

La figure 3-14 permet de montrer que la proportion de véhicules ayant à la fois un âge et un kilométrage au compteur élevés augmente avec le temps. Cette population de véhicules les plus âgés et utilisés reste confinée dans un périmètre inférieur à 200 mois et 200 000 kilomètres en 1984 puis évolue progressivement dès les années 1990 vers la zone 200 000 à 300 000 kilomètres pour 200 à 300 mois. Cette zone est dépassée dans les années 2000 montrant que le vieillissement se manifeste à la fois selon les dimensions de l'âge et de l'usage (voir figures 3-14 et 3-15).

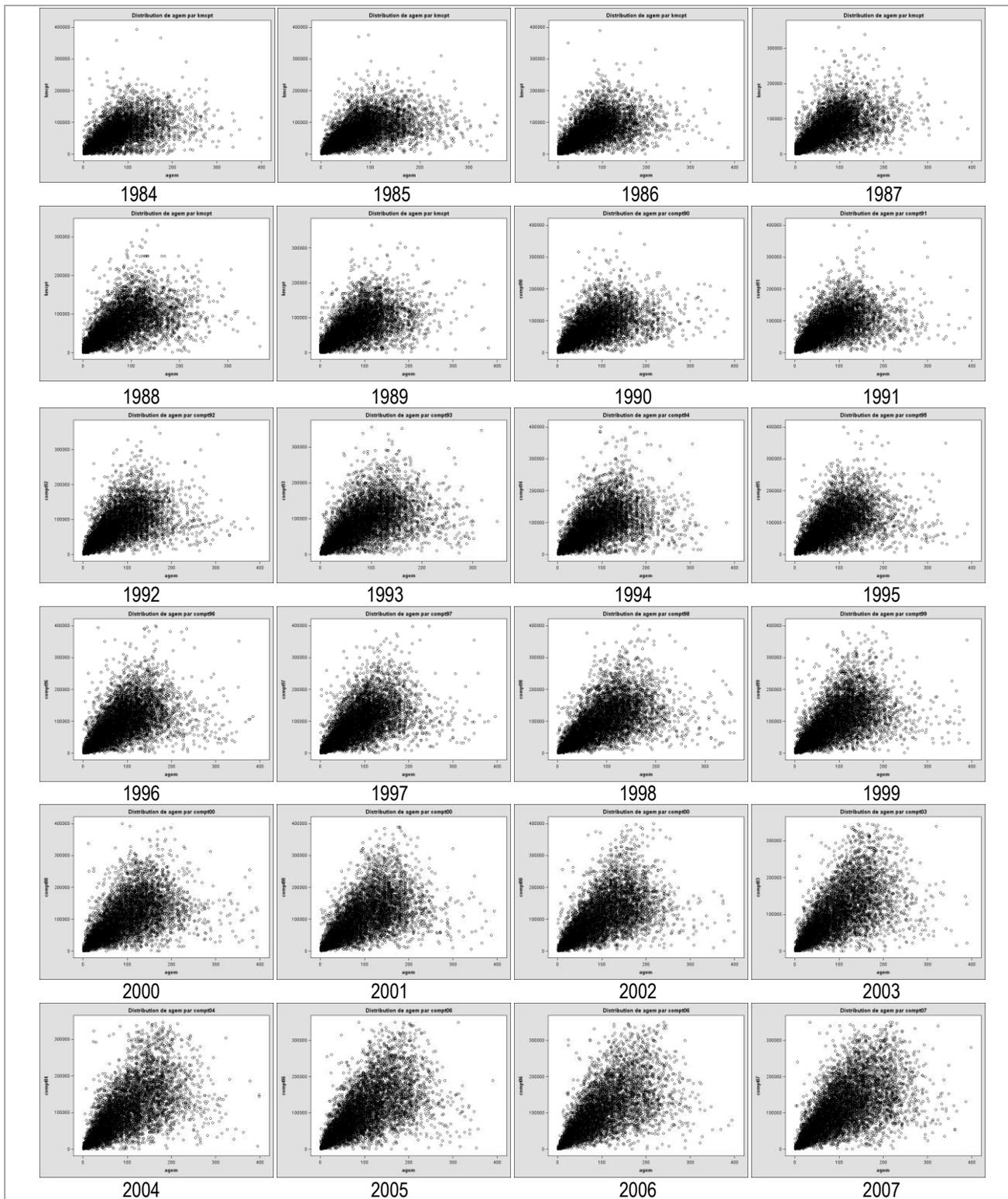


Figure 3- 14 Couples de points âge kilométrage calculés pour chaque véhicule et pour chaque année du panel « Parc Auto »

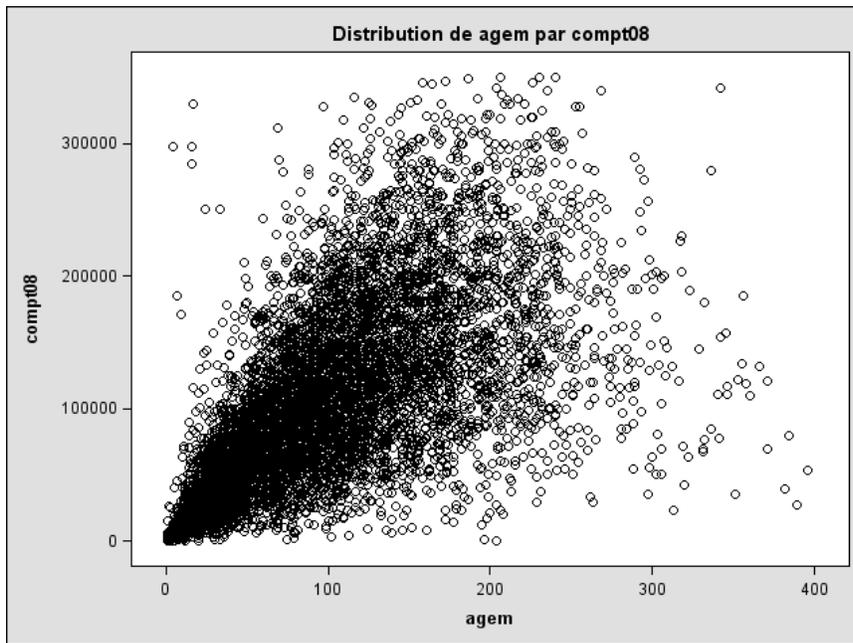


Figure 3- 15 Couples de points âge kilométrage calculés pour chaque véhicule de l'année 2008 du panel « Parc Auto » (dernière vague du panel pour le moment)

Bien que les figures 3-14 et 3-15 soient informatives de l'évolution de l'âge des populations de véhicules par vague du panel Parc Auto, il est assez difficile de distinguer et de saisir aisément les évolutions du vieillissement du parc en raison de la superposition des cercles qui représentent les plus jeunes véhicules ayant les kilométrages cumulés les moins élevés. C'est la raison pour laquelle nous décidons de représenter la distribution tridimensionnelle de la population de véhicules pour chaque année du panel. L'avantage de recourir à une distribution tridimensionnelle tient à la possibilité offerte de pouvoir représenter l'évolution conjointe de l'âge et du kilométrage affiché au compteur pour chaque année. La lecture visuelle de l'évolution des distributions bivariées sera facilitée par le marquage de zones délimitées à l'aide de courbes de niveaux. Le choix des niveaux restent tant que possible identiques afin de préserver un maximum de comparabilité visuelle d'une année sur l'autre.

Les vingt-cinq distributions tridimensionnelles (une par vague du panel entre 1984 et 2008) sont construites en recourant au noyau d'une loi normale. Ainsi si l'on pose $X_i = (x_i, y_i), i \in \llbracket 1, n \rrbracket$ un échantillon de taille n issu de la distribution empirique. Une estimation de la densité du noyau de $f(x, y)$ basé sur chaque échantillon du panel Parc Auto est donnée par:

$$\hat{f}(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varphi(x - X_i, y - Y_i) = \frac{1}{nh_x h_y} \sum_{i=1}^n \varphi\left(\frac{x - X_i}{h_x}, \frac{y - Y_i}{h_y}\right)$$

Avec $(x, y) \in \mathbb{R}^2, h_x > 0, h_y > 0$ correspondant aux largeurs de bande.

$\varphi_h(x, y)$ la densité normale rééchelonnée est donnée par:

$$\varphi_h(x, y) = \frac{1}{h_x h_y} \varphi\left(\frac{x}{h_x}, \frac{y}{h_y}\right)$$

Et où $\varphi(x, y)$ représente la densité normale bivariée standard :

$$\varphi(x, y) = \frac{1}{2\pi} e^{-\frac{x^2+y^2}{2}}$$

La construction de la fonction des densités bivariées (pour chaque année) se fait en deux étapes. La première étape consiste à créer l'histogramme tridimensionnel (voir annexe 3-1), celui-ci fournit la taille de l'effectif par catégories de kilométrages cumulés et d'âges. Nous en donnons un exemple sur la figure 3-16 pour la vague 2008 du panel Parc Auto. La seconde étape consiste à effectuer l'estimation de la densité à partir des données de l'histogramme en passant par le noyau d'une loi normale (voir figures 3-17(a) et 3-17(b)) (se reporter à l'annexe 3-2 pour les densités données pour chaque vague du panel Parc Auto).

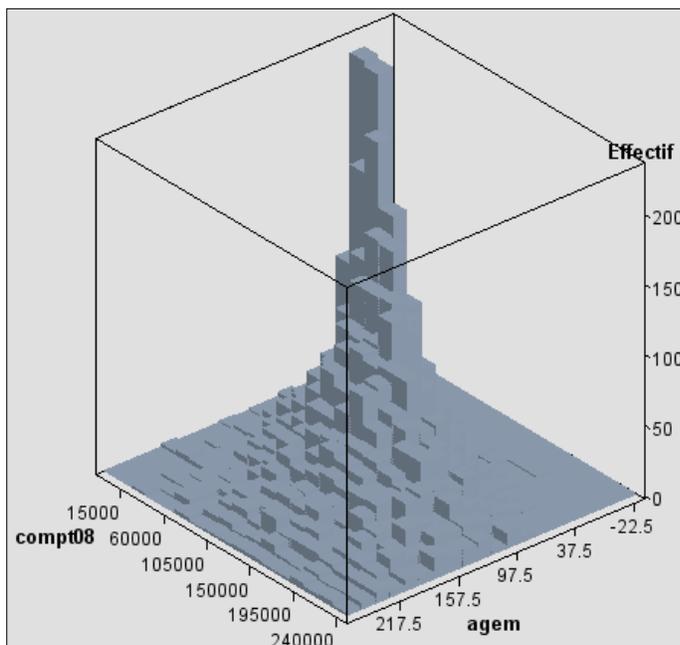


Figure 3- 16 Histogramme bivarié calculé pour la vague 2008 du panel « Parc Auto »

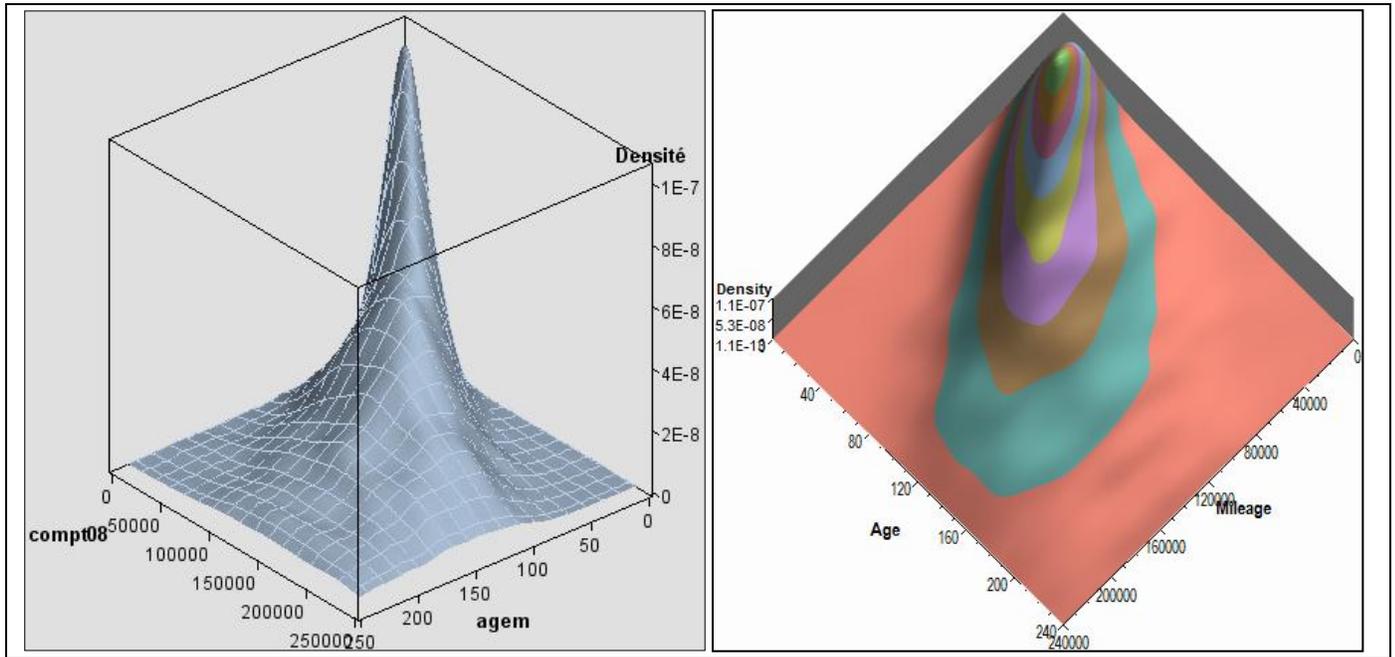


Figure 3- 17 (a) et (b) – Densités bivariées (vu face (a), vue dessus (b)) calculées pour la vague 2008 du panel « Parc Auto »

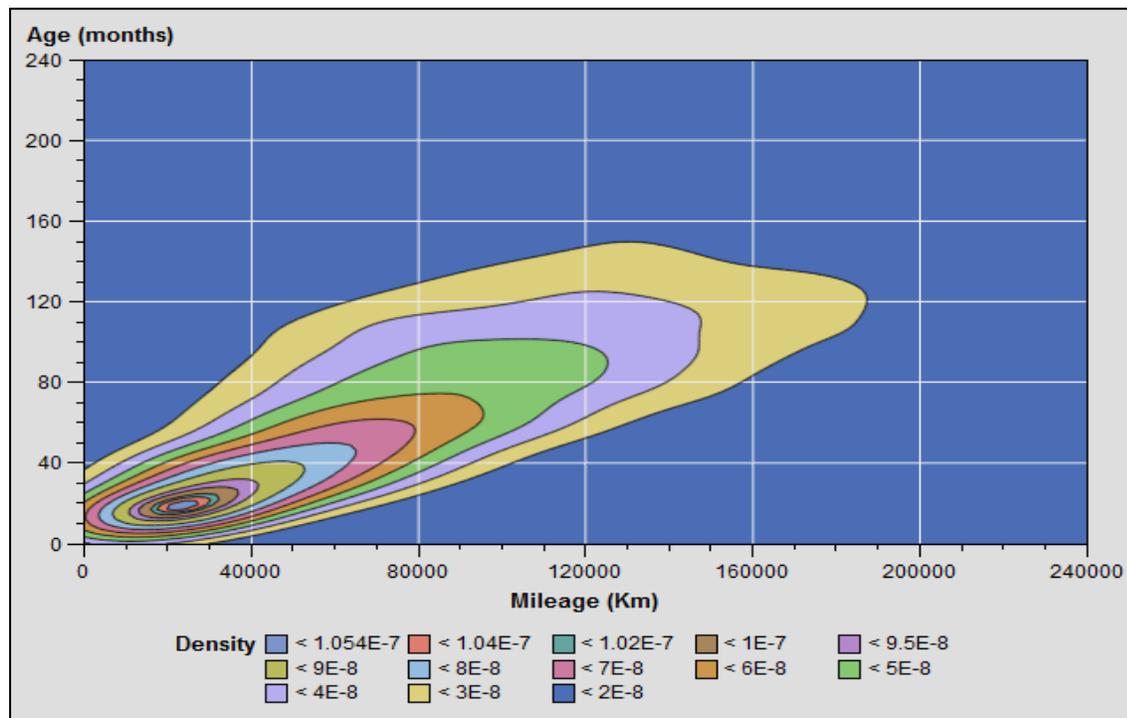


Figure 3- 18 Distribution bivariée représentée à l'aide de courbes de niveaux pour la vague 2008

Pour faciliter la présentation visuelle, les distributions bivariées sont toutes constituées du même nombre de courbes de niveaux (treize). Elles sont par ailleurs toutes présentées dans un cadran de 240 mois sur 240 000 kilomètres ce qui facilite la comparabilité.

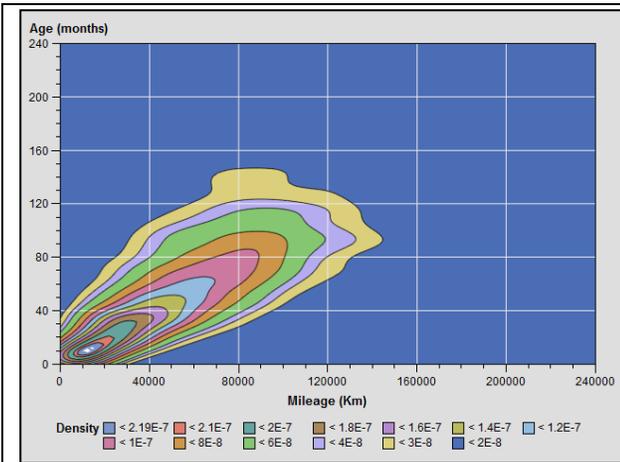


Figure 3 - 19.1 : Distribution bivariée calculée sur la vague 1985

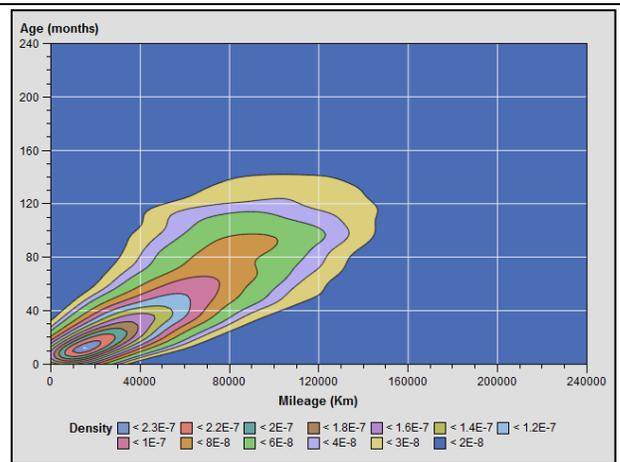


Figure 3 - 19.2 : Distribution bivariée calculée sur la vague 1990

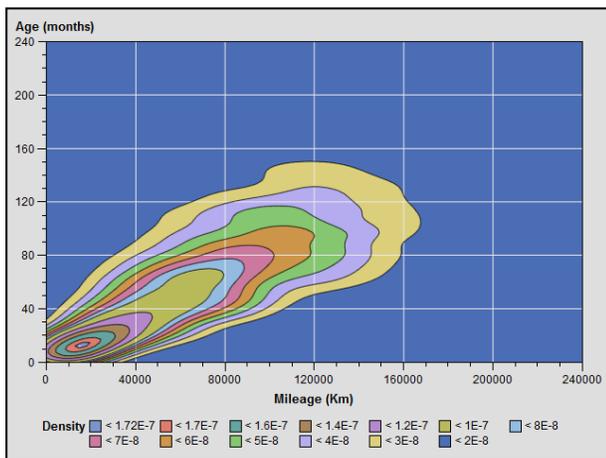


Figure 3 - 19.3 : Distribution bivariée calculée sur la vague 1995

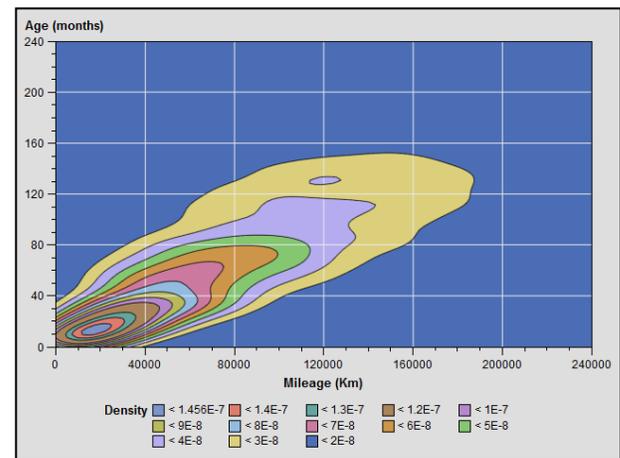


Figure 3 - 19.4 : Distribution bivariée calculée sur la vague 2000

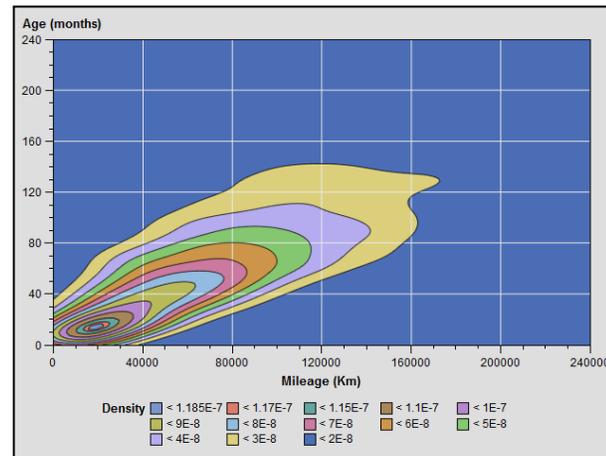


Figure 3 - 19.5 : Distribution bivariée calculée sur la vague 2005

Figure 3- 19 Distributions bivariées représentées à l'aides de courbes de niveaux pour les vagues 1985 à 2005 du panel « Parc Auto »

L'étalement et l'allongement progressifs des distributions, observés depuis 1984, selon nos deux dimensions, confirment que nous sommes dans un processus structurel de vieillissement kilométrique et de vieillissement en âge du parc automobile. Alors qu'en 1984 la densité bivariée dépasse légèrement la limite 120 mois pour 120 000 kilomètres, en 2002 cette densité atteint presque la limite 160 mois pour 180 000 kilomètres et reste très étirée jusqu'en 2008. On remarque d'autre part que ces densités représentées à l'aide de courbes de niveaux, ont toutes une forme ovoïde comparable à des « coques de mollusques » (huitres ou moules par exemple). Ces distributions admettent par ailleurs une quasi-symétrie axiale autour de la droite $y=x/1000$ (y étant l'âge en mois et x le kilométrage cumulé) symptomatique d'un comportement quasi-équilibré pour chaque vague du panel et d'un usage moyen des véhicules tout de même assez souvent supérieur à 1000 km par mois. Ces figures montrent aussi que les dimensions d'âge et de kilométrage cumulé des véhicules permettent d'équilibrer les distributions bivariées et ainsi de justifier de la pertinence du choix du kilométrage cumulé comme variable explicative de la survie des véhicules dans le parc.

Les figures 3-15 à 3-21, nous permettent de comparer visuellement les évolutions associées à l'allongement des courbes bivariées symptomatiques d'un vieillissement structurel du parc. Il est aussi possible de mesurer le vieillissement structurel du parc automobile selon les dimensions conjointes en travaillant sur les percentiles de nos distributions jointes. Les percentiles sont donnés pour 13 catégories (0.5 ; 1 ; 2.5 ; 5 ; 10 ; 25 ; 50 ; 75 ; 90 ; 95 ; 97.5 ; 99 ; 99.5) pour chaque année du panel (1984-2008) dans le tableau 3-8⁴³.

⁴³

La première colonne de la première ligne du tableau, correspondant à l'année 1984, se lit comme suit : 0,5% de la vague 1984 du panel Parc-Auto à conjointement un âge et un kilométrage inférieurs à 1 mois et 900 kilomètres :

$$P(\text{age} \leq 1 \cap \text{kilométrage} \leq 900) = 0.005$$

Chapitre 3 Vieillesse du parc automobile français (1984-2008) : facteurs et enjeux

| Année | Percentiles | 0.5 | 1.0 | 2.5 | 5.0 | 10.0 | 25.0 | 50.0 | 75.0 | 90.0 | 95.0 | 97.5 | 99.0 | 99.5 |
|-------|-------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1984 | Age (mois) | 1 | 1 | 3 | 6 | 12 | 27 | 60 | 96 | 139 | 168 | 199 | 245 | 266 |
| | Kilométrage | 900 | 1500 | 3000 | 5600 | 11000 | 25398 | 54000 | 86000 | 118000 | 136609 | 158000 | 180831 | 202000 |
| 1985 | Age (mois) | 1 | 2 | 4 | 7 | 13 | 31 | 60 | 97 | 141 | 168 | 198 | 240 | 269 |
| | Kilométrage | 1200 | 1750 | 3700 | 7206 | 13080 | 29500 | 57218 | 89518 | 120360 | 142000 | 161180 | 186000 | 207000 |
| 1986 | Age (mois) | 0.5 | 1 | 2.5 | 4.6 | 9.4 | 30 | 59 | 97 | 134 | 162 | 186 | 222 | 244 |
| | Kilométrage | 564 | 1100 | 2500 | 5340 | 11170 | 29500 | 57514 | 91227 | 123000 | 142600 | 164217 | 193000 | 207900 |
| 1987 | Age (mois) | 0.5 | 1 | 2.5 | 5 | 9.2 | 27 | 60 | 98 | 137 | 166 | 194 | 226 | 249 |
| | Kilométrage | 560 | 1100 | 2500 | 5300 | 11043 | 29000 | 58087 | 92000 | 125425 | 146000 | 168000 | 200000 | 224000 |
| 1988 | Age (mois) | 0.5 | 0.9 | 2.5 | 5 | 9.3 | 26.5 | 61 | 99.6 | 141 | 173 | 198 | 229 | 249 |
| | Kilométrage | 400 | 875 | 2000 | 4592 | 11000 | 29000 | 60000 | 95000 | 128348 | 150000 | 170000 | 200500 | 222139 |
| 1989 | Age (mois) | 0.5 | 0.9 | 2.3 | 4.3 | 8.4 | 25 | 57.7 | 98.7 | 137 | 165 | 198 | 223 | 246 |
| | Kilométrage | 553 | 856 | 2150 | 5004 | 10500 | 26193 | 58000 | 93000 | 128000 | 150000 | 174000 | 198500 | 214796 |
| 1990 | Age (mois) | 1 | 2 | 4 | 6 | 12 | 26 | 59 | 101 | 143 | 170 | 204 | 237 | 271 |
| | Kilométrage | 1250 | 2100 | 4300 | 7304 | 13495 | 30540 | 60012 | 97000 | 131925 | 156103 | 180000 | 207820 | 230000 |
| 1991 | Age (mois) | 1 | 2 | 4 | 7 | 13 | 30 | 60 | 104 | 143 | 168 | 200 | 240 | 270 |
| | Kilométrage | 1500 | 2400 | 4987 | 8500 | 14956 | 32920 | 63000 | 100000 | 136800 | 161000 | 185000 | 214000 | 236320 |
| 1992 | Age (mois) | 1 | 2 | 5 | 8 | 14 | 33 | 62 | 105 | 143 | 168 | 194 | 245 | 268 |
| | Kilométrage | 1805 | 2676 | 5100 | 9000 | 15261 | 35545 | 67000 | 104325 | 142450 | 167035 | 188750 | 223973 | 248000 |
| 1993 | Age (mois) | 1 | 2 | 5 | 9 | 15 | 35 | 66 | 107 | 144 | 170 | 197 | 240 | 264 |
| | Kilométrage | 1674 | 2300 | 4800 | 8400 | 15500 | 35850 | 70000 | 109500 | 148200 | 175000 | 199520 | 233398 | 258032 |
| 1994 | Age (mois) | 1 | 2 | 5 | 8 | 14 | 36 | 68 | 108 | 149 | 178 | 204 | 250 | 276 |
| | Kilométrage | 1350 | 2118 | 4200 | 8000 | 14390 | 36000 | 71507 | 112000 | 154950 | 181400 | 212000 | 248000 | 280000 |
| 1995 | Age (mois) | 1 | 2 | 5 | 8 | 14 | 35 | 69 | 108 | 146 | 173 | 203 | 249 | 285 |
| | Kilométrage | 1685 | 2500 | 4900 | 8797 | 15369 | 37000 | 74002 | 117000 | 156980 | 182929 | 209580 | 245312 | 262625 |
| 1996 | Age (mois) | 2 | 2 | 4 | 7 | 13 | 33 | 69 | 108 | 149 | 176 | 203 | 248 | 287 |
| | Kilométrage | 1458 | 2612 | 4980 | 8000 | 14270 | 35735 | 74855 | 120000 | 162800 | 193000 | 219208 | 258000 | 289000 |
| 1997 | Age (mois) | 1 | 2 | 5 | 8 | 16 | 35 | 72 | 112 | 153 | 179 | 204 | 241 | 276 |
| | Kilométrage | 1600 | 2800 | 5400 | 9177 | 16000 | 37000 | 77307 | 124000 | 165103 | 194500 | 222000 | 260000 | 283501 |
| 1998 | Age (mois) | 1 | 2 | 4 | 8 | 14 | 35 | 72 | 117 | 156 | 182 | 205 | 250 | 285 |
| | Kilométrage | 1500 | 2500 | 5000 | 9000 | 16000 | 37122 | 77200 | 126882 | 173000 | 203000 | 230009 | 275123 | 298521 |
| 1999 | Age (mois) | 1 | 2 | 4 | 8 | 14 | 34 | 72 | 120 | 160 | 185 | 212 | 252 | 284 |
| | Kilométrage | 1850 | 3000 | 5500 | 9500 | 16600 | 36500 | 77540 | 130000 | 177500 | 209538 | 240000 | 285500 | 310000 |
| 2000 | Age (mois) | 1 | 2 | 4 | 8 | 13 | 33 | 74 | 124 | 166 | 192 | 218 | 259 | 294 |
| | Kilométrage | 1535 | 2500 | 5000 | 9114 | 15962 | 36850 | 78326 | 131500 | 180000 | 210000 | 245010 | 276762 | 300000 |
| 2001 | Age (mois) | 1 | 2 | 5 | 7 | 14 | 33 | 75 | 127 | 169 | 192 | 218 | 250 | 287 |
| | Kilométrage | 2400 | 3386 | 5790 | 9450 | 16000 | 37486 | 80000 | 134423 | 185637 | 218102 | 252000 | 292000 | 318000 |
| 2002 | Age (mois) | 1 | 2 | 5 | 8 | 15 | 35 | 75 | 127 | 169 | 194 | 217 | 248 | 273 |
| | Kilométrage | 2000 | 3000 | 5600 | 10000 | 16850 | 37494 | 79120 | 133356 | 187000 | 220549 | 253000 | 298002 | 329500 |
| 2003 | Age (mois) | 1 | 2 | 5 | 9 | 16 | 35 | 73 | 126 | 170 | 198 | 223 | 257 | 284 |
| | Kilométrage | 1385 | 2250 | 5500 | 9598 | 17150 | 38000 | 77000 | 132321 | 190000 | 225000 | 256000 | 297691 | 314434 |
| 2004 | Age (mois) | 1 | 2 | 5 | 8 | 16 | 37 | 75 | 126 | 175 | 201 | 228 | 264 | 285 |
| | Kilométrage | 1428 | 2760 | 5850 | 9851 | 17500 | 39593 | 80000 | 134290 | 190207 | 229310 | 265384 | 300200 | 315910 |
| 2005 | Age (mois) | 1 | 2 | 5 | 9 | 17 | 40 | 77 | 131 | 181 | 206 | 230 | 263 | 288 |
| | Kilométrage | 1500 | 2580 | 5500 | 10400 | 18000 | 41250 | 81564 | 135000 | 192000 | 228780 | 257000 | 296700 | 318015 |
| 2006 | Age (mois) | 2 | 4 | 10 | 15 | 22 | 45 | 84 | 137 | 187 | 214 | 239 | 274 | 290 |
| | Kilométrage | 2160 | 3750 | 8745 | 13746 | 22600 | 45800 | 88423 | 140000 | 196909 | 232300 | 265000 | 300000 | 318701 |
| 2007 | Age (mois) | 2 | 5 | 9 | 14 | 22 | 46 | 89 | 140 | 192 | 220 | 242 | 273 | 295 |
| | Kilométrage | 2382 | 4200 | 8935 | 14975 | 23980 | 49705 | 92258 | 146000 | 201123 | 238000 | 269000 | 300000 | 315000 |
| 2008 | Age (mois) | 3 | 5 | 9 | 14 | 21 | 45 | 89 | 137 | 191 | 222 | 245 | 285 | 307 |
| | Kilométrage | 2400 | 4000 | 8012 | 13400 | 22000 | 48567 | 90840 | 145863 | 202200 | 239501 | 270030 | 300000 | 319204 |

Tableau 3- 8 Centiles par vagues annuelles du panel (1984-2008). Source : Parc Auto

Chapitre 3 Vieillessement du parc automobile français (1984-2008) : facteurs et enjeux

Les principaux résultats du tableau 3-9 confirment le vieillissement structurel du parc automobile selon les dimensions conjointes âge et kilométrage au compteur. Ils sont résumés sur la figure 3-23 qui regroupe l'évolution des centiles par période de 5 années depuis 1985. En effet, entre 1985 et 2005, l'évolution du vieillissement du parc observé par centile et par période de 5 années se fait de façon progressive. En 1985, 99,5% du parc affiche moins de 269 mois et moins de 207 000 kilomètres (voir tableau 3-9). En 2005, 99,5% du parc affiche conjointement moins de 288 mois et moins de 318 015 kilomètres (voir tableau 3-9). Ainsi entre 1985 et 2005, les 0,5% des véhicules les plus vieux gagnent près de 1,6 an et 111 000 kilomètres montrant ainsi une forte stagnation de ces véhicules dans le parc. Les véhicules les plus jeunes du parc sont aussi de plus en plus vieux. En effet, 5% du parc en 1985 a moins de 6 mois et moins de 5600 kilomètres. En 2008 cette même proportion a moins de 14 mois et moins de 13 400 kilomètres. La part des véhicules situés sous le 5^e centile gagne donc 8 mois et 7 800 kilomètres entre 1984 et 2008.

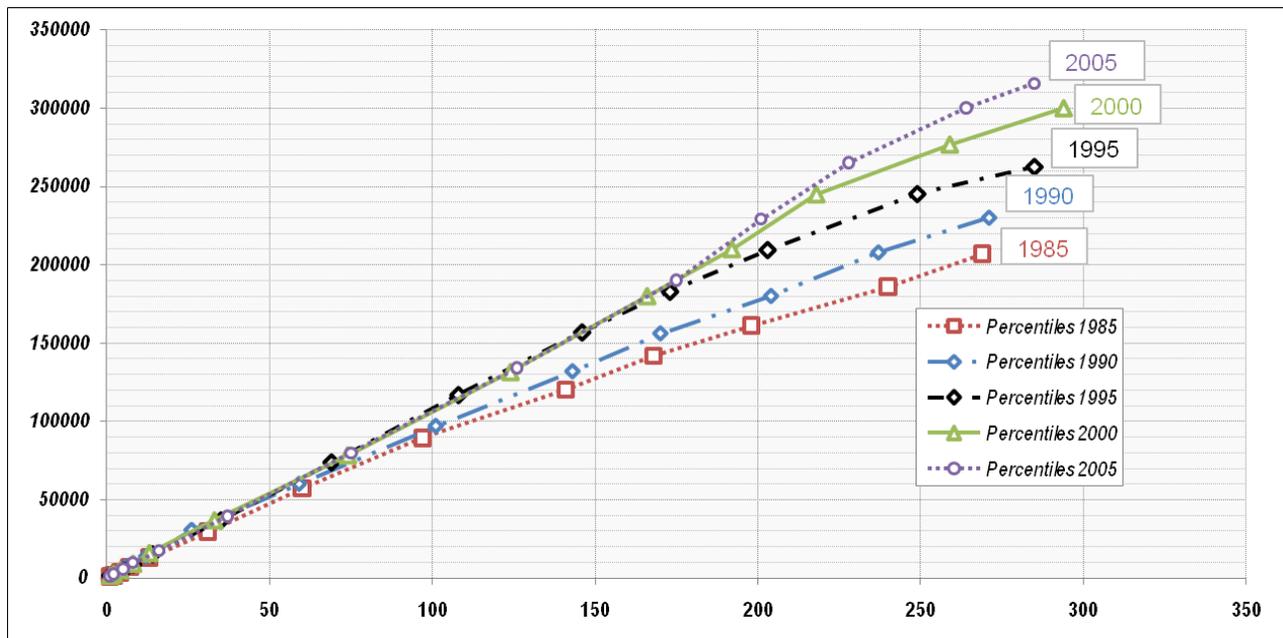


Figure 3- 20 Centiles du couple âge-kilométrage par périodes de 5 années depuis 1985.

De la même façon le vieillissement du parc est visible sur l'ensemble des centiles pour la période 1984 à 2008. Ceci tend à confirmer la thèse du vieillissement structurel du parc sans distinction de catégorie de percentiles (voir tableau 3-9). La figure 3-20 nous permet de visualiser cette évolution du vieillissement par tranche de 5 années de 1985 à 2005 et par centiles. On s'aperçoit ainsi que le vieillissement affecte l'ensemble des percentiles suivant nos deux dimensions retenues, âge ou kilométrage cumulé.

2.2. Durée de vie et longévité kilométrique par type de motorisation

Nous cherchons à identifier l'effet de la diésélisation sur la longévité des véhicules dans le parc automobile, nous nous intéresserons ici à la proportion de véhicules de plus de 20 ans présents dans le panel Parc Auto pour les années 2000 à 2008 en distinguant les motorisations essence et diesel. Les vagues antérieures à 2000 ne comportent pas assez de véhicules à moteur diesel de plus de 20 ans pour nous apporter des résultats exploitables et suffisamment significatifs d'une quelconque différence de durée de vie⁴⁴. Nous pouvons alors déterminer la population de véhicules parmi les catégories essence et diesel qui possède la plus grande longévité kilométrique et l'âge le plus élevé. Les figures 3-21 à 3-29 représentent les populations de véhicules à moteur essence et diesel de plus de 20 ans en activité dans le parc durant la période 2000 à 2008.

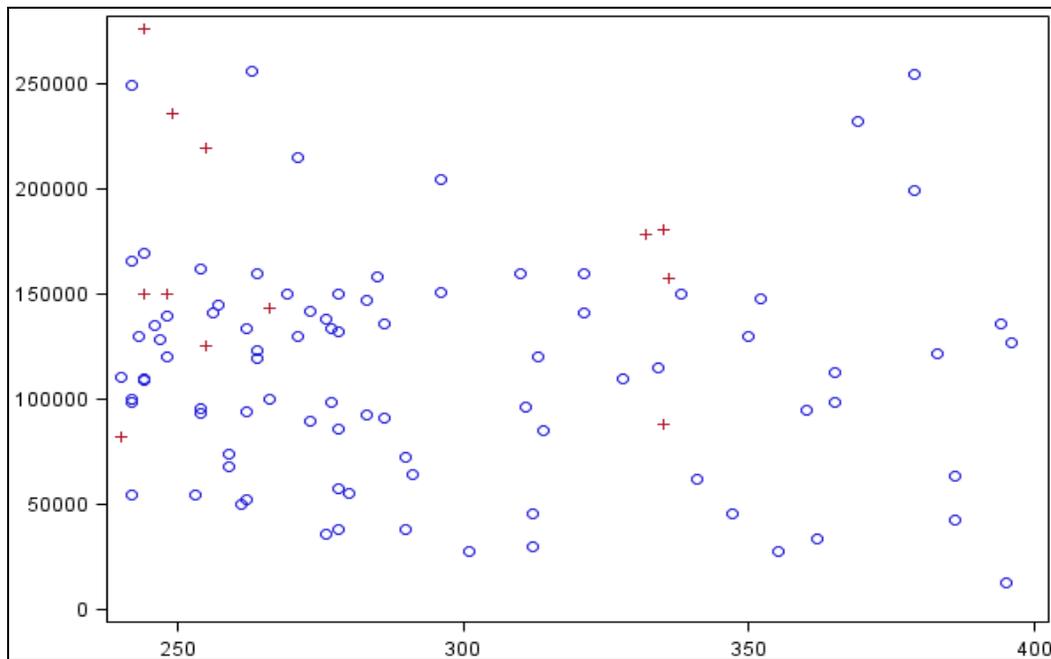


Figure 3- 21 Population de véhicules de plus de 20 ans (essence : cercles bleus et diesel : croix rouges) pour la vague 2000

⁴⁴ Seuls 4% du parc est diesel en 1980 soit 20 années avant l'an 2000.

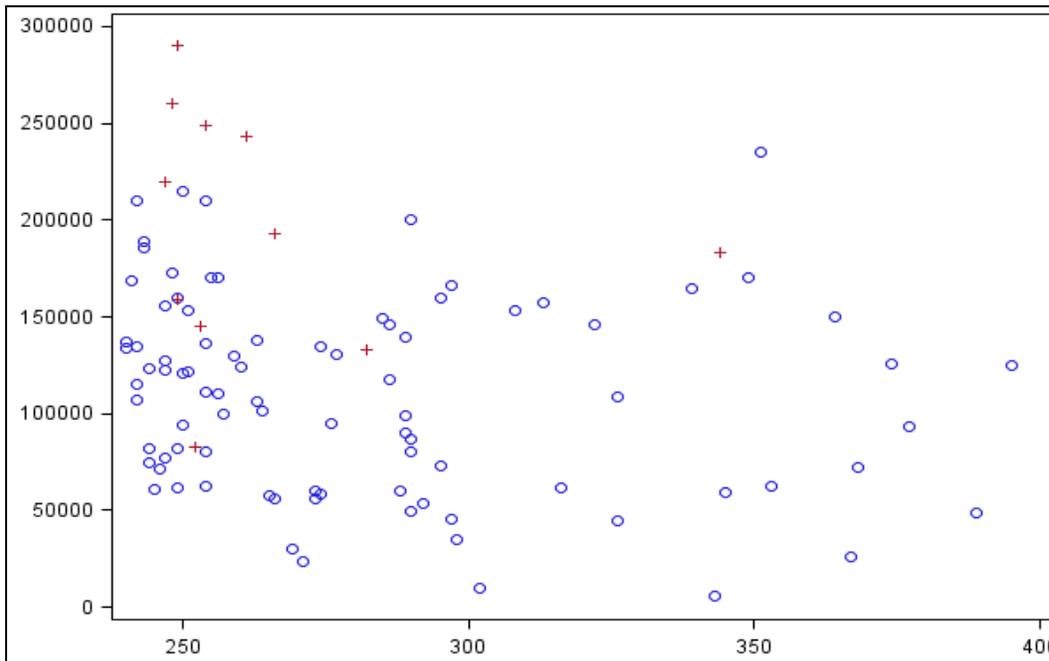


Figure 3- 22 Population de véhicules de plus de 20 ans (essence : cercles bleus et diesel : croix rouges) pour la vague 2001

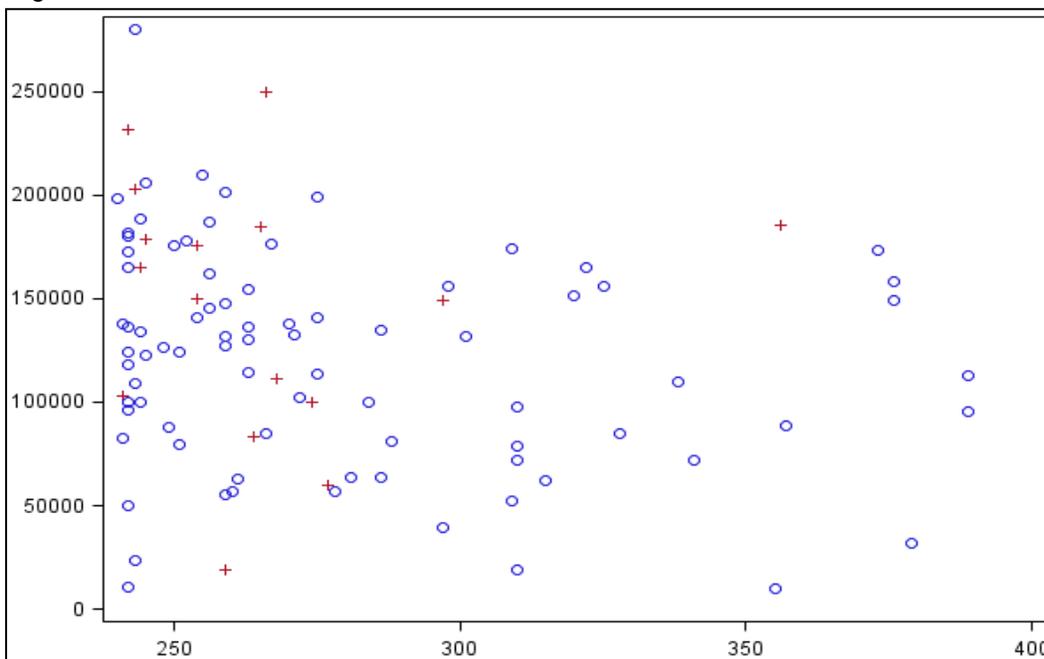


Figure 3- 23 Population de véhicules de plus de 20 ans (essence : cercles bleus et diesel : croix rouges) pour la vague 2002

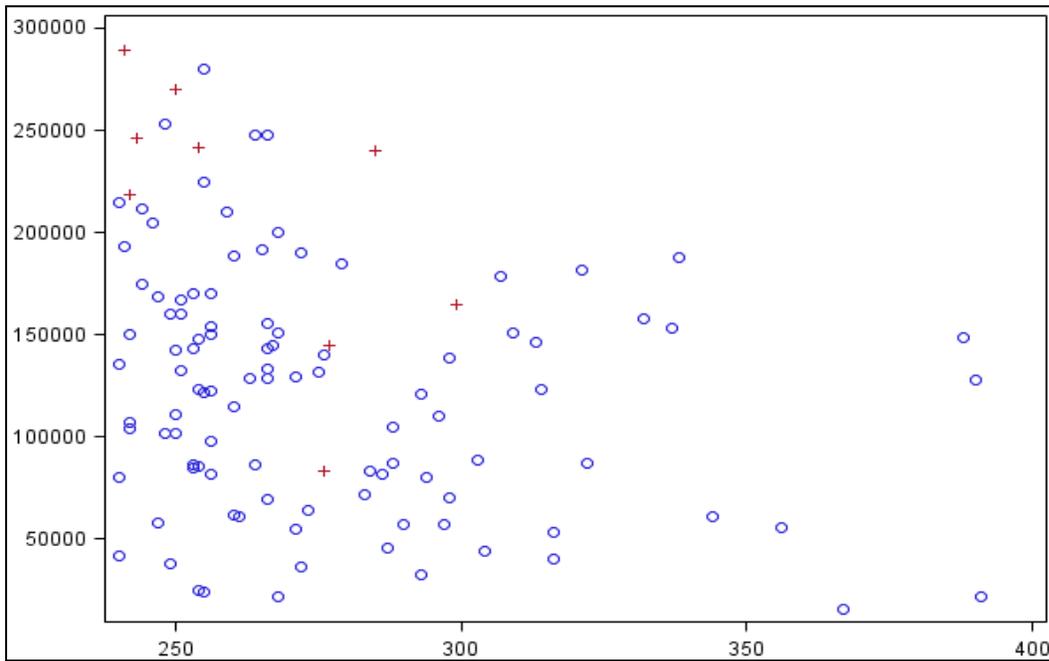


Figure 3- 24 Population de véhicules de plus de 20 ans (essence : cercles bleus et diesel : croix rouges) pour la vague 2003

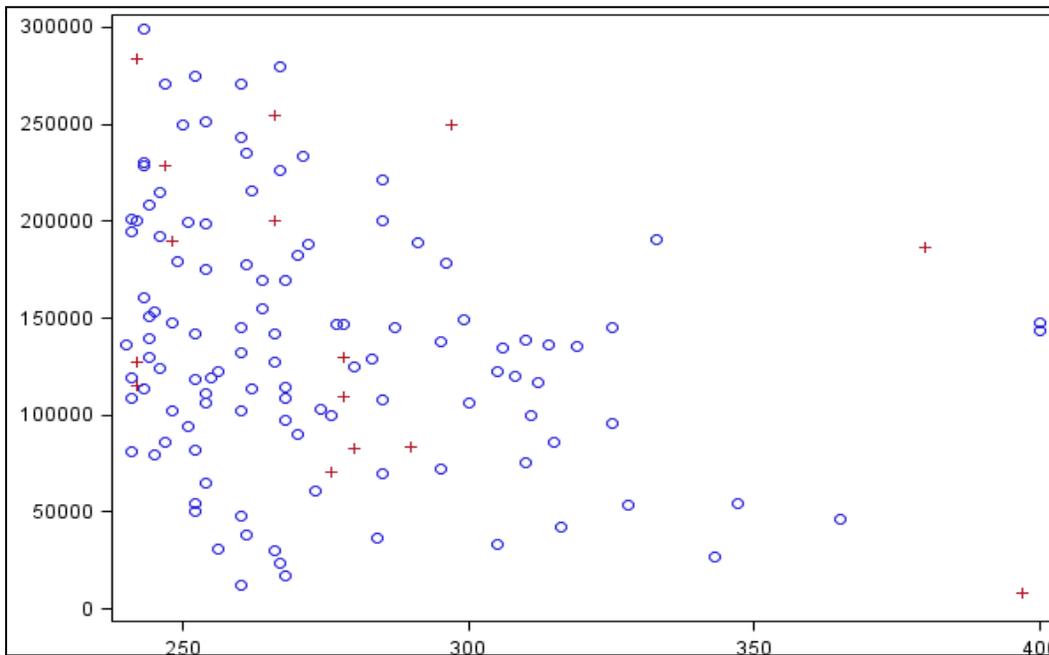


Figure 3- 25 Population de véhicules de plus de 20 ans (essence : cercles bleus et diesel : croix rouges) pour la vague 2004

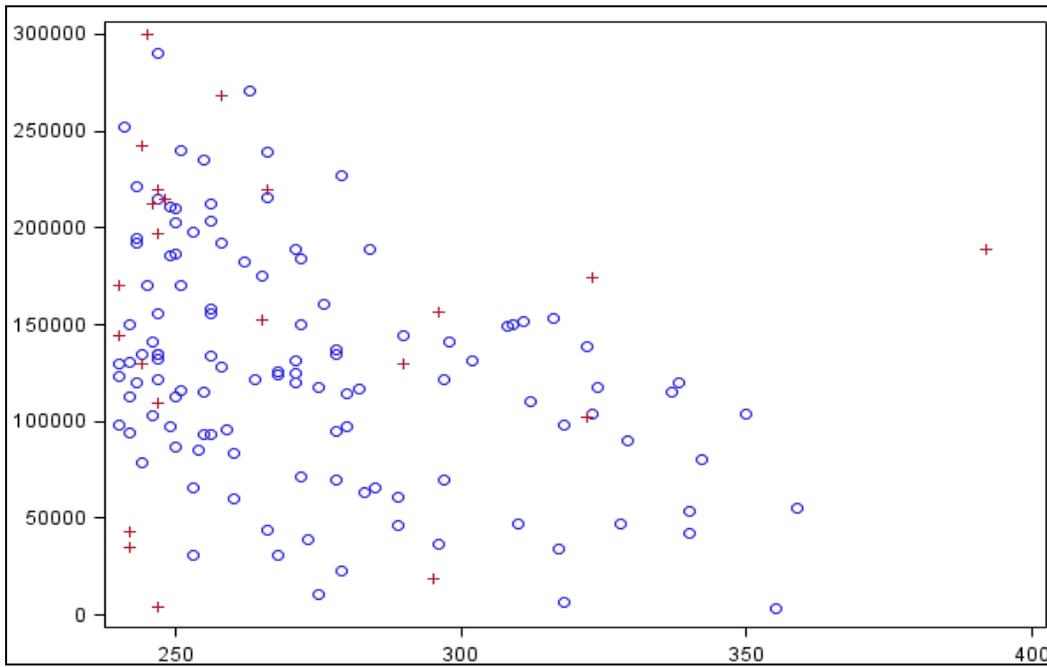


Figure 3- 26 Population de véhicules de plus de 20 ans (essence : cercles bleus et diesel : croix rouges) pour la vague 2005

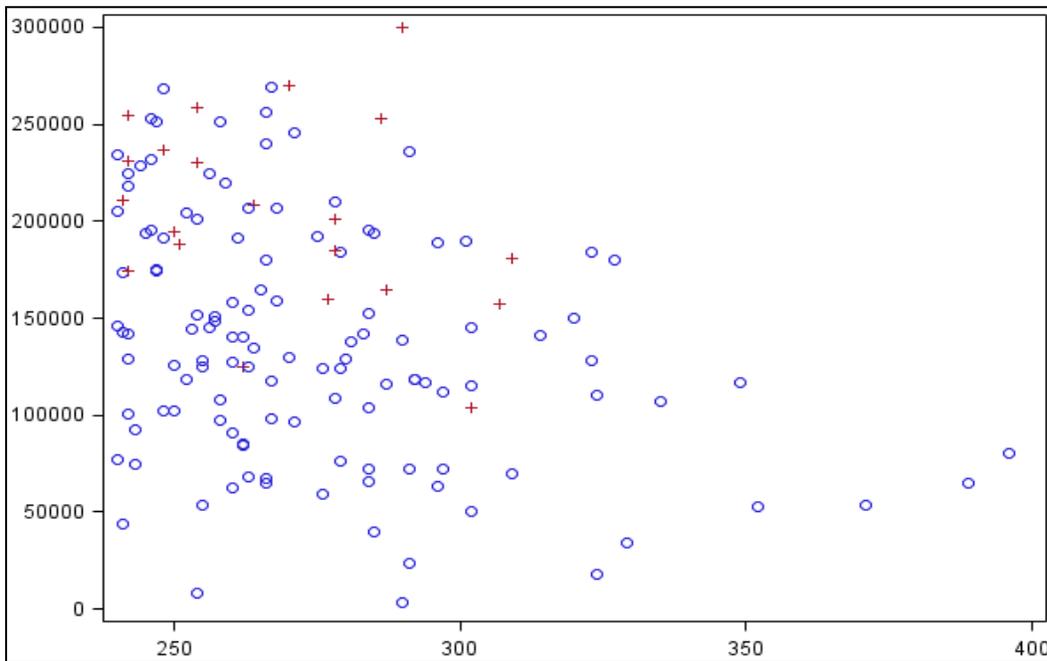


Figure 3- 27 Population de véhicules de plus de 20 ans (essence : cercles bleus et diesel : croix rouges) pour la vague 2006

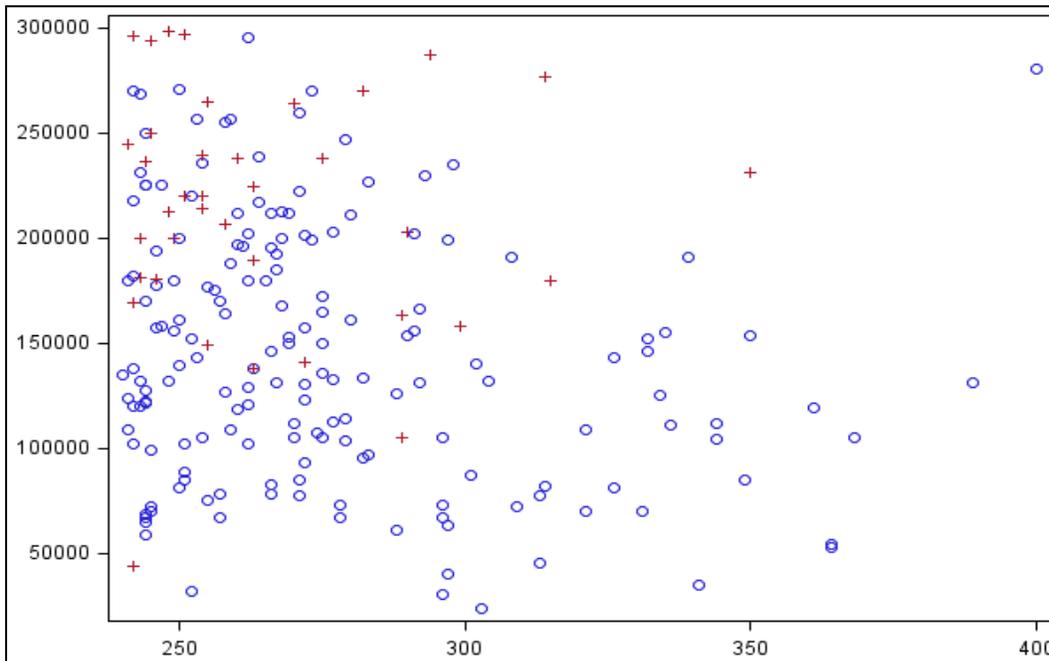


Figure 3- 28 Population de véhicules de plus de 20 ans (essence : cercles bleus et diesel : croix rouges) pour la vague 2007

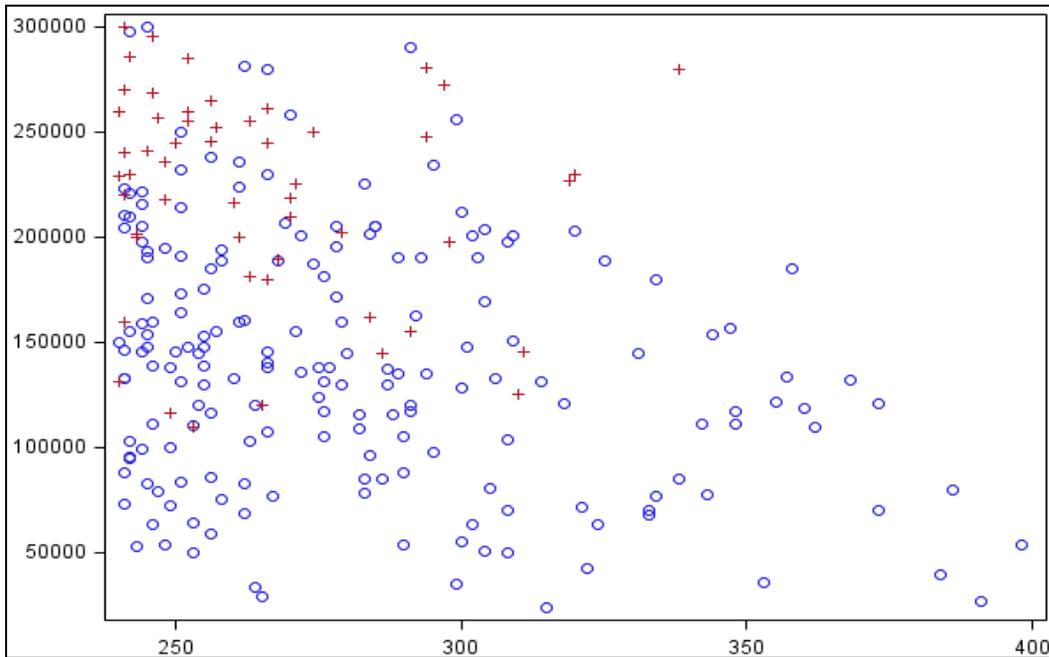


Figure 3- 29 Population de véhicules de plus de 20 ans (essence : cercles bleus et diesel : croix rouges) pour la vague 2008

La proportion de véhicules à moteur diesel de plus de 20 ans passe de 12% en 2000 à 22% en 2008 ce qui est largement en dessous de la proportion de véhicules à moteur diesel dans le parc en 2000 (36,7%) et en 2008 (53,9%) (voir tableau 3-9). Les proportions présentées ne sont pas relatives, elles sont à relier aux parts de véhicules à moteur diesel observées en 1980 (soit 20 ans avant 2000) et en 1988 (20 années avant 2008). La proportion de véhicules à moteur diesel dans le parc s'élève à 4% en 1980 et à 11% en 1988, soit des valeurs largement

Chapitre 3 Vieillessement du parc automobile français (1984-2008) : facteurs et enjeux

inférieures à celles observées pour les véhicules à moteur diesel ayant plus de 20 ans en 2000 et en 2008. Les résultats obtenus montrent sans ambiguïté que les véhicules à moteur diesel sont plus enclins à survivre après 20 ans que les véhicules à moteur essence. Une différence en matière de durée de vie pourra être estimée dans le chapitre 4 en comparant des paramètres de lois de survie ajustées par type d'énergie (essence/diesel).

| Année | Energie | Nombre de véhicules | Proportion | Age moyen (années) | Age Ecart-type (années) | Kilométrage cumulé moyen | Kilométrage cumulé Ecart-type |
|-------|---------|---------------------|------------|--------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| 2000 | Essence | 86 | 87,76% | 24,5 | 3,8 | 113 333 | 53 332 |
| | Diesel | 12 | 12,24% | 23,2 | 3,5 | 165 743 | 57 410 |
| 2001 | Essence | 88 | 88,89% | 23,5 | 3,4 | 110 035 | 50 924 |
| | Diesel | 11 | 11,11% | 22,0 | 2,4 | 196 236 | 62 837 |
| 2002 | Essence | 82 | 83,67% | 23,3 | 3,5 | 120 517 | 52 477 |
| | Diesel | 16 | 16,33% | 22,1 | 2,4 | 146 901 | 62 987 |
| 2003 | Essence | 101 | 91,82% | 23,0 | 2,9 | 121 667 | 59 061 |
| | Diesel | 9 | 8,18% | 21,9 | 1,8 | 210 861 | 66 651 |
| 2004 | Essence | 113 | 88,28% | 22,8 | 2,7 | 135 894 | 65 242 |
| | Diesel | 15 | 11,72% | 23,5 | 3,9 | 154 753 | 79 859 |
| 2005 | Essence | 116 | 83,45% | 22,8 | 2,5 | 126 499 | 60 107 |
| | Diesel | 23 | 16,55% | 22,2 | 3,1 | 162 406 | 83 818 |
| 2006 | Essence | 122 | 85,31% | 22,9 | 2,6 | 137 101 | 62 214 |
| | Diesel | 21 | 14,69% | 22,4 | 1,9 | 204 170 | 49 104 |
| 2007 | Essence | 171 | 82,21% | 23,0 | 2,8 | 144 590 | 61 073 |
| | Diesel | 37 | 17,79% | 22,1 | 2,1 | 214 201 | 57 285 |
| 2008 | Essence | 188 | 78,01% | 23,5 | 3,1 | 139 909 | 60 026 |
| | Diesel | 53 | 21,99% | 22,1 | 2,0 | 220 764 | 50 082 |

Tableau 3- 9 Durée de vie et longévité kilométrique pour les véhicules essence et diesel de plus de 20 ans (2000-2008). Source : Parc Auto

Un examen des résultats suivant la dimension kilométrique permet de montrer que les véhicules à moteur diesel de plus de 20 ans ont en moyenne un kilométrage affiché au compteur supérieur à celui des véhicules à moteur essence. Ce phénomène est visible graphiquement sur les figures 3-21 à 3-29, les croix rouges représentant les véhicules à moteur diesel sont plutôt ramassées dans le coin nord-ouest des cadrans. Les véhicules à moteur diesel de plus de 20 ans ont près de 58 500 kilomètres de plus que leurs homologues à moteur essence (127 730 km pour les essences contre 186 200 km pour les diesels) (voir tableau 3-9).

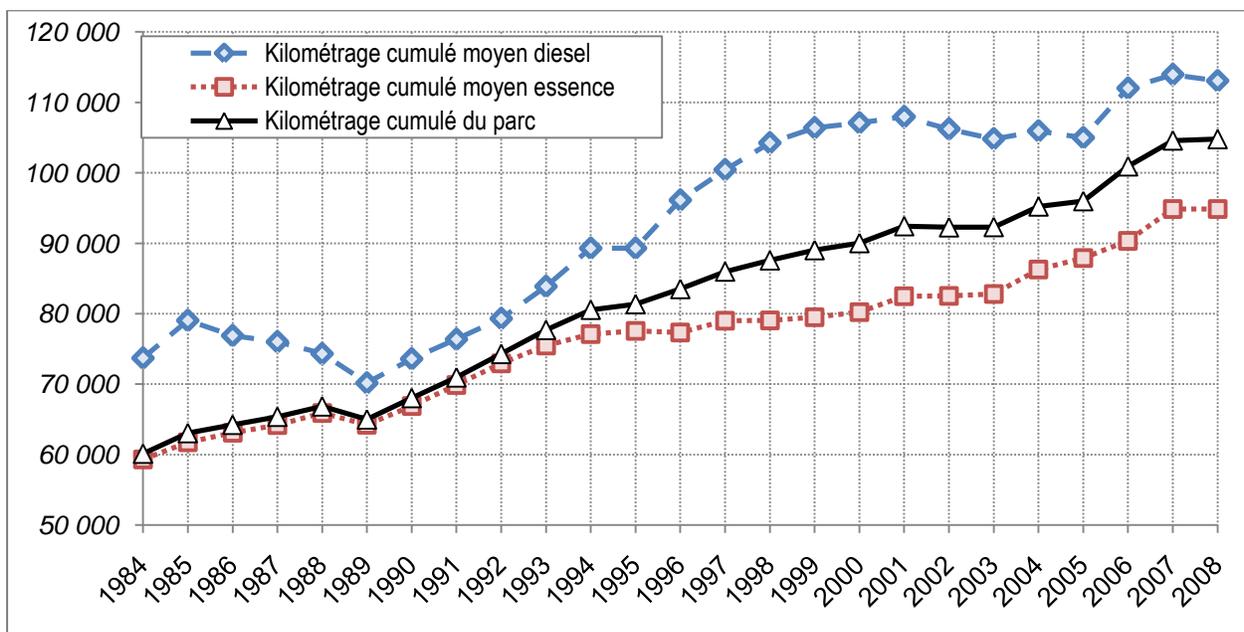


Figure 3- 30 Kilométrage au compteur moyen par catégorie de motorisation (essence, diesel) entre 1984 et 2008. Source : Parc Auto

La figure 3-30 présente l'évolution du kilométrage cumulé par type de motorisation entre 1984 et 2008. Celle-ci nous permet de saisir le contraste évident entre les catégories essence et diesel en matière d'usage et de longévité. Les véhicules à moteur diesel ont un kilométrage cumulé supérieur de 20 000 km à celui des véhicules à moteur essence en 2008 (près de 114 000 km pour les véhicules à moteur diesel et 94 000 km pour les essences).

Les figures 3-31 et 3-32 représentent les densités tridimensionnelles dessinées à l'aide de courbes de niveaux par type d'énergie (essence/diesel) fournies par périodes de 5 années depuis 1985. Ces photographies permettent d'observer un étalement, caractérisé par un aplatissement doublé d'un allongement progressif des distributions pour les populations de véhicules à moteur essence et diesel. Ces dernières mettent en évidence la coexistence d'un vieillissement à la fois selon la dimension de l'âge et celle du kilométrage cumulé. Nous montrons que ce phénomène déjà souligné d'un point de vue global (tableau 3-9) affecte indifféremment les populations de véhicules à moteur diesel et essence.

Les figures 3-31 et 3-32 nous permettent de visualiser la hausse progressive de la part des véhicules ayant un âge et un kilométrage au compteur élevé. Notons qu'il est possible de quantifier cette hausse en utilisant un tableau des probabilités jointes (voir tableau 3-21).

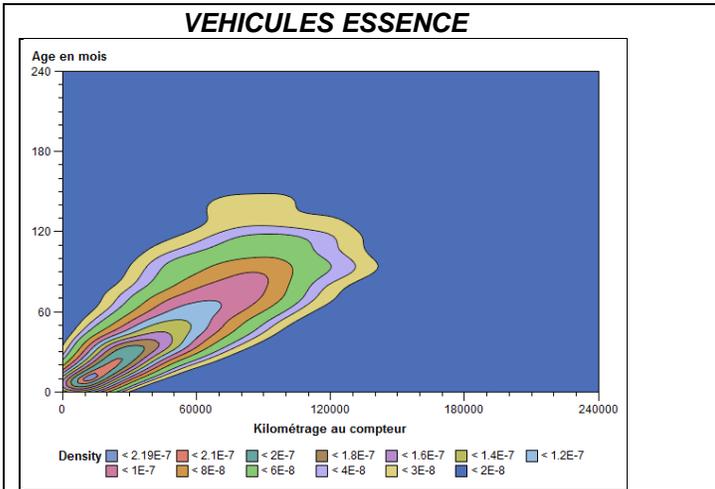


Figure 3 - 31.1 : Distribution bivariée véhicules essence 1985

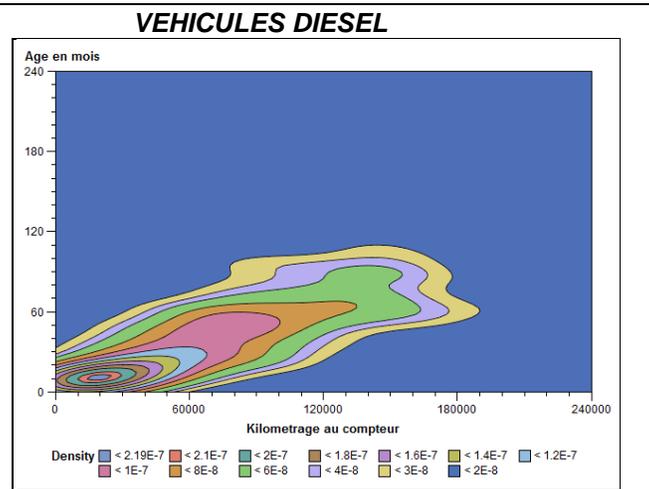


Figure 3 - 31.2 : Distribution bivariée véhicules diesel 1985

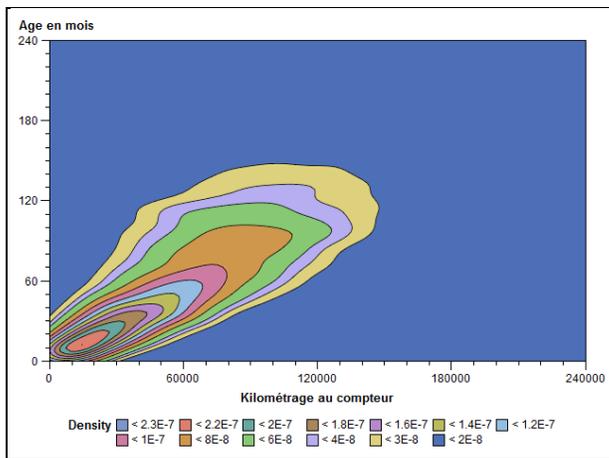


Figure 3 - 31.3 : Distribution bivariée véhicules essence 1990

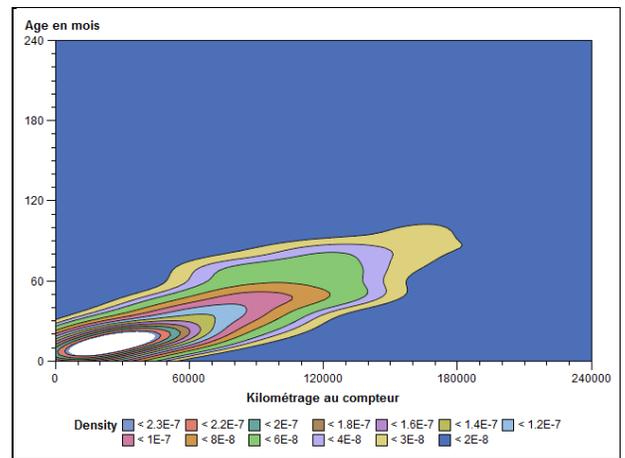


Figure 3 - 31.4 : Distribution bivariée véhicules diesel 1990

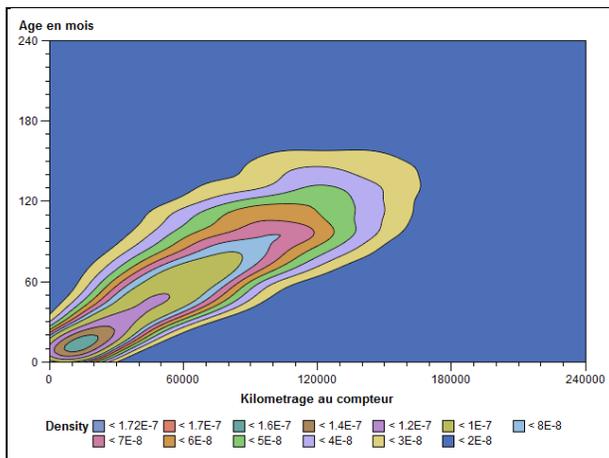


Figure 3 - 31.5 : Distribution bivariée véhicules essence 1995

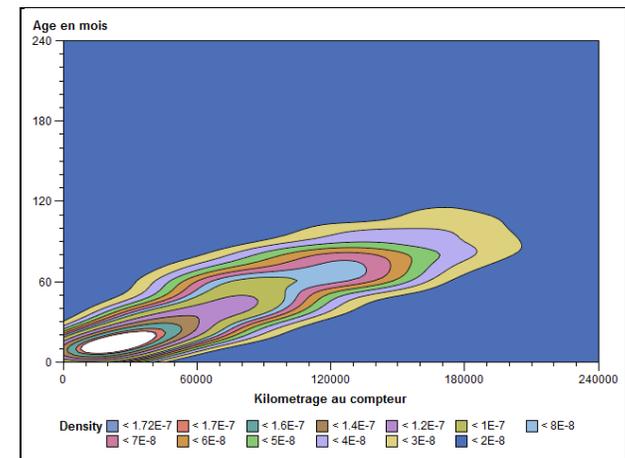


Figure 3 - 31.6 : Distribution bivariée véhicules diesel 1995

Figure 3- 31 Distributions bivariées représentées à l'aide de courbes de niveaux pour les vagues 1985 à 1995 du panel « Parc Auto »

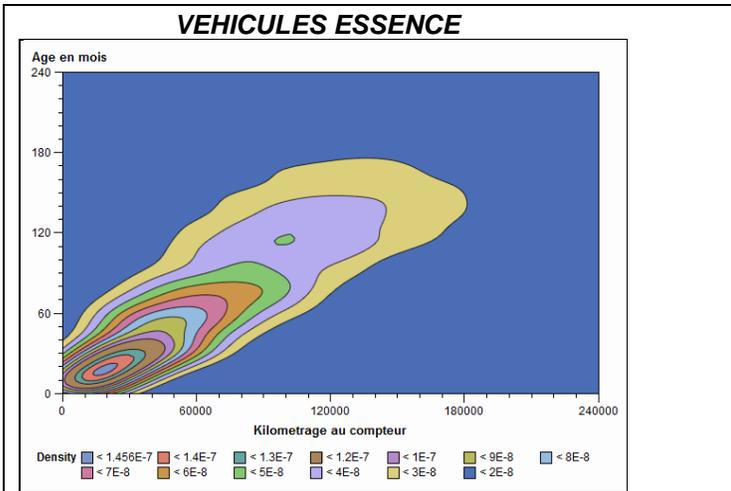


Figure 3 - 32.1 : Distribution bivariée véhicules essence 2000

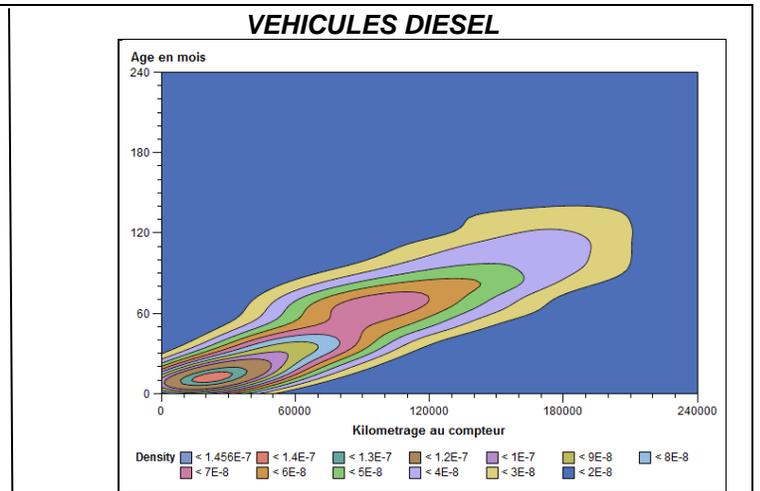


Figure 3 - 32.2 : Distribution bivariée véhicules diesel 2000

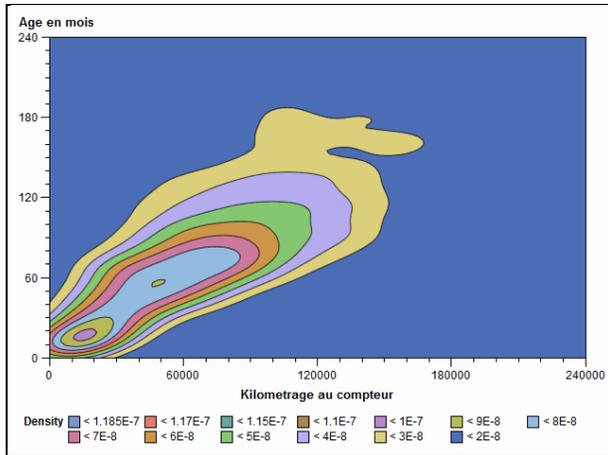


Figure 3 - 32.3 : Distribution bivariée véhicules essence 2005

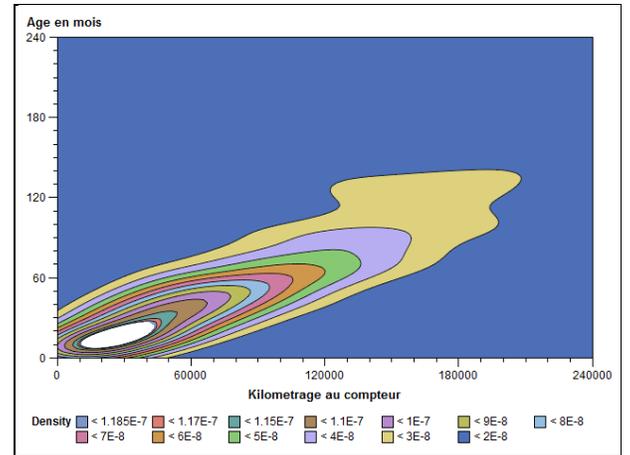


Figure 3 - 32.4 : Distribution bivariée véhicules diesel 2005

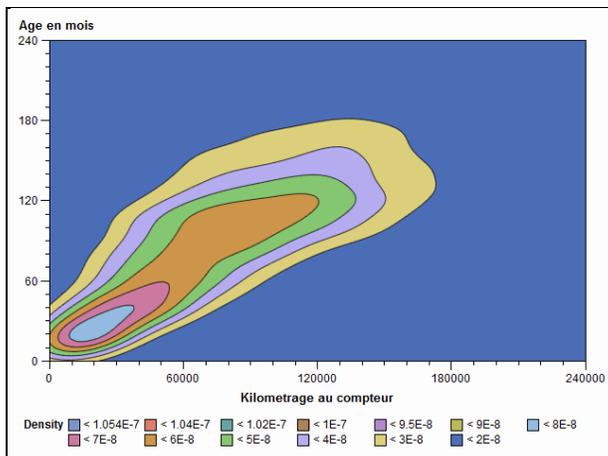


Figure 3 - 32.5 : Distribution bivariée véhicules essence 2008

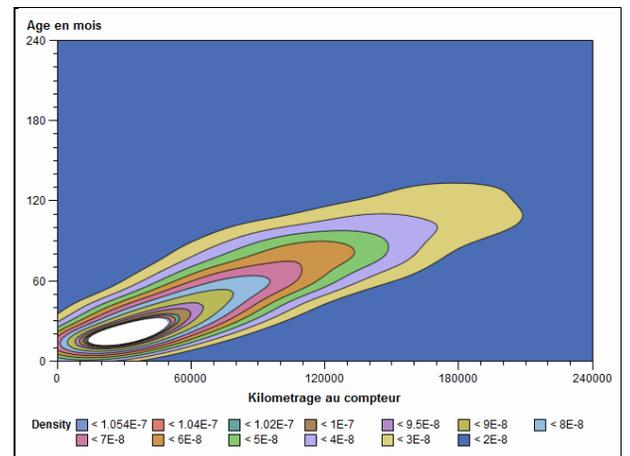


Figure 3 - 32.6 : Distribution bivariée véhicules diesel 2008

Figure 3- 32 Distributions bivariées représentées à l'aide de courbes de niveaux pour les vagues 2002 à 2007 du panel « Parc Auto »

Chapitre 3 Vieillessement du parc automobile français (1984-2008) : facteurs et enjeux

Le tableau 3-10 compare, par périodes de 5 années et par type de motorisation, l'évolution temporelle par catégorie de centiles. Ce tableau affine la comparaison par type de motorisation permettant ainsi de mesurer les différences et les spécificités en évolution par type de motorisation.

| Année | Percentiles | 0.5 | 1.0 | 2.5 | 5.0 | 10.0 | 25.0 | 50.0 | 75.0 | 90.0 | 95.0 | 97.5 | 99.0 | 99.5 |
|---------|-------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1985 | Age (mois) | 1 | 2 | 4 | 7 | 14 | 32 | 62 | 98 | 144 | 169 | 198 | 240 | 269 |
| Essence | Kilométrage | 1200 | 1779 | 3600 | 7070 | 13100 | 29413 | 56525 | 87927 | 118556 | 136600 | 155000 | 180000 | 196756 |
| 1985 | Age (mois) | 1 | 1 | 2 | 4 | 8 | 17 | 41 | 68 | 96 | 111 | 130 | 182 | 209 |
| Diesel | Kilométrage | 850 | 1550 | 5000 | 7844 | 12800 | 29777 | 70000 | 116000 | 155430 | 185000 | 208475 | 237000 | 293000 |
| 1990 | Age (mois) | 1 | 2 | 5 | 8 | 13 | 31 | 63 | 104 | 144 | 170 | 204 | 228 | 255 |
| Essence | Kilométrage | 1416 | 2400 | 4700 | 7540 | 13600 | 30682 | 59000 | 94095 | 126550 | 148000 | 167248 | 189785 | 209700 |
| 1990 | Age (mois) | 1 | 1 | 2 | 2 | 6 | 14 | 31 | 64 | 98 | 119 | 143 | 167 | 196 |
| Diesel | Kilométrage | 1034 | 1500 | 2500 | 5483 | 10600 | 26000 | 61742 | 110800 | 160500 | 190000 | 211000 | 250000 | 291000 |
| 1995 | Age (mois) | 1 | 2 | 5 | 9 | 17 | 42 | 79 | 116 | 154 | 181 | 213 | 259 | 297 |
| Essence | Kilométrage | 1574 | 2300 | 4237 | 8148 | 14500 | 36236 | 71000 | 110268 | 145103 | 168000 | 185900 | 215000 | 234000 |
| 1995 | Age (mois) | 1 | 1 | 3 | 6 | 11 | 22 | 48 | 78 | 108 | 131 | 153 | 180 | 193 |
| Diesel | Kilométrage | 2000 | 3154 | 5910 | 9850 | 16157 | 36682 | 78940 | 129700 | 180000 | 211371 | 241768 | 269410 | 286200 |
| 2000 | Age (mois) | 1 | 2 | 5 | 9 | 17 | 37 | 81 | 135 | 176 | 204 | 228 | 276 | 319 |
| Essence | Kilométrage | 1385 | 2120 | 4806 | 8500 | 14542 | 32815 | 69536 | 118000 | 161000 | 185000 | 206000 | 239211 | 264000 |
| 2000 | Age (mois) | 1 | 2 | 4 | 6 | 11 | 29 | 66 | 104 | 137 | 160 | 182 | 216 | 238 |
| Diesel | Kilométrage | 2000 | 3000 | 6000 | 11000 | 18500 | 46000 | 97153 | 157540 | 210000 | 249009 | 273473 | 300065 | 324048 |
| 2005 | Age (mois) | 2 | 4 | 8 | 13 | 24 | 55 | 93 | 145 | 197 | 220 | 248 | 278 | 310 |
| Essence | Kilométrage | 1500 | 2250 | 5325 | 10220 | 17354 | 40432 | 78000 | 122000 | 167977 | 194241 | 220015 | 246923 | 262000 |
| 2005 | Age (mois) | 1 | 2 | 3 | 7 | 12 | 29 | 59 | 114 | 158 | 182 | 202 | 229 | 244 |
| Diesel | Kilométrage | 1600 | 2700 | 5638 | 10535 | 18500 | 41998 | 89000 | 155212 | 215956 | 255341 | 285000 | 316000 | 328200 |
| 2008 | Age (mois) | 3 | 6 | 12 | 19 | 31 | 65 | 110 | 156 | 211 | 240 | 274 | 306 | 341 |
| Essence | Kilométrage | 2000 | 3560 | 7150 | 11500 | 21000 | 46534 | 85000 | 130493 | 175136 | 200000 | 222000 | 252854 | 279690 |
| 2008 | Age (mois) | 2 | 5 | 8 | 12 | 18 | 36 | 71 | 116 | 169 | 198 | 223 | 245 | 264 |
| Diesel | Kilométrage | 3021 | 5428 | 9560 | 15000 | 23017 | 50205 | 97853 | 164371 | 224000 | 260000 | 289062 | 317000 | 330000 |

Tableau 3- 10 Centiles des catégories de véhicules essence et diesel par périodes de 5 années allant de 1985 à 2008. Source : Parc Auto

Si l'on se concentre uniquement sur les valeurs de la médiane en comparant les probabilités jointes en 1985, 1995, 2005 et 2008, on remarque une croissance quasi-linéaire du couple âge et kilométrage pour chacune des motorisations (voir figure 3-33). Nous observons néanmoins, sur la figure 3-33 une différence majeure dans l'évolution temporelle du vieillissement et de l'usage entre les populations de véhicules à moteur essence et diesels (mesurable sur le tableau 3-21). Cette différence d'évolution indique que la contribution au vieillissement du parc de chaque motorisation est différente.

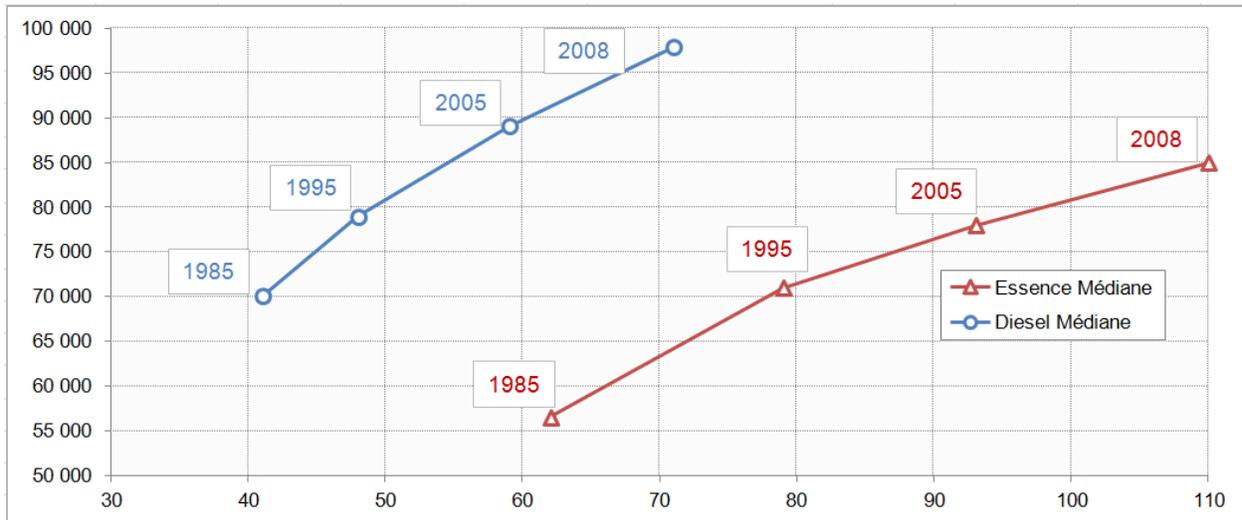


Figure 3- 33 Valeurs médianes des probabilités jointes par type de motorisation et pour les années 1985, 1995, 2005 et 2008.

En effet, on observe sur la figure 3-33 que la croissance de la durée de vie médiane des véhicules à moteur diesel est moins importante que celle des véhicules à moteur essence. La croissance de la longévité médiane (mesurée à partir du kilométrage au compteur) semble quant à elle équivalente pour les deux populations. En 1985, la moitié de la population des véhicules à moteur diesel affiche conjointement plus de 70 000 kilomètres au compteur et plus de 41 mois (3,42 ans), c'est respectivement près de 13 500 kilomètres supérieur et 30 mois (2,5 années) inférieur à la valeur médiane de la population de véhicules à moteur essence. Notons d'autre part que la différence d'âge médian, toujours à l'avantage des véhicules à moteur essence, se situe toujours autour 30 mois, excepté en 2008 où cette différence semble s'accroître à 40 mois. Concernant la différence du kilométrage cumulé, elle est en moyenne supérieure pour les véhicules à moteur diesel d'environ 12 600 kilomètres sur la période 1985 à 2008.

Ces observations permettent de souligner les hétérogénéités existantes au sein du parc automobile par type de motorisation en matière d'impact sur le vieillissement et l'usage.

CONCLUSION

Le parc automobile a vieilli de plus de 2 ans entre 1990 et 2008. Ce vieillissement est un facteur d'augmentation des coefficients d'émissions de GES et de polluants locaux. Après avoir montré que le vieillissement observé est d'ordre structurel, nous montrons qu'il trouve ses origines dans le multi-équipement, l'étalement urbain, la démocratisation de la voiture particulière et le développement du marché d'occasion propice à la baisse du coût d'acquisition même pour les ménages les plus modestes. Ce vieillissement s'explique aussi par la dynamique d'évolution du parc : la stagnation des immatriculations de véhicules neufs est un facteur démographique majeur causant le vieillissement général du parc. Rappelons que notre démarche repose sur le constat d'une hausse de l'âge moyen, diagnostic préalable permettant de révéler les symptômes correspondant aux facteurs décrits (voir figure 3-34).

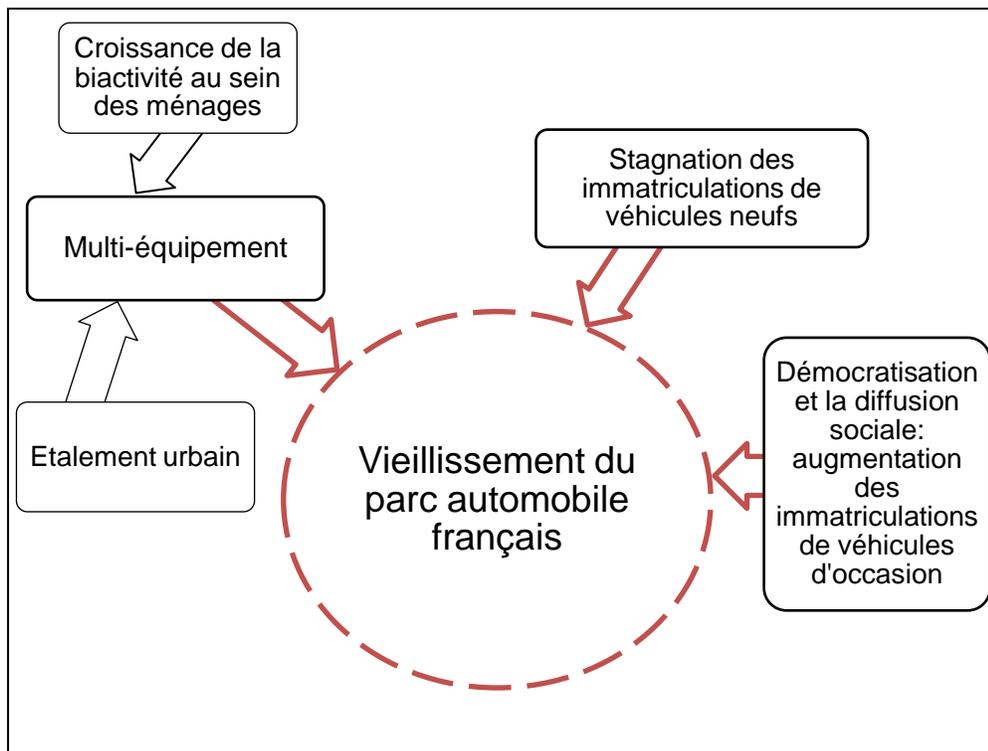


Figure 3- 34 Les déterminants associés au vieillissement du parc automobile français

L'âge moyen du parc est souvent retenu pour estimer le coefficient d'émission d'un parc, or cet âge moyen ne constitue qu'une valeur approchée de deux critères cruciaux pour les émissions, que sont la génération du véhicule et le kilométrage affiché au compteur. C'est en effet l'année de construction qui fournit la norme en vigueur et le kilométrage affiché qui indique l'intensité d'usage du véhicule corrélée à l'état du moteur. Il est ainsi important de tenir compte de l'évolution de la mobilité et de l'usage (kilométrage moyen par an) pour chacune des générations de véhicules qui composent le parc car les coefficients moyens d'émissions sont une fonction croissante de l'âge.

Par conséquent, nous avons montré la nécessité que l'approche classique du vieillissement du parc automobile, qui tient uniquement compte de l'âge, soit modifiée afin de tenir compte de la longévité kilométrique des véhicules à moteur diesel majoritaires dans la composition du parc (en 2008 près de 54% des véhicules du parc automobiles sont des diesels). L'introduction du kilométrage affiché au compteur comme dimension de mesure complémentaire à celle de l'âge nous permet ainsi d'appréhender pleinement la compréhension du phénomène de vieillissement. Par ailleurs, le vieillissement du parc automobile (en âge et kilométrage) nous pousse à nous interroger sur la stabilité temporelle des lois de survie. Or, le rythme de renouvellement du parc automobile lié à la longévité des véhicules peut être simulé par l'estimation des lois de survie du parc automobile.

Ainsi, la question de l'estimation de la loi de survie des véhicules particuliers cruciale pour la modélisation et la prévision de la taille et de la structure du parc s'avère aussi importante pour lier le phénomène de vieillissement du parc automobile avec celui d'une diminution progressive des taux de déclassement des véhicules particuliers (hors périodes de « primes à la casse »). C'est la raison pour laquelle le chapitre 4 sera consacré à leur définition et à leur élaboration afin de comprendre le lien de moyen terme qui lie vieillissement et diésélisation (nous avons montré que l'effet de court terme de la diésélisation est de rajeunir le parc) et surtout de prouver la relation qui relie le vieillissement du parc automobile et l'augmentation de la durée de vie des véhicules particuliers.

Chapitre 4 : Lois de survie du parc automobile

SOMMAIRE

| | |
|--|------------|
| CHAPITRE 4 : LOIS DE SURVIE DU PARC AUTOMOBILE | 137 |
| INTRODUCTION | 139 |
| 1 LES LOIS DE SURVIE DU PARC AUTOMOBILE | 140 |
| 1.1. Principe d'estimation des taux de survie par âge à partir des données d'enquête | 140 |
| 1.2. Calculs des taux de survie longitudinaux et transversaux..... | 143 |
| 2 AJUSTEMENTS SUR TAUX DE SURVIE TRANSVERSAUX ET CHOIX THEORIQUE DE LA LOI DE SURVIE..... | 153 |
| 2.1. Choix de la loi de survie théorique | 154 |
| 2.2. Ajustement à l'aide d'une loi log-normale | 156 |
| 2.3. Ajustement à l'aide d'une loi log-logistique..... | 158 |
| 2.4. Ajustement à l'aide d'une loi de Weibull..... | 160 |
| 2.5. Ajustement des taux de survie longitudinaux par une loi de Weibull | 165 |
| 3. CONCLUSION ET CHOIX OPTIMAL DE LA LOI DE SURVIE..... | 168 |
| 4 DUREE DE VIE DES VP PAR TYPE DE MOTORISATION : ESSENCE VERSUS DIESEL..... | 171 |
| 4.1. Taux de survie par type de motorisation (Diesel/Essence)..... | 171 |
| 4.2. Loi de survie par type de motorisation (Diesel/Essence) | 174 |
| 5 LOIS DE SURVIES CONFORTANT LES STATISTIQUES DE VOLUME DE PARC AUTOMOBILE | 182 |
| 5.1. Méthodologie | 182 |
| 5.2. Ajustements et résultats sur le parc national..... | 183 |
| 5.3. Ajustements et résultats par type de motorisation | 187 |
| 6 DUREE DE VIE ET LONGEVITE DES VP | 188 |
| 6.1. Choix du modèle : le modèle de Poisson | 189 |
| 6.2 Modélisation des taux de sortie à kilométrage au compteur donné. | 190 |
| 6.3 Modélisation des taux de sortie à effectif retardé donné. | 193 |
| CONCLUSION | 196 |

INTRODUCTION

Dans le chapitre 3 nous avons analysé le vieillissement du parc automobile sous les dimensions conjointes de l'âge et du kilométrage total. Nous avons isolé plusieurs facteurs à l'origine du vieillissement du parc automobile observé depuis près de 25 ans. Néanmoins nous n'avons pu nous prononcer sur le rôle de l'évolution du taux de déclassement des véhicules particuliers comme facteur aggravant du vieillissement du parc. En effet, seul un examen précis de l'évolution de la durée de vie des véhicules permettra de confirmer ou d'infirmer le rôle de la baisse du déclassement des véhicules particuliers. La preuve d'un allongement de la durée de vie des véhicules particuliers permettra de montrer qu'il y a un ralentissement global du rythme de renouvellement du parc puisque nous avons déjà montré que les immatriculations de véhicules neufs sont en relative stagnation depuis les années 1990. Par conséquent, ce chapitre a pour principal objectif de déceler un éventuel allongement de la durée de vie des véhicules particuliers, auquel cas il aurait pu jouer un rôle aggravant sur le vieillissement du parc automobile. Dans le cas contraire, cela renforcerait le rôle des facteurs mis en évidence dans le chapitre 3 sur le vieillissement du parc.

L'évolution de la durée de vie des véhicules particuliers n'a pas été étudiée depuis les travaux de [Gallez \(1994a\)](#) et de [Gallez et Couturier \(2000\)](#). Ces travaux avaient montré un léger accroissement de la durée de vie des véhicules particuliers puisque la durée de vie médiane des véhicules particuliers avait été estimée à 10,27 années pour la génération moyenne 1968 à 1978 et à 10,93 années pour la génération moyenne 1979 à 1992, gagnant ainsi plus de 0,6 années entre les deux périodes.

En recourant à l'approche développée par [Moutardier et Glaude \(1978\)](#), reprise par [Gallez \(1994a\)](#) puis par [Gallez et Couturier \(2000\)](#), nous estimerons des taux de survie longitudinaux et transversaux à partir du panel Parc Auto. Nous montrerons, de façon préliminaire, à partir des taux de survie longitudinaux que la durée de vie des véhicules semble s'accroître avec les générations. En procédant de la même façon, nous montrerons à partir des taux de survie transversaux que la durée de vie s'accroît annuellement.

Pourtant, sans ajustement (ou « lissage ») des taux de survie par une loi de survie paramétrique, nous restons dans l'incapacité de quantifier une quelconque évolution temporelle de la survie de notre population d'intérêt, les véhicules particuliers. Pour ce faire nous décidons de tester différentes spécifications théoriques de lois de survie avec l'objectif d'améliorer la spécification paramétrique actuelle basée sur l'usage d'une loi log-normale [[Gallez, 1994a](#) ; [Gallez et Couturier, 2000](#)]. Nous avons sélectionné trois spécifications répandues dans la

littérature des modèles de survie : log-normale, log-logistique et Weibull pour l'ajustement de taux de survie transversaux sur des critères de coefficient de détermination de statistique de Fisher. Les résultats montrent que les ajustements sont globalement améliorés par l'usage d'une loi de Weibull.

En estimant des taux de survie transversaux par type d'énergie puis en les ajustant par la loi de Weibull par groupes d'années 2000 à 2002, 2003 à 2005 puis 2006 à 2008, nous montrons que la durée de vie par type de motorisation s'accroît progressivement. En comparant la durée de vie par type de motorisation, nous prouvons que la durée de vie de la population de véhicules à moteur diesel rattrape progressivement celle de leurs homologues à moteur essence. Cette observation permettra de confirmer l'accroissement de la durée de vie des véhicules du parc automobile sous l'effet de la diésélisation croissante.

Pour finir nous présentons un modèle stylisé de renouvellement du parc obtenu par calage du volume du parc automobile par les immatriculations de véhicules neufs [Jeger, 2001]. Les lois de survie obtenues par calage seront commentées puis les résultats seront discutés à la lumière des ceux obtenus à partir des ajustements effectués sur les taux de survie transversaux.

1 Les lois de survie du parc automobile

Le vieillissement du parc automobile couplé à la stagnation des ventes de véhicules neufs (2 à 2,1 millions de véhicules depuis 2000) remet en question la thèse de la stabilité temporelle des lois de survie. D'autre part le rythme de renouvellement du parc automobile, fondé sur l'application de lois de survie dont les paramètres sont supposés constants au cours du temps, est soumis à une certaine force d'inertie conduisant à des projections exagérément optimistes pour les ventes de voitures neuves. Nous en concluons, d'après les observations passées sur la hausse de l'âge moyen du parc que les taux de déclassement des véhicules tendent à décroître avec le temps. Nous confirmerons cette évolution et nous montrerons qu'elle va dans le sens d'un allongement progressif de la durée de vie des véhicules particulier.

1.1. Principe d'estimation des taux de survie par âge à partir des données d'enquête

1.1.1. Quelques définitions

La survie d'un véhicule au sein du parc automobile dépend de nombreux facteurs. Nous pouvons en citer quelques uns : la robustesse, l'introduction de normes obligatoires de sécurité et de pollution à travers l'application du contrôle technique obligatoire, le déploiement de nouvelles technologies alternatives plus compétitives dans le coût de l'énergie et de l'usage, le

nombre de d'accidents (et de véhicules jugés irréparables), l'introduction d'une « prime à la casse » (prime au remplacement) etc.

Tous ces facteurs définissent la durée de vie observée (ou plus simplement la *durée de vie*). Cette dernière est un mélange entre durée de vie économique (c'est-à-dire la durée de vie qui est affectée par les facteurs purement économiques) et physique (longévité). Il s'agit en réalité bien souvent de la plus courte des deux durées de vie :

$$S_{obs} = \text{Min} \left(S_{phy}; S_{eco} \right)$$

La durée de vie physique d'un véhicule (S_{phy}) dépend de son usure physique et donc de l'usage auquel est soumis ce dernier mesurable à travers son kilométrage au compteur (ou plus précisément du nombre de trajets effectués, de la longueur des trajets par type de routes, du climat, de la qualité de l'infrastructure utilisée, etc.). La durée de vie physique est aussi liée à la longévité intrinsèque du véhicule correspondant à la robustesse de la carrosserie et du moteur elles-mêmes corrélées au prix du bien. Cette dernière influe positivement de manière évidente sur la durée de vie observée.

La durée de vie économique (S_{eco}) des véhicules dépend, comme son nom l'indique, de facteurs purement économiques comme le prix du bien, la conjoncture (crises économiques), la baisse des revenus disponibles impliquant un report d'achat des ménages (provoquant une hausse mécanique de la durée de vie économique des véhicules qui seront conservés plus longtemps), des mesures économiques (primes au remplacement et au renouvellement qui visent à diminuer la durée de vie économique) mais aussi de normes comme le contrôle technique obligatoire (ayant un effet observé de diminuer la durée de vie économique à des fins sécuritaires, environnementales et économiques) ou encore de la politique d'innovation liée au déploiement technologique, de la pression fiscale, du prix des véhicules, etc.

1.1.2. Principe général

L'analyse de la durée de vie des véhicules, dont dépendent les besoins de remplacement des véhicules hors d'usage, est indispensable à la mise à jour régulière des estimations du volume global du parc. Le modèle de renouvellement utilisé par [Gallez \(1994a\)](#) s'inspirant des travaux effectués par [Thomas \(1970\)](#) puis de [Moutardier et Glaude \(1978\)](#) s'appuie sur une analyse longitudinale des durées de vie dans l'objectif de prévoir la demande automobile. Cette prospective a aussi été menée par [Gallez et Couturier \(2000\)](#) en utilisant d'une part des données des enquêtes de conjoncture auprès des ménages de l'Insee (1972-1994) et d'autre part du panel Parc Auto pour les années 1995 à 1997.

Dans ce chapitre, le principe général de notre approche se limite à l'estimation et à la comparaison des évolutions des paramètres de lois de survie du parc automobile par ajustement sur taux de survie. Elle se décline en trois principales étapes :

- La première étape consiste à estimer d'une part les taux de survie longitudinaux donnant la persistance des générations de véhicules au sein du parc automobile et d'autre part les taux de survie transversaux donnant la proportion de chaque génération qui composent le parc pour une année d'observation du parc automobile fixée.
- La seconde étape consiste à isoler une spécification théorique parmi trois lois de survie paramétriques (log-normale, log-logistique et Weibull) en comparant les différents ajustements obtenus à la lumière des coefficients de détermination et de la statistique de Fisher.
- Durant la dernière étape nous quantifions l'évolution temporelle des paramètres obtenus sur ajustement de lois de survie sur les taux de survie transversaux et longitudinaux afin de mieux comprendre la dynamique de renouvellement du parc automobile.

1.1.3. Source statistique utilisée

Les lois de survie des voitures particulières à disposition des ménages ont été estimées sur la base de taux de survie calculés à l'aide de données d'enquêtes. Dans le but de reconstituer la série la plus longue possible, notamment pour les calculs effectués à partir d'un suivi de génération, la structure par âge du parc est décrite à partir des vagues annuelles du panel Parc Auto pour la période large 1984 à 2008.

Afin d'éviter toute rupture de série sur la période d'observation, le champ se limite aux voitures particulières à disposition des ménages. Rappelons qu'il est assez complexe d'obtenir une distinction nette entre les véhicules particuliers et utilitaires sur le panel Parc Auto qui recense les véhicules mis à la disposition des ménages, donc des véhicules tels que les véhicules d'entreprises, taxis etc...

Les enquêtes nous fournissent, pour chaque année de construction saisie en clair, le nombre de voitures particulières présentes à la date t . Ces chiffres bruts sont ensuite pondérés⁴⁵ afin d'être représentatifs de l'ensemble du parc français.

⁴⁵ Aucun poids véhicule n'est disponible dans la base véhicule pour les années 1984 à 1987. C'est pourquoi aucun redressement n'est opéré pour ces années.

1.2. Calculs des taux de survie longitudinaux et transversaux

Le calcul des taux de survie selon les optiques longitudinales et transversales constitue la première étape dans l'élaboration de lois de survie. Ces taux de survie permettent d'une part d'observer les évolutions conjoncturelles de la durée de vie des véhicules particuliers. Ils constituent, d'autre part la « matière première » nécessaire à l'ajustement (« lissage ») des lois de survie paramétriques nécessaires pour quantifier l'évolution de la durée de vie par années ou par périodes.

1.2.1. Taux de survie longitudinaux

Dans une perspective longitudinale, le taux de survie mesure la proportion de véhicules d'une même génération (c'est-à-dire ayant tous en commun d'avoir la même année d'immatriculation) survivant pour chaque âge (a). Les taux de survie longitudinaux pour une génération g donnée correspondent ainsi au pourcentage de véhicules de cette génération donnée qui subsistent au fil du temps. On définit le taux de survie longitudinal (ou générationnel) à l'âge a et à la date t comme le rapport entre les véhicules survivant à l'âge a (donc étant de génération $g = t - a$) dont la quantité est donnée par $N(t, a)$ et les véhicules immatriculés à la date $g = t - a$, de quantité $I(t - a)$. Les taux de survie longitudinaux sont estimés à l'aide de la formule suivante :

$$S(t, a) = \frac{N(t, a)}{I(t - a)}$$

Il faut noter, qu'en théorie, le nombre de véhicules observés dans le parc pour la génération $g = t - a$ à la date t et à l'âge $a = 0$ doit être égal au nombre d'immatriculation en t :

$$N(t, 0) = I(t)$$

L'optique longitudinale nécessite le calcul des taux de survie $S(t, a)$ de chaque génération de véhicules tout au long de son cycle de vie. Ceci permet de comparer la survie des différentes générations de véhicules les unes aux autres. L'approche longitudinale privilégie la génération comme période de comparaison, ce qui favorise les caractéristiques de construction comme facteur principal des différences intergénérationnelles observées en matière de durée de vie. Soulignons tout de même que l'optique longitudinale ne permet pas d'isoler les facteurs affectant la durée de vie physique de ceux affectant la durée de vie économiques puisque chaque courbe de survie générationnelle est affectée par les facteurs économiques qui sont propres à une génération ou à une catégorie de générations de véhicules. On note par exemple que les primes au remplacement mises en place entre 1994 et 1995 ont provoqué une baisse notable des taux de survie longitudinaux des véhicules âgés de 8 à 12 ans entre 1994 et 1996.

Chapitre 4 Lois de survie du parc automobile

De fait, nous ne pouvons être catégoriques sur la prépondérance de la robustesse d'une génération sur une autre pour expliquer une modification de la durée de vie générationnelle.

D'un point de vue pratique, notre approche fondée sur les travaux de [Thomas \(1970\)](#) [Moutardier et Glaude \(1978\)](#) puis de [Gallez \(1994a\)](#), consiste à suivre une génération donnée de véhicule, jusqu'en 2008 dernière vague du panel existant à ce jour, puis de retranscrire sa persistance dans les vagues successives de notre enquête « Parc Auto » en matière de probabilité (ou de taux) de survie. Le calcul empirique des taux de survie longitudinaux a été effectué exclusivement à partir de l'enquête Parc Auto pour 25 générations (1984 à 2008). Les figures 4-1 à 4-4 illustrent ces taux annuels de survie pour les générations 1984 à 1999.

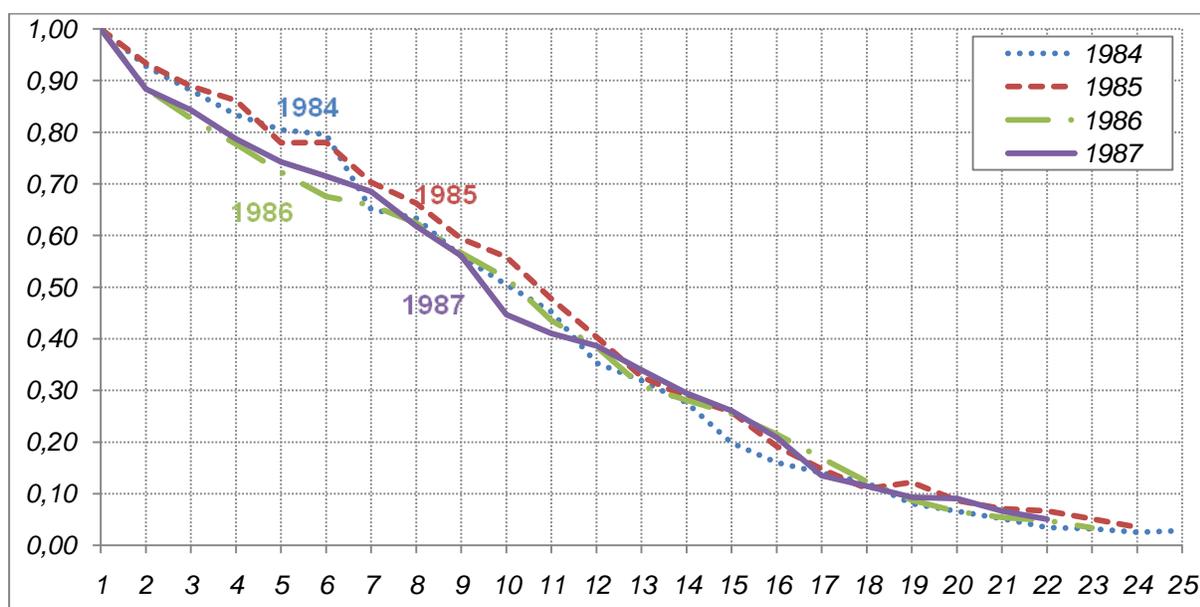


Figure 4- 1 Taux de survie longitudinaux annuels pour les générations 1984, 1985, 1986 et 1987. Source « Parc Auto »

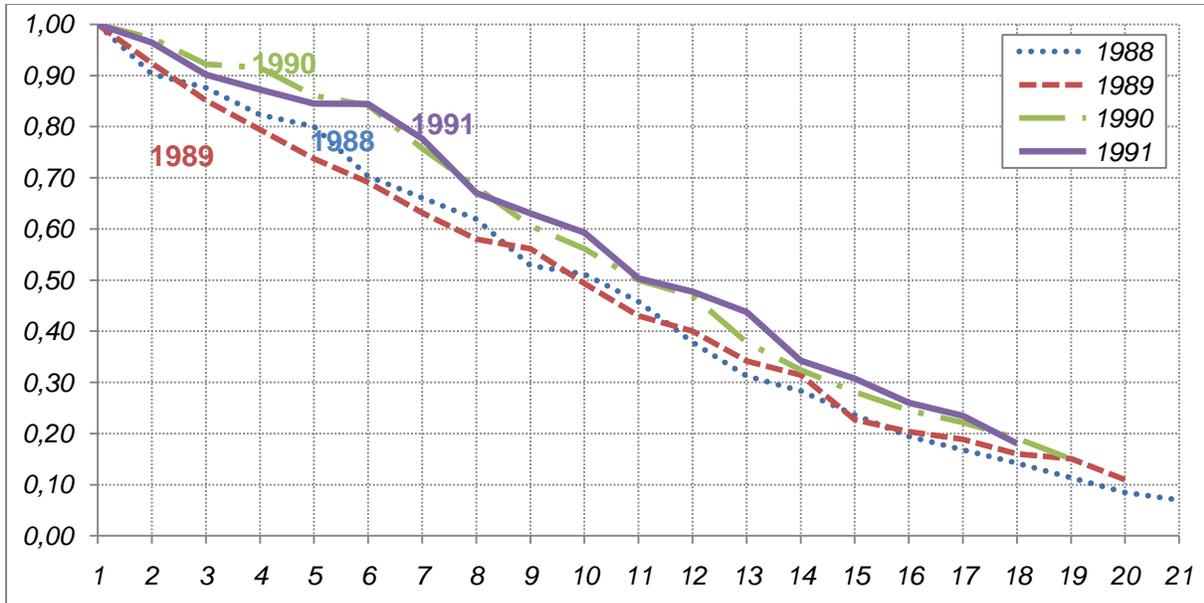


Figure 4- 2 Taux de survie longitudinaux annuels pour les générations 1988, 1989, 1990 et 1991. Source « Parc Auto »

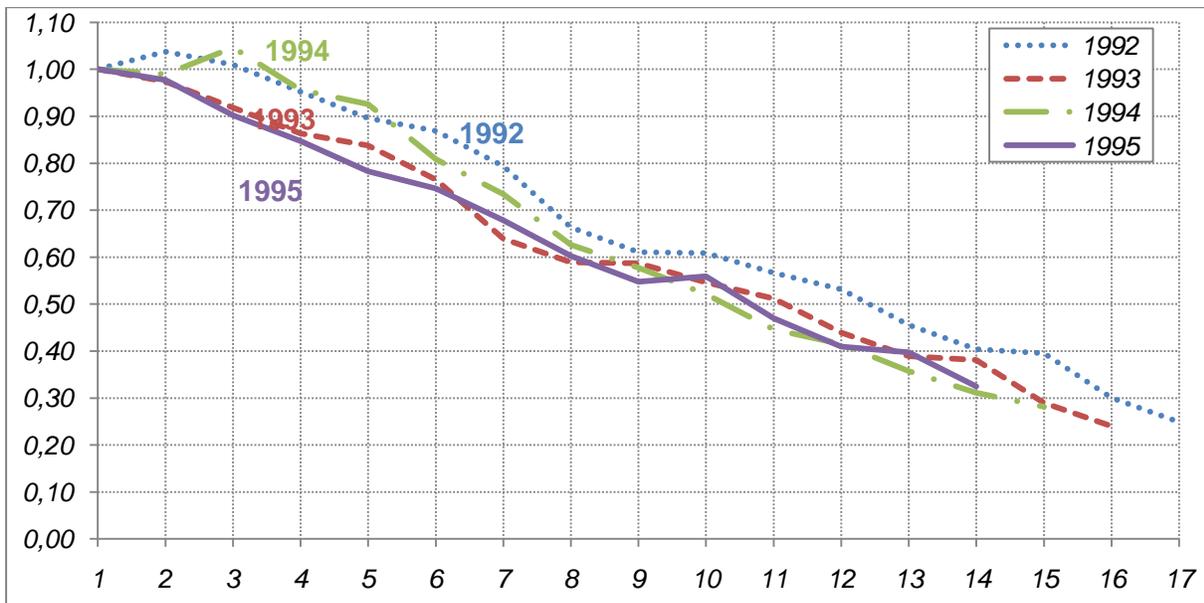


Figure 4- 3 Taux de survie longitudinaux annuels pour les générations 1992, 1993, 1994 et 1995. Source « Parc Auto »

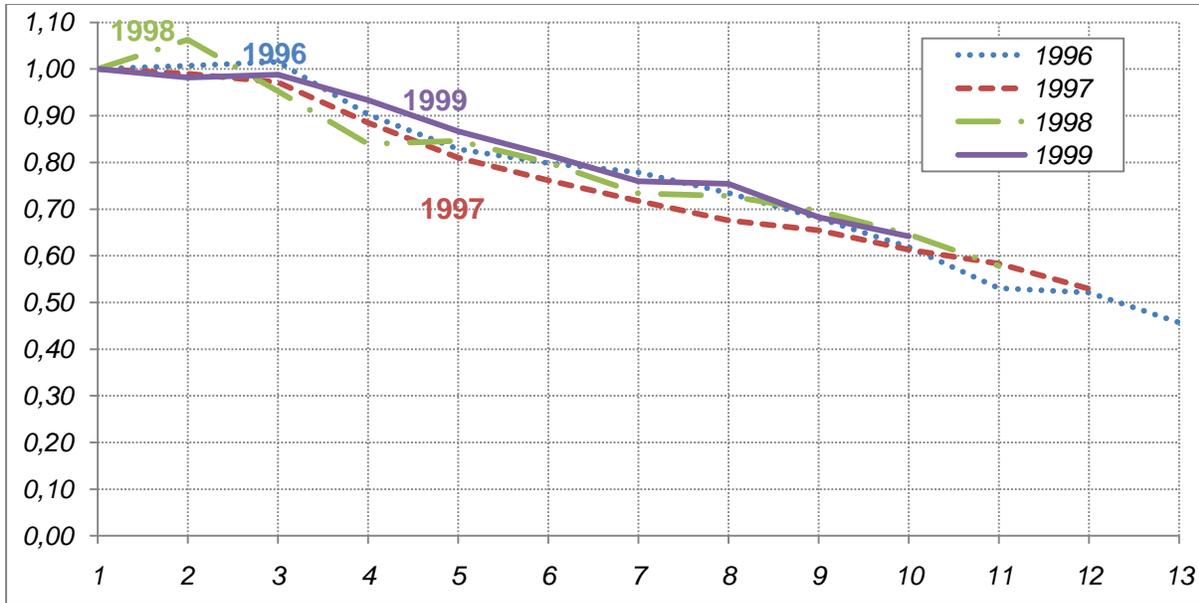


Figure 4- 4 Taux de survie longitudinaux annuels pour les générations 1996, 1997, 1998 et 1999. Source « Parc Auto »

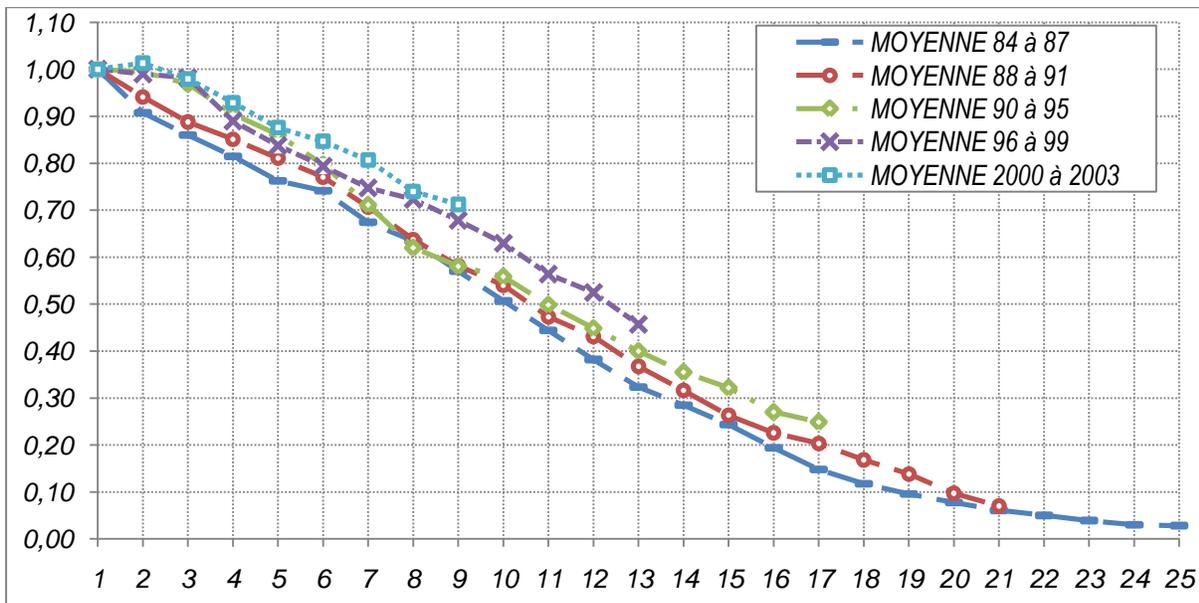


Figure 4- 5 Moyenne de taux de survie longitudinaux annuels par catégories de générations. Source « Parc Auto »

La durée de vie médiane, qui représente la durée au bout de laquelle cinquante pourcent des véhicules d'une génération donnée disparaît du parc (ou subsiste dans le parc), constitue un point de comparaison intéressant pour mesurer l'évolution des courbes de survies construites à l'aide des taux de survie empiriques. Cette durée de vie médiane estimée à près de 10 ans pour les générations 1984 à 1988 (figures 4-1 et 4-2) passe à près de 11 ans pour les générations 1990 à 1995 (figures 4-2 et 4-3). Elle dépasse les 12 ans pour les générations post-1996 (figure 4-4).

Cette hausse progressive de la durée de vie médiane laisse supposer une hausse généralisée de la durée de vie pour les générations de véhicules les plus récentes. Cet allongement de la durée de vie des véhicules est particulièrement visible lorsque des moyennes de taux de survie sont opérées sur des regroupements de générations. La figure 4-5 permet de visualiser le décalage progressif des courbes de survie par catégorie de génération marquant un allongement de la durée de vie. La durée de vie médiane semble croître progressivement pour passer d'environ 10 ans pour les générations 1984-1987 à près de 12,5 ans pour les générations 1996-1999.

Bien qu'informatifs des évolutions et de l'ampleur des variations conjoncturelles concernant la durée de vie des véhicules, les taux de survie longitudinaux sont à manipuler avec précaution car, de part leur nature, ils sont soumis à d'inévitables fluctuations d'échantillonnages. On note par ailleurs que certains taux de survie supérieurs à un présentent un biais dû aux fluctuations saisonnières importantes du marché et du parc. On observe parfois un nombre de véhicules plus important l'année $n+1$ (ou même $n+2$ en 1994 en raison de l'introduction de la prime « *balladurette* » en février 1994) qu'en n .

Néanmoins ces irrégularités peuvent être partiellement redressées par des méthodes de lissage [Moutardier et Glaude, 1978]. Les taux de survie (ou taux de persistances longitudinaux générationnels) servent de base à une approche paramétrique permettant de quantifier et mesurer les évolutions observées (visualisées graphiquement). L'ajustement des taux de survie longitudinaux par une loi de survie paramétrique permettra de quantifier ces évolutions observées par simple calcul de la variation des paramètres. Une variation positive tendra à confirmer l'augmentation de la durée de vie générationnelle observée.

1.2.2. Taux de survie transversaux

Jusqu'à présent nous avons estimé des taux de survie longitudinaux qui sont aussi des taux de survie générationnels. Or, les taux de survie des véhicules peuvent aussi être calculés selon une optique transversale, c'est-à-dire à un instant donné (pour une année) et pour les différentes classes d'âges qui composent le parc automobile. Selon cette optique, les taux de survie sont vus comme des proportions de véhicules du parc automobile par âge rapportés aux immatriculations pour chacune des composantes d'âge. Dans ce cadre l'année t est fixée et non plus la génération $g = t - a$.

Le taux de survie transversal $S_t(a)$ à l'âge a estimé pour une année t donnée (c'est-à-dire fixée) s'écrit comme le rapport entre le nombre de véhicules $N_t(a)$ survivant à l'âge a dans le parc de l'année t et le volume des immatriculations I_{t-a} de l'année $t-a$:

$$S_t(a) = \frac{N_t(a)}{I_{t-a}}$$

Nous l'estimons par la formule suivante : $S_t(a) = \frac{N_t(a)}{I_{t-a}} \approx \frac{N_t(a)}{N_t(0) * i_{t-a}}$

Tel que i_{t-a} représente l'indice de l'évolution des immatriculations observé sur la série des immatriculations du CCFA. Ce dernier est égal à 1 pour l'année de référence $N_t(0)$.

A la différence des taux de survie longitudinaux qui privilégient les caractéristiques de construction comme étant les principales variables influant sur la durée de vie, les taux de survie transversaux privilégient les circonstances se produisant tout au long de la période d'usage des véhicules particuliers. Il s'agit principalement des conditions d'utilisation, de comportement (motivé ou non motivé par la conjoncture économique) de rétention de l'équipement usagé et obsolète par les ménages, les incitations au remplacement lors de divers programmes de reprises, les facilités de paiement, les taux d'intérêt des crédits à la consommation, la tenue du marché de l'occasion, etc.

A partir des données issues du panel Parc Auto, l'évolution de la 'persistance' de chaque génération pour une année donnée a été estimée pour les 25 années (1984 à 2008) du panel. Le principe de calcul des taux de survie par âge consiste à rapporter les effectifs pondérés⁴⁶ obtenus par année modèle (génération ou année de construction) à l'effectif pondéré de la génération la plus jeune.

⁴⁶ Rappelons qu'aucune pondération n'est disponible pour les années 1984 à 1987.

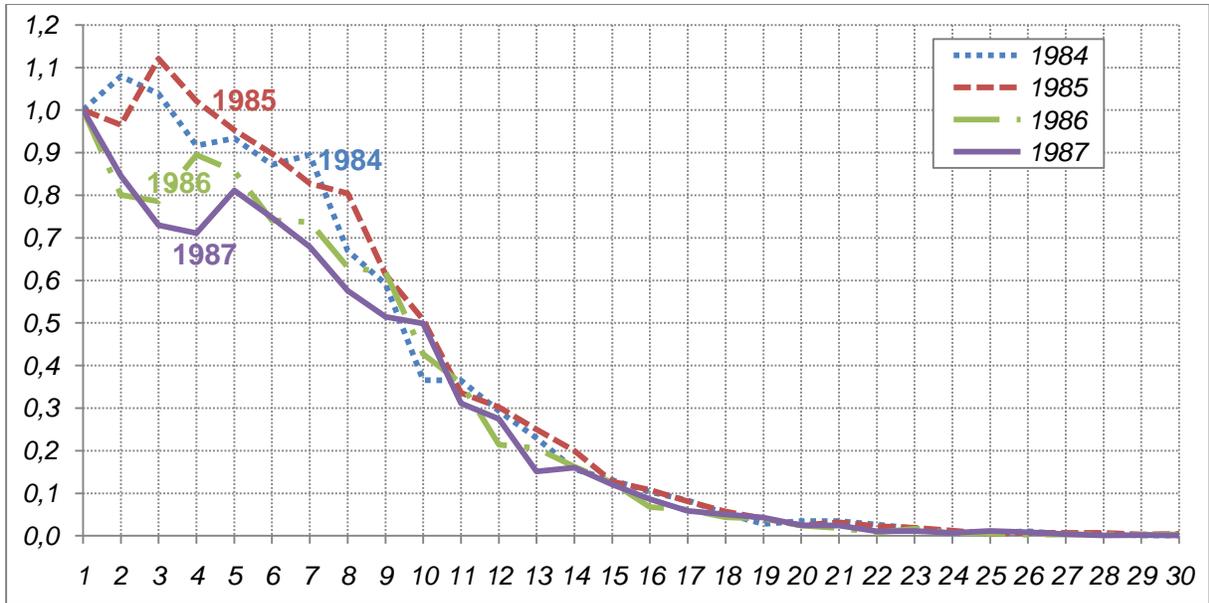


Figure 4- 6 Taux de survie transversaux pour les années 1984, 1985, 1986 et 1987. Source « Parc Auto »

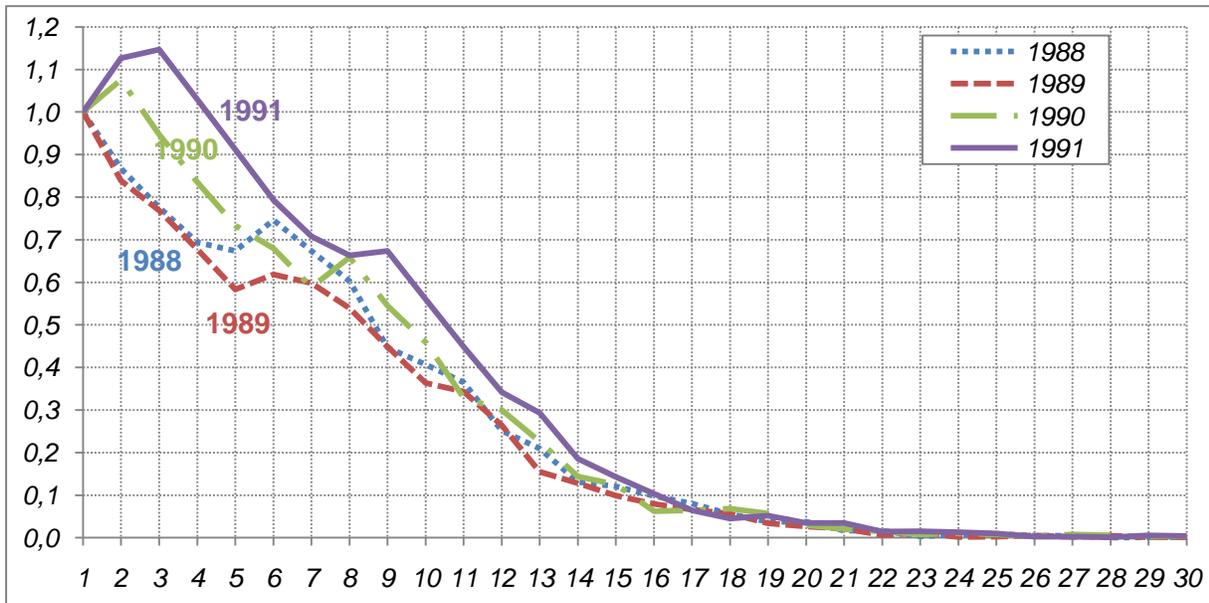


Figure 4- 7 Taux de survie transversaux pour les années 1988, 1989, 1990 et 1991. Source « Parc Auto »

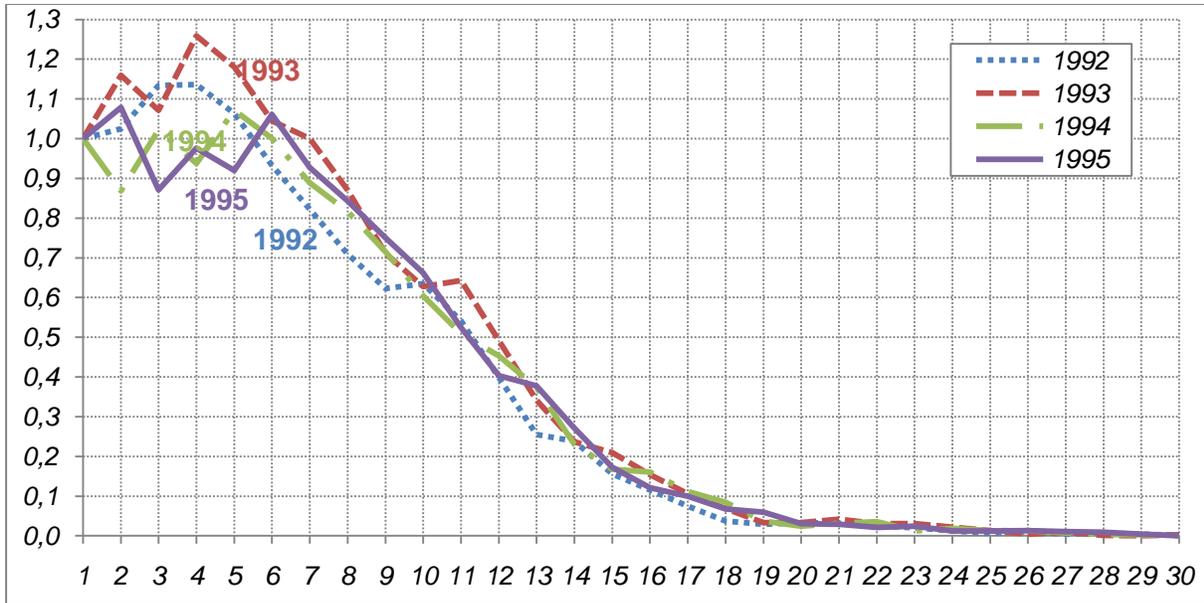


Figure 4- 8 Taux de survie transversaux pour les années 1992, 1993, 1994 et 1995. Source « Parc Auto »

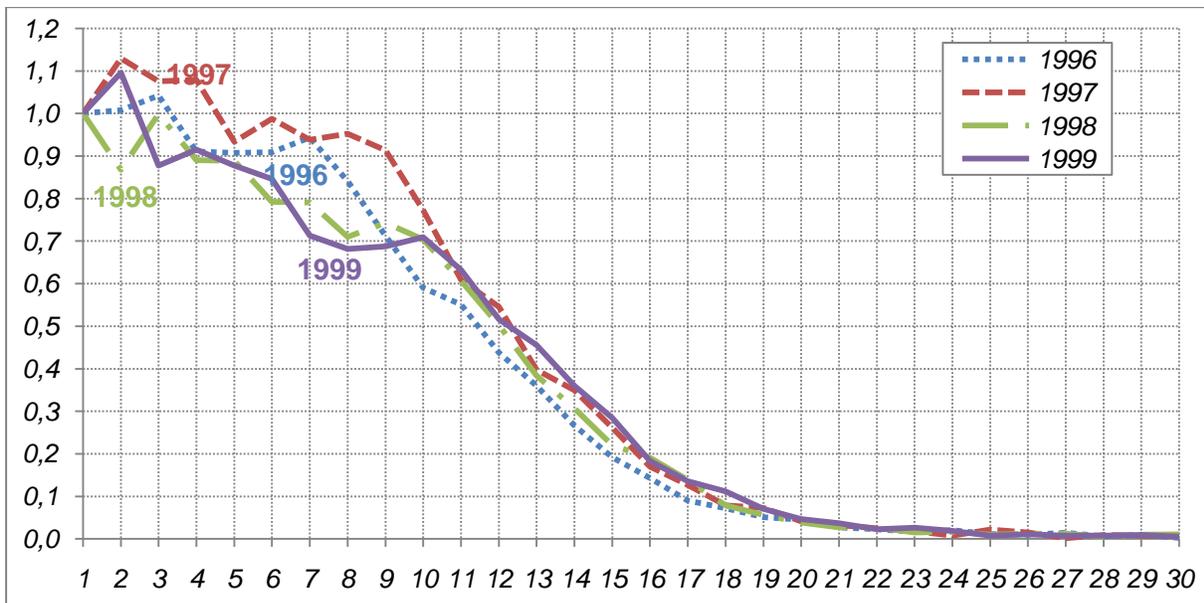


Figure 4- 9 Taux de survie transversaux pour les années 1996, 1997, 1998 et 1999. Source « Parc Auto »

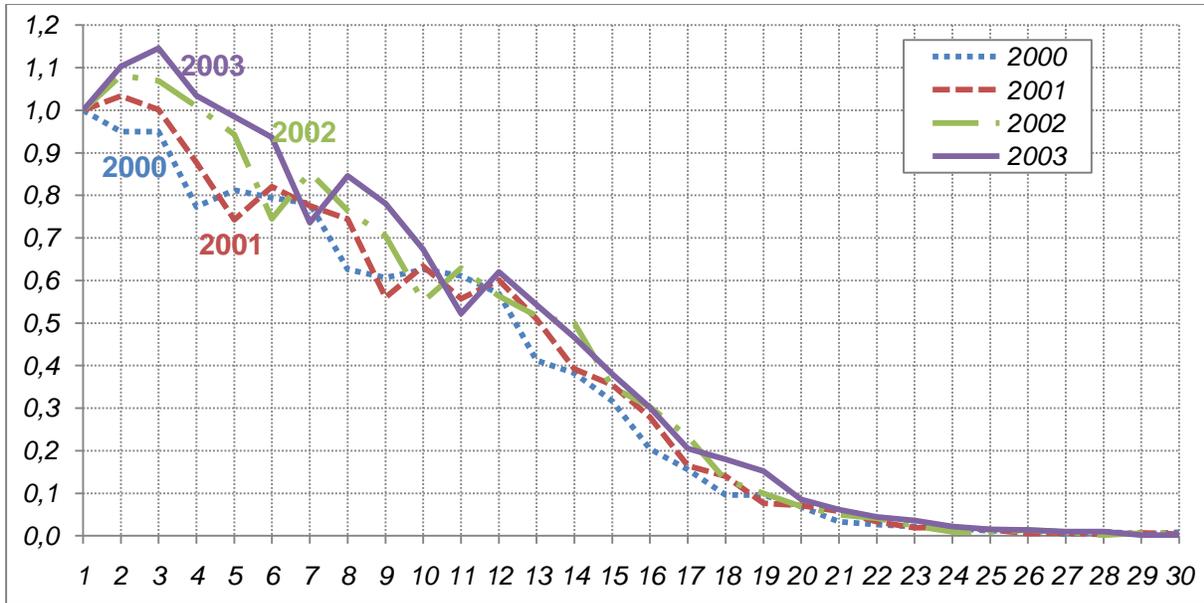


Figure 4- 10 Taux de survie transversaux pour les années 2000, 2001, 2002 et 2003. Source « Parc Auto »

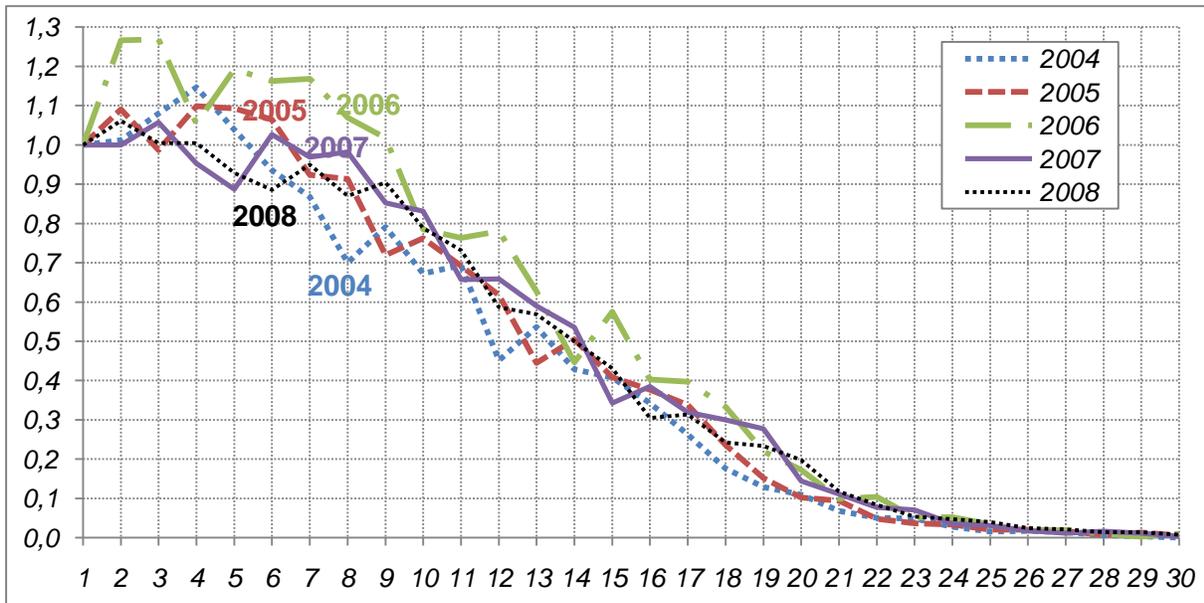


Figure 4- 11 Taux de survie transversaux pour les années 2004, 2005, 2006, 2007 et 2008. Source « Parc Auto »

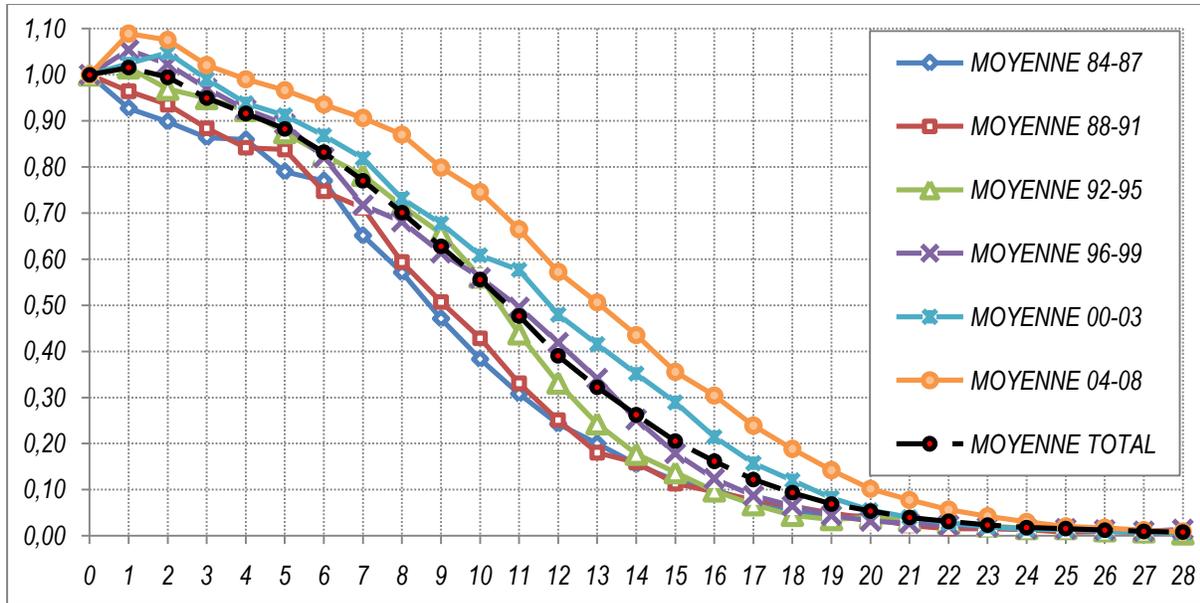


Figure 4- 12 Moyennes de taux de survie transversaux par catégories d'années. Source « Parc Auto »

Qu'il s'agisse des courbes de survie longitudinales ou transversales, il est fréquent d'observer un taux de survie supérieur à 1 en début de cycle de vie. Notre démarche diffère quelque peu de celle de Gallez, (1994a) puisque nous prenons le parti de diviser l'ensemble des effectifs par celui de l'année la plus récente ramenant ainsi à 1 le taux de survie de cette dernière. Cette démarche permet d'éviter de trop creuser l'asymétrie des taux de survie calculés et de préparer un ajustement par lois de survie qui soit, au possible, le plus conforme aux observations sachant que, de part leur spécifications théoriques, les lois de survie possèdent toutes une borne supérieure égale à 1 (elles sont bornées sur l'intervalle $[0;1]$ à valeurs dans \mathfrak{R}_+).

Il y a plusieurs raisons à l'observation de taux de survie supérieurs à 1 en début de cycle de vie (jusqu'à 7 ans en 2006) :

- La première a trait au champ observé après la première année puisque le parc à disposition des ménages, couvre non seulement l'ensemble des voitures particulières mais aussi pour partie certains véhicules de société dont l'usage est toléré pour des déplacements privés. Or, ce champ observé s'élargit en début de cycle de vie, car les voitures achetées par les entreprises ou les administrations sont en général revendues aux ménages au bout de deux à cinq ans en moyenne [Lambert et Madre, 1989 ; Gallez et Couturier, 2000].
- Le deuxième raison concerne la déclaration des ménages concernant l'année de construction des véhicules à disposition des ménages dans le panel Parc Auto qui peut être soumis pour certaines années à une confusion possible entre le millésime et

l'année de construction dans les déclarations. Rappelons que le millésime d'un véhicule correspond à l'année qui suit sa date d'immatriculation. Par exemple un véhicule mis la première fois en circulation entre le 1^{er} janvier et le 31 décembre 1993 sera millésimé 1994 alors que son année de première mise en circulation est 1993.

- La troisième raison concerne le phénomène de surreprésentation d'une génération de véhicule dans une vague annuelle du panel qui est aggravé par la correction apportée par l'indice d'évolution des immatriculations des immatriculations.

Une comparaison graphique en se fondant sur le critère de la durée de vie médiane donné par groupe d'années (figure 4-12) montre que cette dernière croît progressivement sans discontinuer. Elle passe d'environ 10 ans pour la période 1984 à 1987 à environ 13 ans pour celle couvrant la période 2004-2008. Dans la section suivante, les ajustements permis par des lois de survie paramétriques définiront avec plus de précision la vitesse de ces évolutions allant dans le sens d'un allongement de la durée de vie des véhicules.

2 Ajustements sur taux de survie transversaux et choix théorique de la loi de survie

L'ajustement des taux de survie par des lois de survie théoriques pose deux questions :

1. Pourquoi le faire ?

L'ajustement par lois de survie théorique est nécessaire pour plusieurs raisons. Il s'agit d'une part de lisser les imperfections et irrégularités qui, comme nous l'avons montré, dépassent largement les erreurs dues aux variabilités aléatoires d'échantillonnage. D'autre part lorsque la temporalité d'étude est infra-annuelle (semestrielle, trimestrielle ou mensuelle), la nécessité de disposer de taux de survie infra-annuels est rendue possible par l'apport d'une spécification paramétrique ayant l'avantage d'être continue sur l'intervalle quelle que soit l'unité temporelle utilisée. Par ailleurs, l'intérêt de décrire une relation fonctionnelle entre âge et taux de survie avec un nombre restreint de paramètres nous permet à la fois quantifier les évolutions et d'effectuer des projections de la structure sur la base de ces évolutions mesurées. Pour conclure, il est essentiel, du point de vue de la recherche théorique, de chercher à isoler un modèle paramétrique (même s'il est toujours possible de l'améliorer) comme étant celui qui représente au mieux la durée de vie d'un bien durable spécifique : le véhicule particulier.

2. Avec quelle(s) loi(s) de survie ?

Les résultats d'ajustements de taux de survie par une loi log-normale donne des résultats satisfaisants [Gallez, 1994a]. On ne peut néanmoins clore le débat concernant la question du choix de la forme paramétrique, tant que cette dernière peut être améliorée. Ce débat suppose

de passer par la comparaison des différentes lois de survie paramétriques qui peuvent servir d'alternatives selon les critères statistiques prédéfinis. L'enjeu étant de vérifier s'il est possible d'apporter une meilleure qualité dans les ajustements opérés sur les taux de survie avec une loi de survie de spécification différente. L'objectif consiste à améliorer globalement le modèle de renouvellement du parc automobile.

2.1. Choix de la loi de survie théorique

Le recours à un modèle de survie pour la modélisation du rythme de renouvellement du parc automobile suppose que le parc automobile au 1^{er} janvier d'une année n est égal à la somme des générations successives de véhicules, c'est-à-dire les immatriculations de voitures neuves

des années passées affectées d'un coefficient de survie transversal $P_n = \sum_{i=n-p}^n I_i S_{n-i}$ ou S_i est le taux de survie transversal i années après la mise en circulation.

L'enjeu dans la formalisation d'une telle approche repose sur la méthode d'estimation de la loi de survie. Ainsi, [Gallez \(1994a\)](#) fait l'hypothèse que la durée de vie $S(t)$ suit une loi log-normale. L'approche utilisée ensuite pour estimer les paramètres de cette loi consiste à analyser, génération par génération, la persistance temporelle des véhicules depuis leur date de mise en circulation. Globalement notre approche reste la même, nous introduirons cependant une étape supplémentaire relative au choix théorique de la loi de survie ajustée sur taux de survie transversaux. La sélection de la loi de survie théorique n'est pas pratiquée sur les taux longitudinaux en raison de la diminution progressive du nombre d'observations avec l'avancée générationnelle. La loi issue du processus de sélection est ensuite appliquée pour l'ajustement des taux de survie longitudinaux.

Notre approche repose sur l'amélioration de la forme fonctionnelle de la loi de survie proposée par [Gallez \(1994a\)](#). Il s'agit de justifier d'un point de vue statistique le choix de la loi paramétrique parmi un panel de lois existantes pouvant convenir à la modélisation du cycle de vie des véhicules particuliers. Nous procédons ainsi à l'estimation fonctionnelle, qui vise à approximer pour chaque année, les fonctions de survie (et de hasard) caractérisant le mieux les taux de survie transversaux observés sur le panel Parc Auto.

Jusqu'à présent parmi les lois statistiques utilisées pour l'ajustement de la durée de vie des véhicules particuliers sur le marché français, on recourt de manière quasi systématique à la loi log-normale [[Gallez, 1994a](#); [Bourdeau, 1998](#) ; [Jeager, 1999](#) ; [Jeger, 2001](#); [Lacour et Joumard, 2002](#) ; [Hugrel et Joumard, 2004, 2006](#)] dont la loi de survie mesurant la proportion de voitures de la génération g et atteignant l'âge a est donnée par l'équation :

$$S(t) = 1 - F(t) = 1 - \Phi\left(\frac{\text{Lnt} - \text{Lnm}}{\sigma}\right) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \text{erf}\left(\frac{\text{Lnt} - \text{Lnm}}{\sigma\sqrt{2}}\right)$$

Où ϕ et Φ désignent respectivement la fonction de densité et la fonction de répartition de la loi normale centrée réduite, m l'abscisse du taux de survie médian, σ mesure la dispersion des durées de vie autour de la valeur médiane. Rappelons que l'indicateur donnant la rapidité de déclassement des véhicules est la fonction de hasard (voir annexe 4-5) suivante :

$$h(t) = \frac{1}{t\sigma} \frac{\phi\left(\frac{\text{Ln } t - \text{Ln } m}{\sigma}\right)}{1 - \Phi\left(\frac{\text{Ln } t - \text{Ln } m}{\sigma}\right)}$$

Zachariadis *et al.*, (1995) puis Ntziachristos *et al.*, (2008) appliquent une loi qui s'apparente partiellement à une loi de Weibull à trois paramètres :

$$S(a) = e^{\left[-\left(\frac{a+b_i}{T_i}\right)^{b_i} \right]}$$

Les paramètres a , b_i et T_i représentant respectivement l'âge en année du véhicule, le taux de hasard et la durée de vie caractéristique du véhicule de type i . Zachariadis *et al.* (1995), effectuent des ajustements sur des taux de survie annuels pour 12 pays de l'Union Européenne. Ils estiment que la durée de vie médiane des véhicules particuliers en 1995 était de 11,5 ans pour la France et l'Espagne, 9,6 ans pour l'ancienne Allemagne de l'Ouest, 12,9 années pour l'Italie, 20,6 années pour le Portugal et 9,7 années pour le Royaume Uni.

La loi log-normale permet un ajustement convenable des taux de survie transversaux empiriques [Gallez, 1994a ; Gallez et Couturier, 2000]. Nous voulons pourtant savoir s'il est possible d'améliorer la forme fonctionnelle. Pour ce faire, nous mettons volontairement en concurrence trois des lois de survie paramétriques fréquemment utilisées dans les domaines de la physique, de la biostatistique, ou de l'économie [Kieffer, 1988]. Ainsi les lois log-normale, log-logistique et de Weibull (des précisions sur ces lois sont données dans les annexes 4-1 à 4-3) seront tour à tour ajustées sur nos données puis confrontées les unes aux autres. Pour ce qui est du critère de sélection de la forme paramétrique la plus adéquate, nous comparerons la qualité des différents ajustements à l'aide de la statistique de Fisher⁴⁷ (voir chapitre 2 pour les détails techniques).

⁴⁷ Pour ne pas retirer tous ses repères au lecteur qui reste malgré tout familier au coefficient de détermination, celui-ci sera systématiquement présenté dans le tableau des résultats. Rappelons que lorsque le nombre d'observations des séries ajustées restent identique et que le nombre de paramètres

2.2. Ajustement à l'aide d'une loi log-normale

La loi log-normale est la loi de référence pour l'ajustement des taux de survie empiriques transversaux du parc automobile français. L'approche recourant à une loi de survie de type log-normale a été amplement développée par Gallez, (1994a) pour ajuster des taux de survie du parc automobile. Les résultats obtenus par Gallez, (1994a) puis par Gallez et Couturier, (2001) ont été exploités par la suite dans de nombreux travaux afin de projeter la structure du parc [par ex. Bourdeau, 1998 ; Jeager, 1999 ; Jeger, 2001; Lacour et Joumard, 2002 ; Hugrel et Joumard, 2004, 2006].

| Loi log-normale | Nb. Obs. | Médiane (m) | Sigma (σ) | Intervalle de confiance de la médiane (m) à 95% | Intervalle de confiance de sigma (σ) à 95% | R ² | Fisher |
|-----------------------|----------|-----------------|--------------------|---|---|----------------|--------|
| <i>Années 84-87</i> | 28 | 8,365 | 0,5335 | [8,040 ; 8,689] | [0,4817 ; 0,5853] | 0,9933 | 1931 |
| <i>Années 88-91</i> | 28 | 8,681 | 0,5016 | [8,377 ; 8,986] | [0,4546 ; 0,5487] | 0,9942 | 2270 |
| <i>Années 92-95</i> | 28 | 9,985 | 0,4077 | [9,705 ; 10,265] | [0,3696 ; 0,4459] | 0,9957 | 3016 |
| <i>Années 96-99</i> | 28 | 10,109 | 0,4636 | [9,770 ; 10,449] | [0,4180 ; 0,5092] | 0,9948 | 2474 |
| <i>Années 00-03</i> | 28 | 11,214 | 0,4460 | [10,889 ; 11,539] | [0,4062 ; 0,4858] | 0,9960 | 3213 |
| <i>Années 04-08</i> | 28 | 12,825 | 0,3827 | [12,559 ; 13,091] | [0,3539 ; 0,4115] | 0,9977 | 5651 |
| <i>Moyenne totale</i> | 28 | 10,239 | 0,4696 | [10,003 ; 10,476] | [0,4382 ; 0,5010] | 0,9975 | 5189 |
| <i>Année 2008</i> | 28 | 12,793 | 0,4155 | [12,377 ; 13,209] | [0,3701 ; 0,4610] | 0,9945 | 2360 |

Tableau 4- 1 Paramètres d'ajustement d'une loi log-normale à des taux de survie moyens par groupes d'années

Les ajustements⁴⁸ effectués sur des taux de survie moyens par période ont une statistique de Fisher comprise entre 1931 ($R^2=0,9933$) pour la série des taux de survie annuels moyens de la période 1996-1999 et 5651 ($R^2=0,9977$) pour celle des années 2004-2008. Les statistiques de Fisher sont suffisamment élevées pour indiquer que la loi de survie log-normale convient pour des ajustements sur taux de survie de véhicules particuliers. Le taux de survie médian augmente progressivement par groupe d'années, passant de 8,37 ans pour la période 1984-1987 à près 12,83 ans pour celle allant de 2004 à 2008. L'allongement de la durée de vie des véhicules particuliers contribue à expliquer la hausse de l'âge moyen du parc automobile et le vieillissement de ce dernier (voir tableau 4-1 et figures 4-13 à 4-16).

ne change pas d'un modèle à l'autre, on peut indifféremment faire appel au coefficient de détermination ou au critère de Fisher.

⁴⁸ Voir l'Annexe 3 pour les estimations des paramètres sur taux de survie annuels entre 1984 et 2007.

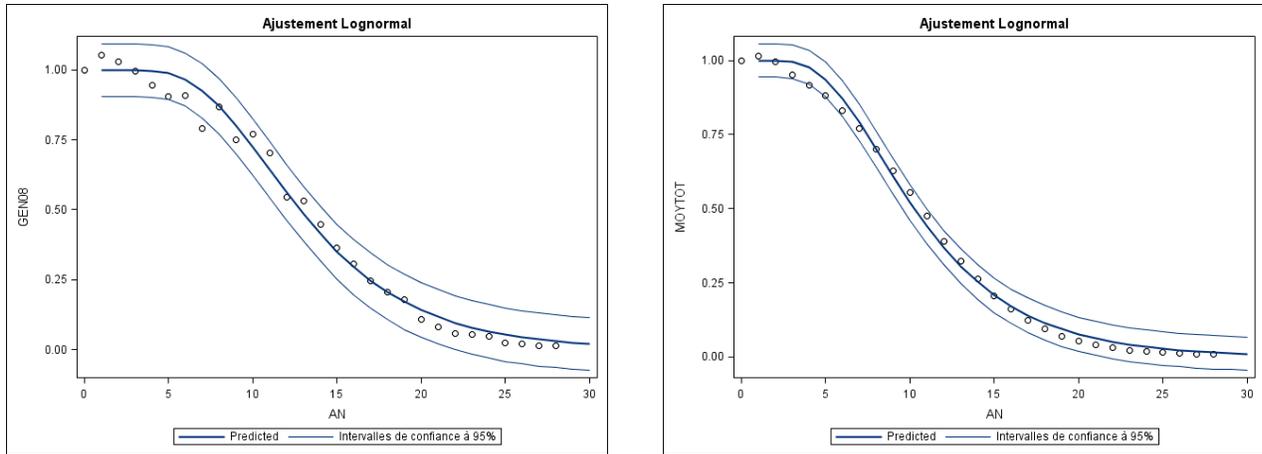


Figure 4- 13 Ajustements des taux de survie transversaux pour l'année 2008 (gauche) et moyenne totale (1984 à 2008) à une loi de survie log-normale

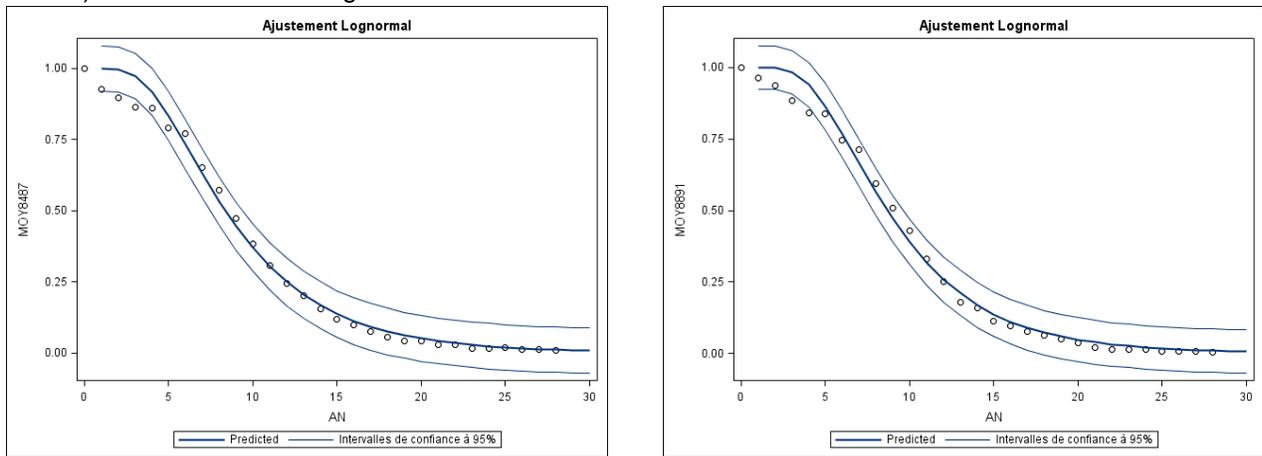


Figure 4- 14 Ajustements des taux de survie transversaux moyens des années 1984 à 1987 (gauche) et 1988 à 1991 (droite) à une loi de survie log-normale

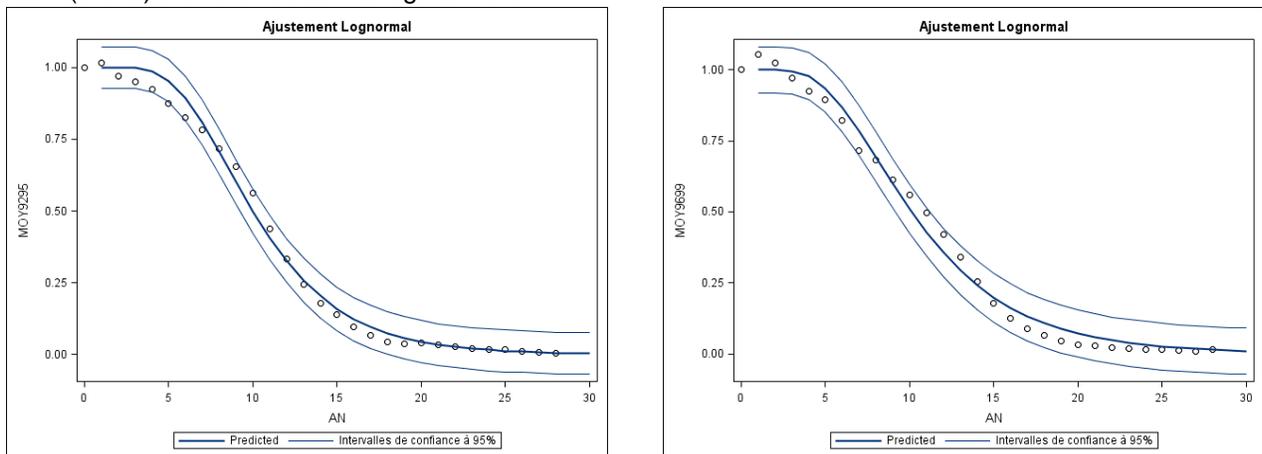


Figure 4- 15 Ajustements des taux de survie transversaux moyens des années 1992 à 1995 (gauche) et 1996 à 1999 (droite) à une loi de survie log-normale

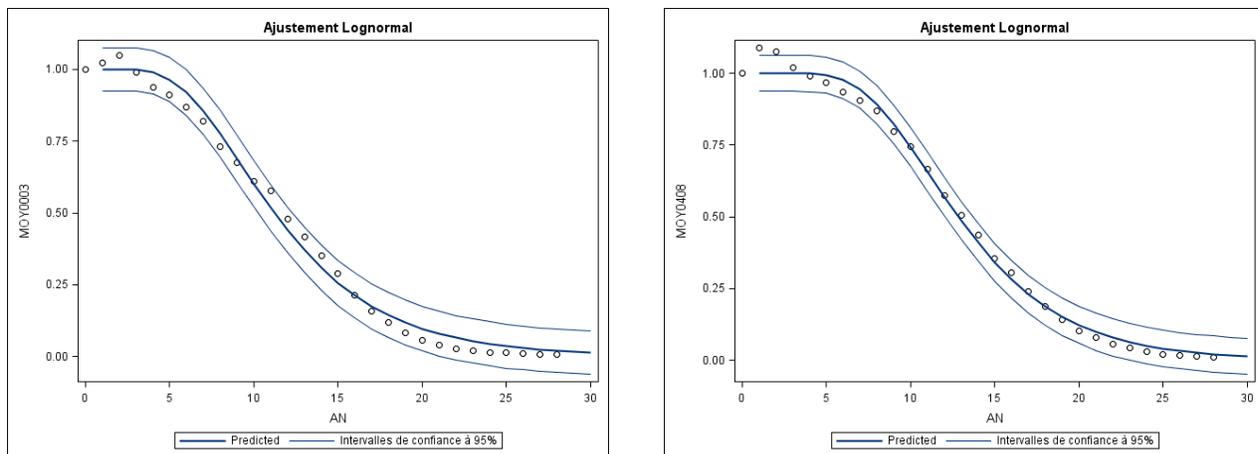


Figure 4- 16 Ajustements des taux de survie transversaux moyens des années 2000 à 2003 (gauche) et 2004 à 2008 (droite) à une loi de survie log-normale

2.3. Ajustement à l'aide d'une loi log-logistique

La loi log-logistique possède, tout comme la loi log-normale, un hasard non monotone croissant puis décroissant qui dépend de l'inverse du ratio de Mills (voir annexe 4-2). Les résultats⁴⁹ obtenus pour l'ajustement de la loi sur les taux de survie transversaux moyens par période sont représentés dans le tableau 4-2. La comparaison de la qualité des ajustements selon la statistique de Fisher montre une différence explicite au désavantage de la loi log-logistique. En effet, avec une statistique de Fisher calculée à 1774, la qualité de l'ajustement d'une loi log-logistique sur taux de survie moyens sur la période 1984 à 2008, est moins bon que celui effectué à partir de la loi log-normale dont le Fisher calculé s'élève à 5189. D'autre part, quelle que soit l'année d'observation, la loi log-logistique apporte une qualité d'ajustement inférieure à une loi log-normale selon les deux critères de comparaison (Fisher ou R^2). Notons que pour l'année 2006, la loi log-logistique offre une meilleure qualité d'ajustement. Cela s'explique par une asymétrie des taux de survie transversaux plus importante que pour les autres années, asymétrie qui est mieux traitée par une loi log-logistique qui possède une queue de distribution plus épaisse que les lois log-normale et Weibull.

⁴⁹ Voir en annexe 4 pour les estimations des paramètres sur taux de survie annuels entre 1984 et 2007.

Chapitre 4 Lois de survie du parc automobile

| Loi log-logistique | Nb. Obs. | Gamma (γ) | Alpha (α) | Intervalle de confiance de gamma (γ) à 95% | Intervalle de confiance de alpha (α) à 95% | R ² | Fisher |
|--------------------|----------|--------------------|--------------------|---|---|----------------|--------|
| Années 84-87 | 28 | 0,00357 | 7,5218 | [0,000526 ; 0,00661] | [6,4989 ; 8,5448] | 0,9873 | 972 |
| Années 88-91 | 28 | 0,00201 | 8,0926 | [0,000124 ; 0,00389] | [6,9770 ; 9,2082] | 0,9879 | 1028 |
| Années 92-95 | 28 | 0,000192 | 10,2936 | [-0,00003 ; 0,000416] | [8,9675 ; 11,6196] | 0,9920 | 1558 |
| Années 96-99 | 28 | 0,000562 | 8,9698 | [-0,00009 ; 0,00122] | [7,6641 ; 10,2754] | 0,9888 | 1111 |
| Années 00-03 | 28 | 0,000209 | 9,6435 | [-0,00005 ; 0,000465] | [8,3256 ; 10,9615] | 0,9911 | 1397 |
| Années 04-08 | 28 | 0,000019 | 11,6604 | [0,000000 ; 0,000039] | [10,5378 ; 12,7830] | 0,9965 | 3551 |
| Moyenne totale | 28 | 0,000544 | 8,9511 | [0,000042 ; 0,00105] | [7,9244 ; 9,9779] | 0,9930 | 1774 |
| Année 2008 | 28 | 0,000038 | 10,9006 | [-0,00002 ; 0,000095] | [9,3602 ; 12,4410] | 0,9916 | 1483 |

Tableau 4- 2 Paramètres d'ajustement d'une loi log-logistique à des taux de survie moyens par catégories d'années

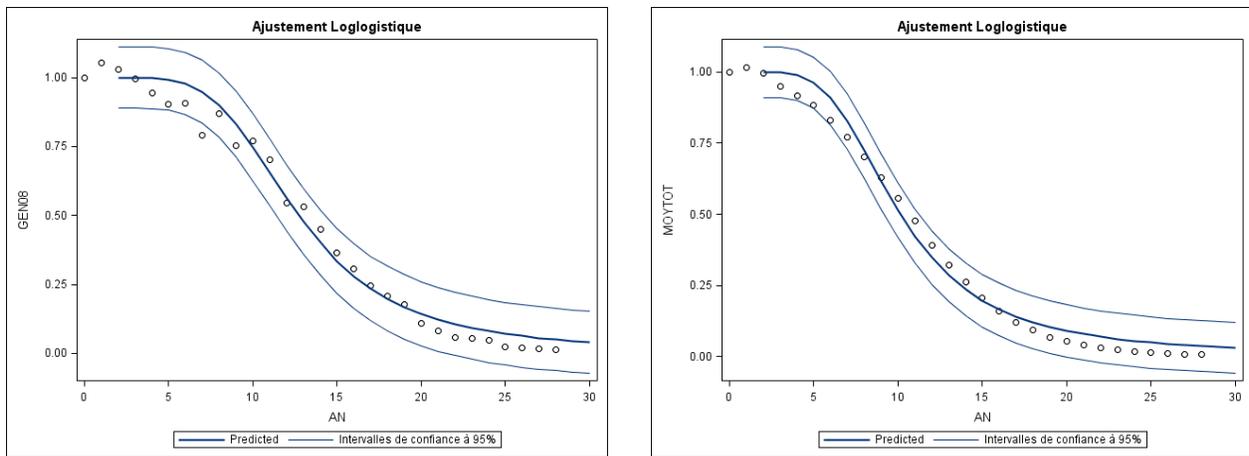


Figure 4- 17 Ajustements des taux de survie transversaux pour l'année 2008 (droite) et moyenne 1984 à 2008 à une loi de survie log-logistique

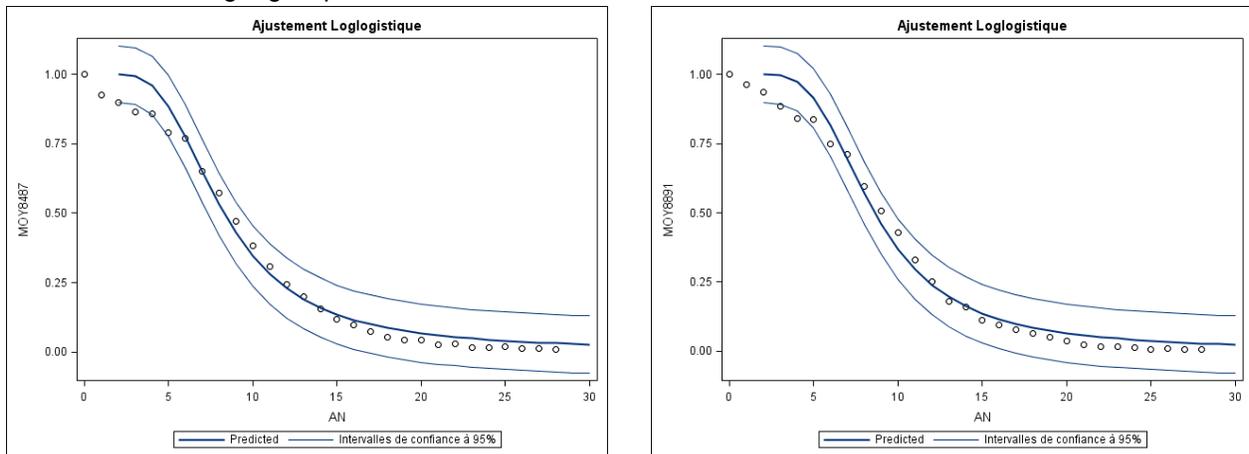


Figure 4- 18 Ajustements des taux de survie transversaux moyens des années 1984 à 1987(gauche) et 1988 à 1991 (droite) à une loi de survie log-logistique

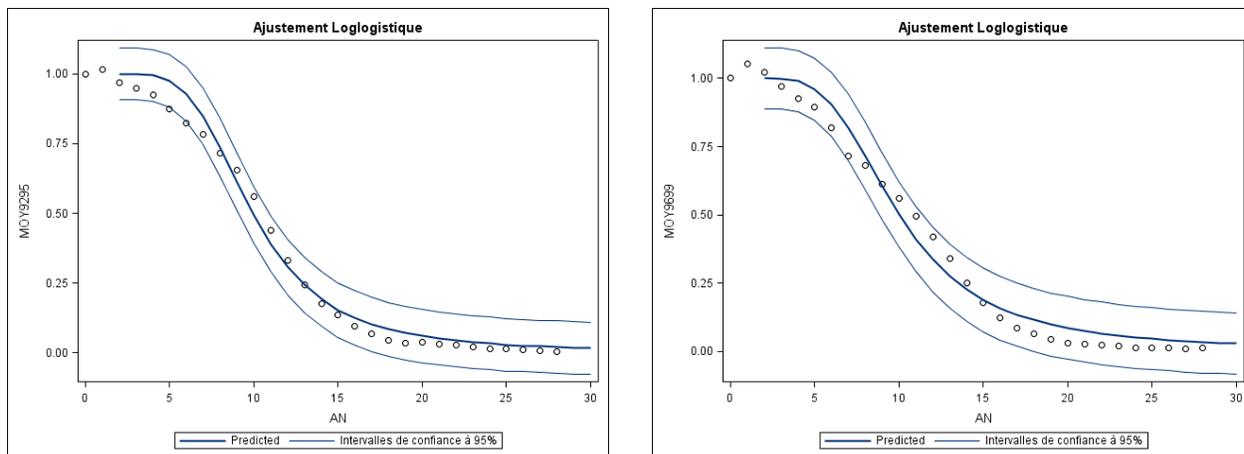


Figure 4- 19 Ajustements des taux de survie transversaux moyens des années 1992 à 1995(gauche) et 1996 à 1999 (droite) à une loi de survie log-logistique

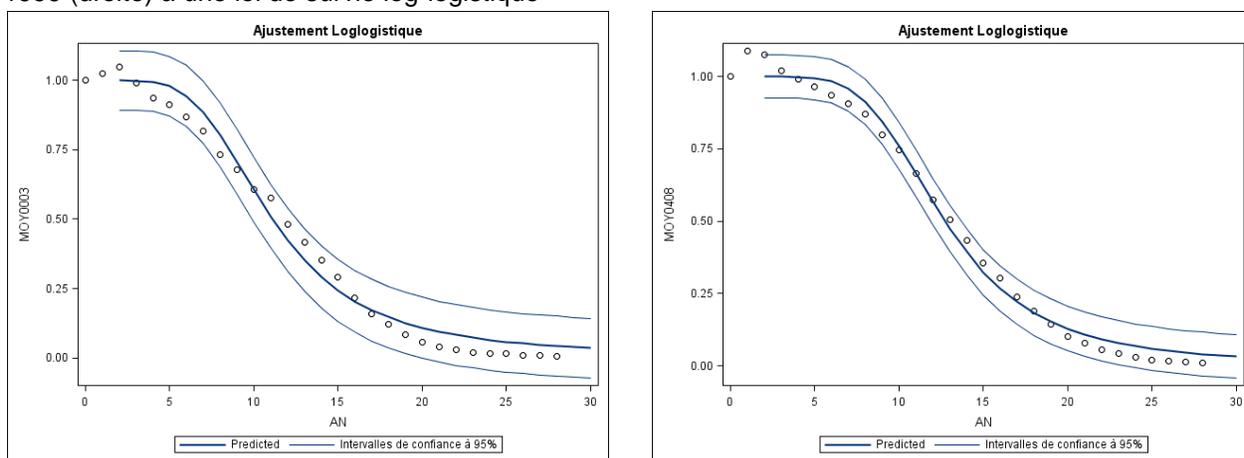


Figure 4- 20 Ajustements des taux de survie transversaux moyens des années 2000 à 2003(gauche) et 2004 à 2008 (droite) à une loi de survie log-logistique

2.4. Ajustement à l'aide d'une loi de Weibull

La loi de Weibull à deux paramètres s'ajuste relativement bien à nos moyennes de taux de survies⁵⁰ puisque la statistique de Fisher est nettement supérieure à celle des lois log-logistique ou log-normale quelle que soit la période choisie (voir tableau 4-3). La loi de Weibull semble ainsi être le meilleur choix pour caractériser et modéliser le cycle de vie des véhicules particuliers. La raison tient principalement à sa « flexibilité » mais aussi dans sa capacité intrinsèque à s'ajuster et à représenter la durée de vie des véhicules particuliers. La survie des véhicules particuliers étant mieux modélisée par un hasard monotone croissant caractérisant la loi de Weibull plutôt que par un hasard non monotone (croissant puis décroissant) caractérisant les lois log-normale et log-logistique.

⁵⁰ Voir l'Annexe 2 pour les estimations des paramètres sur taux de survie annuels entre 1984 et 2007.

Chapitre 4 Lois de survie du parc automobile

Globalement, nous pouvons remarquer que le paramètre de forme alpha augmente par groupes d'années (voir figure 4-21), excepté après 1992-1995, période marquée par le début de la mise en place des primes au remplacement (*balladurette* puis *jupette*). Ces primes au remplacement ont contribué à diminuer de façon mécanique les taux de survie des véhicules les plus anciens et à augmenter ceux des générations les plus récentes ce qui au final augmente l'asymétrie de la loi de survie elle-même caractérisée par un paramètre alpha relativement élevé (2,701) pour la période 1992 à 1995. Le paramètre beta ne cesse de croître. Il gagne progressivement près de 4,6 ans en passant de 10,39 ans pour les années 1984-1987 à 15,01 ans pour les années 2004 à 2008. Cette croissance est la principale caractéristique de l'allongement de la durée de vie des véhicules particuliers en posant paramètre alpha constant.

| Loi Weibull | Nb. Obs | Alpha (α) | Beta (β) | Intervalle de confiance de Alpha (α) à 95% | Intervalle de confiance de Beta (β) à 95% | R ² | Fisher |
|----------------|---------|--------------------|------------------|---|---|----------------|--------|
| Années 84-87 | 28 | 1,973 | 10,385 | [1,836 ; 2,110] | [10,130 ; 10,640] | 0,9969 | 4188 |
| Années 88-91 | 28 | 2,123 | 10,642 | [1,994 ; 2,252] | [10,428 ; 10,857] | 0,9978 | 6006 |
| Années 92-95 | 28 | 2,701 | 11,762 | [2,542 ; 2,856] | [11,576 ; 11,948] | 0,9985 | 8502 |
| Années 96-99 | 28 | 2,399 | 12,242 | [2,254 ; 2,544] | [12,021 ; 12,463] | 0,9982 | 7312 |
| Années 00-03 | 28 | 2,479 | 13,486 | [2,367 ; 2,590] | [13,310 ; 13,662] | 0,9991 | 13761 |
| Années 04-08 | 28 | 2,899 | 15,012 | [2,708 ; 3,090] | [14,763 ; 15,262] | 0,9984 | 7919 |
| Moyenne totale | 28 | 2,316 | 12,418 | [2,267 ; 2,365] | [12,338 ; 12,499] | 0,9998 | 57791 |
| Année 2008 | 28 | 2,636 | 15,142 | [2,433 ; 2,838] | [14,823 ; 15,460] | 0,99974 | 5061 |

Tableau 4- 3 Paramètres d'ajustement d'une loi de Weibull à des taux de survie moyens par catégories d'années.

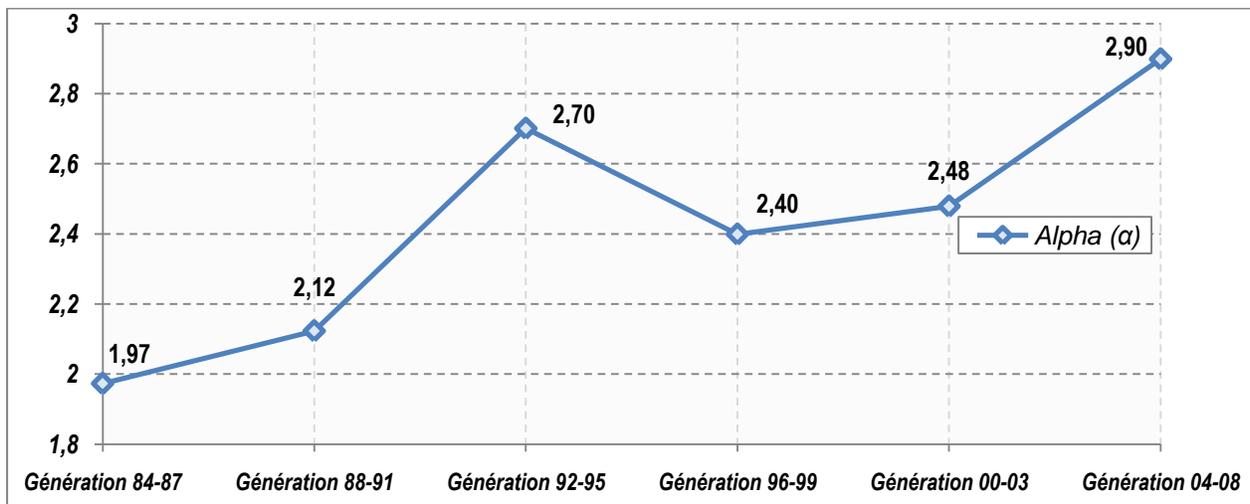


Figure 4- 21 Evolution du paramètre alpha estimé à partir de moyennes de taux de survie transversaux par catégories d'années. Source « Parc Auto »

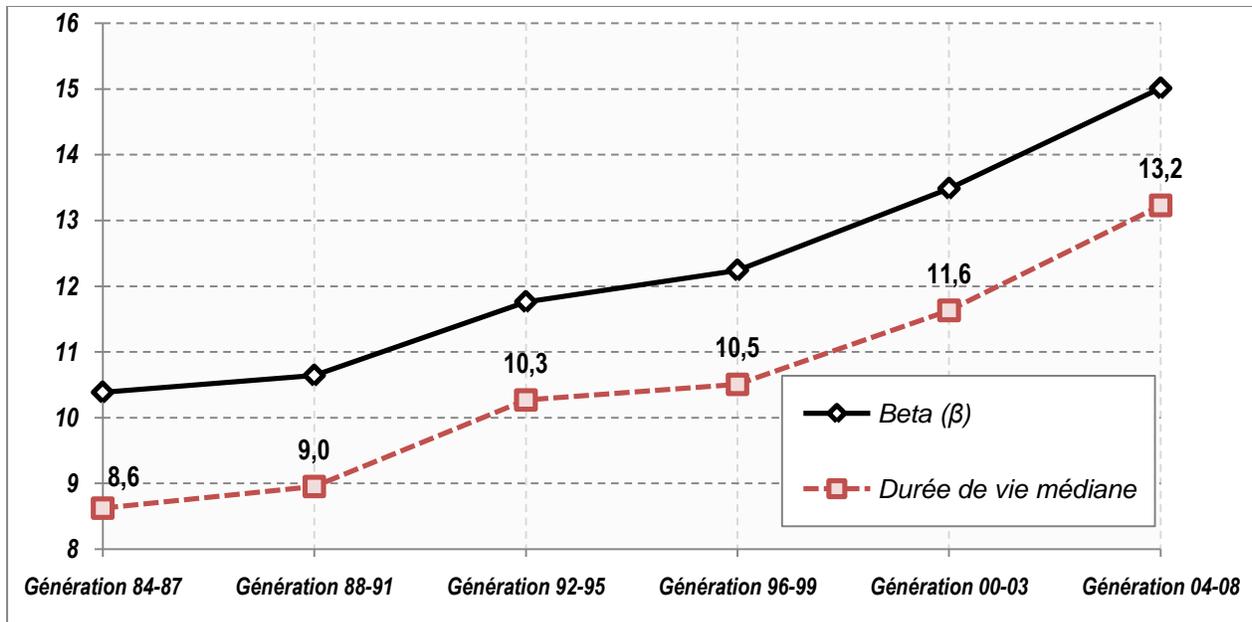


Figure 4- 22 Evolution du paramètre Beta et de la durée de vie médiane estimée sur des moyennes de taux de survie transversaux par catégories d'années. Source « Parc Auto »

La durée de vie médiane⁵¹, calculée à partir de la formule suivante $t_{1/2} = \sqrt{\frac{\alpha}{\beta \cdot \ln(2)}}$, croît de 4,6 ans entre les périodes 1984-1987 à 2004-2008 en passant de 8,62 ans à 13,23 ans (voir figure 4-22). D'autre part la croissance de la durée de vie des véhicules particuliers observée depuis 1984 s'est stabilisée après 1995 sous l'effet des « primes à la casse », l'âge médian n'augmentant que de 0,24 ans en moyenne entre la période 1992-1995 et la suivante. Cette observation permet de souligner l'effet des primes au remplacement, *balladurette et jupette*, sur la hausse du taux de déclassement des véhicules particuliers. Ce phénomène est lié à la stabilisation temporaire de l'âge moyen du parc entre 1994 et 1996 (voir chapitre 3).

La durée de vie médiane moyenne du parc repart ensuite rapidement à la hausse en gagnant près de 2,7 années au total entre les périodes 1996-1999 et 2004-2008. Cette observation permet de montrer les limites de l'impact d'une politique de prime au remplacement sur la baisse de la durée de vie et incidemment sur le rajeunissement du parc. Certains travaux ayant déjà montré que les primes au remplacement ont un impact de court terme sur le rajeunissement du parc [Cauret *et al.*, 2003]. Par ailleurs, cette hausse importante de la durée de vie médiane laissait déjà entrevoir une structure du parc ayant un rythme de renouvellement en perte de vitesse. Ce sera l'une des principales causes de la mise en place de la prime au remplacement en décembre 2008.

⁵¹ À ne pas confondre avec l'âge médian.

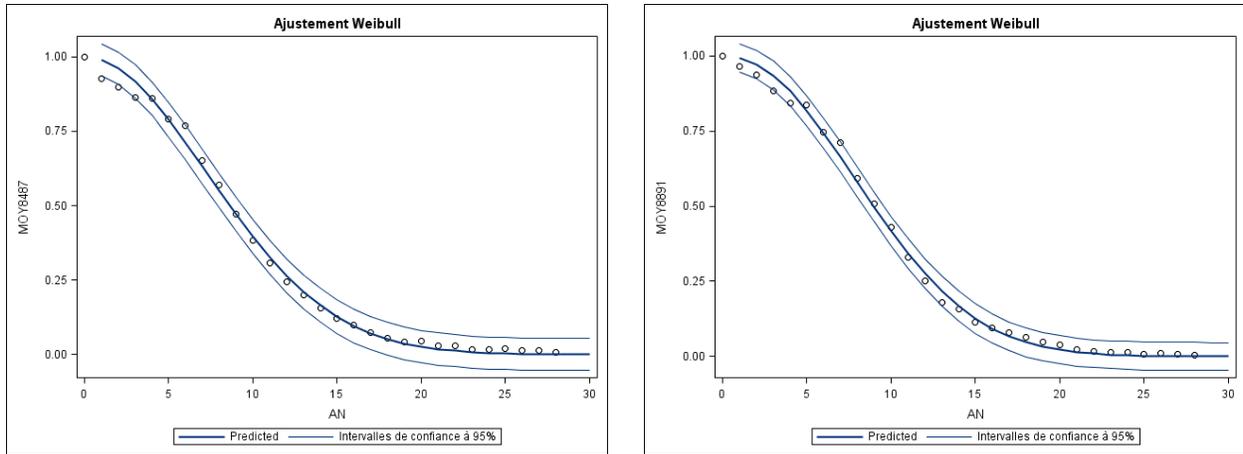


Figure 4- 23 Ajustements des taux de survie transversaux moyens des années 1984 à 1987(gauche) et 1988 à 1991 (droite) à une loi de survie de Weibull

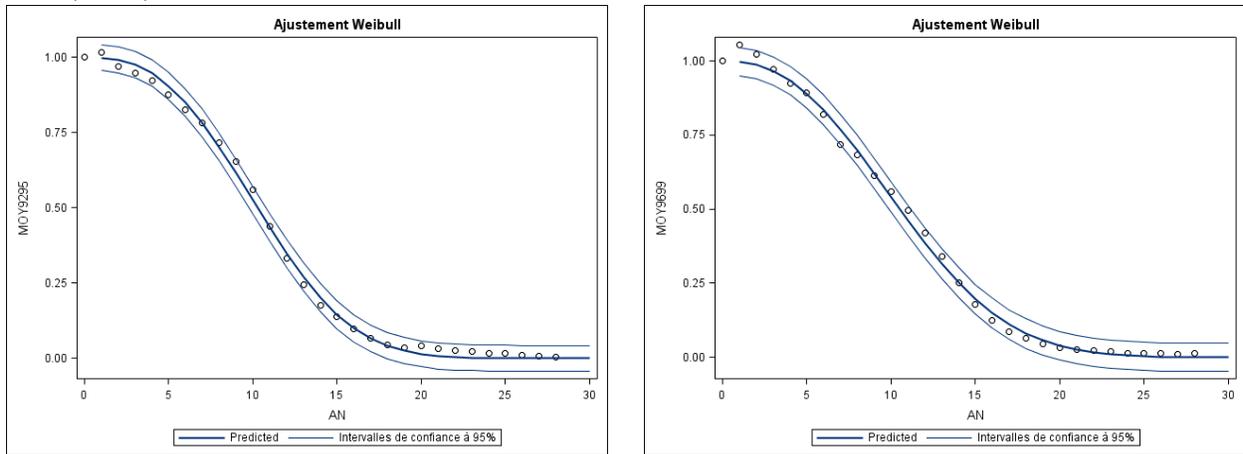


Figure 4- 24: Ajustements des taux de survie transversaux moyens des années 1992 à 1995 (gauche) et 1996 à 1999 (droite) à une loi de survie de Weibull

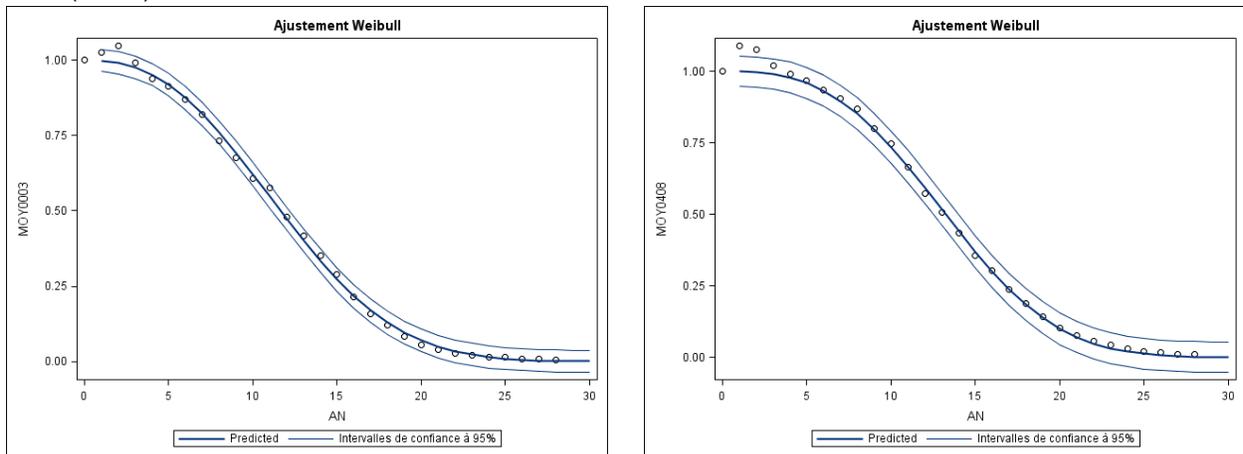


Figure 4- 25 Ajustements des taux de survie transversaux moyens des années 2000 à 2003 (gauche) et 2003 à 2008 (droite) à une loi de survie de Weibull

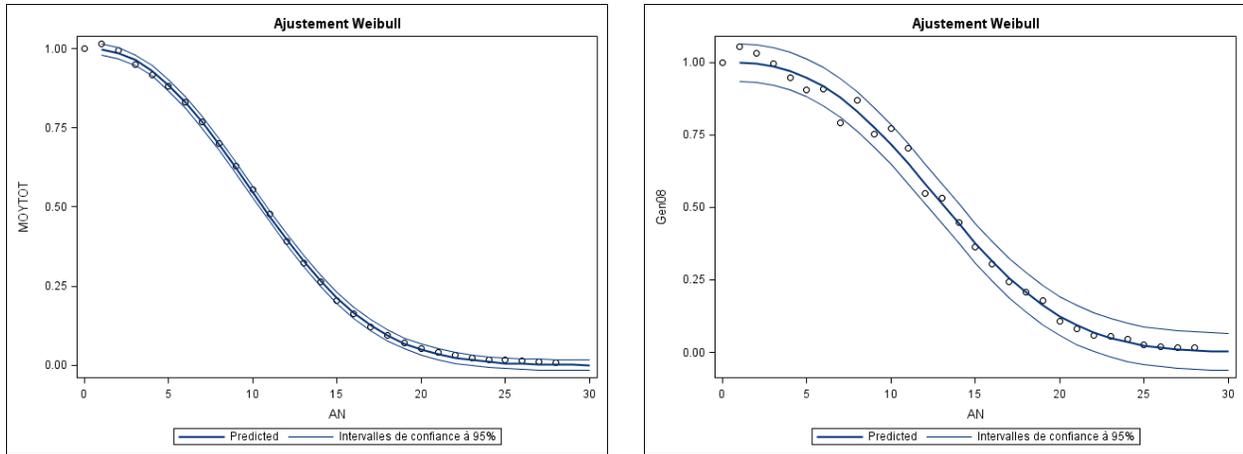


Figure 4- 26 Ajustements des taux de survie transversaux moyens des années 1984 à 2008 (gauche) et pour 2008 (droite) à une loi de survie de Weibull

L'évolution temporelle des lois de survie transversales s'accélère dès 1995 mais la plus forte variation est observée entre 2000 et 2005. La figure 4-27 donne un aperçu de l'ampleur de la hausse de l'espérance de vie des véhicules par intervalle de 5 années depuis 1985. On peut aussi noter qu'entre 2005 et 2008 cette hausse de la durée de vie semble concerner particulièrement les véhicules de plus de 13 ans.

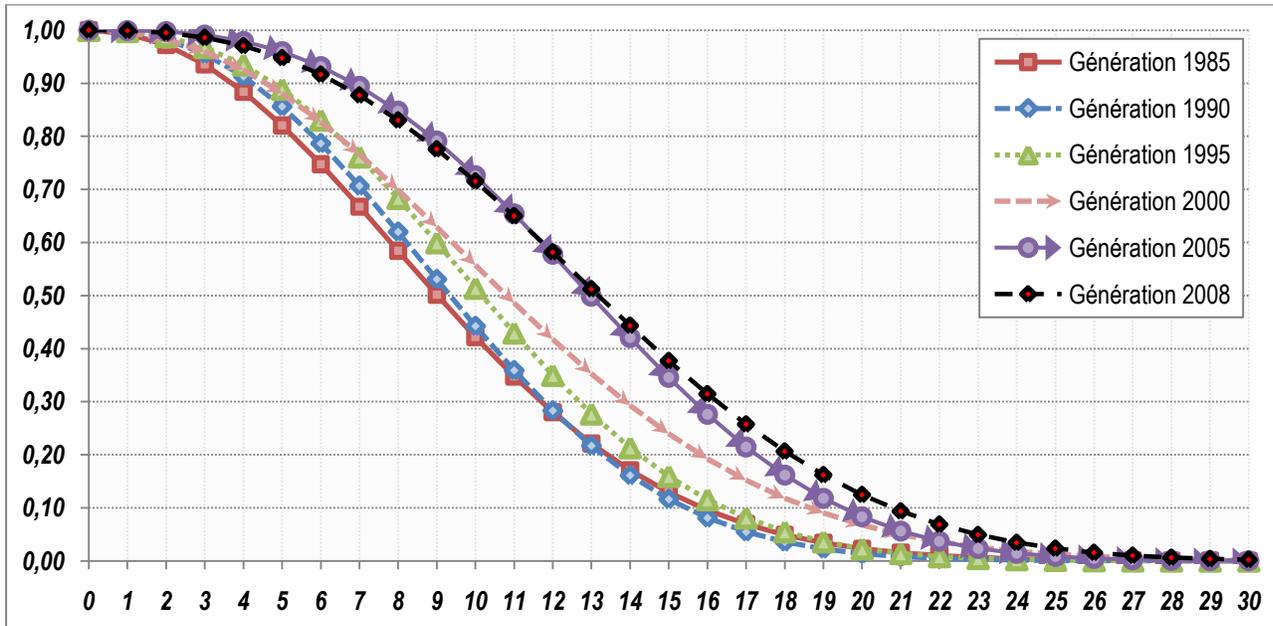


Figure 4- 27 Evolution temporelle des lois de survie transversales par périodes de 5 années depuis 1985

2.5. Ajustement des taux de survie longitudinaux par une loi de Weibull

L'ajustement des taux de survie longitudinaux est moins aisé que celui des taux transversaux. En effet, si pour des générations relativement anciennes 1984 à 1994 on dispose de suffisamment de taux de survie longitudinaux pour effectuer les ajustements, cette tâche est infructueuse lorsque le nombre d'observation descend en dessous de 7. Cela concerne toutes les générations à partir de 2002 (7 observations) jusqu'à 2008 (1 observation). D'autre part la forte érosion des taux de survie et la faible persistance générationnelle observée d'une vague à l'autre du panel nous imposent de fixer une valeur minimale pour le paramètre alpha que l'on pose égal à 2 (raison pour laquelle nous n'avons aucun intervalle de confiance sur alpha) (voir tableau 4-4).

| Ajustement WEIBULL | Nb. Obs. | Alpha (α) | Beta (β) | Intervalle de confiance de Beta (β) à 95% | R ² | Fisher |
|---------------------------|----------|--------------------|------------------|---|----------------|--------|
| <i>Génération 84-87</i> | 26 | 2 | 11,067 | [10,552 ; 11,582] | 0,952 | 2418 |
| <i>Génération 88-91</i> | 22 | 2,05 | 11,747 | [11,214 ; 12,280] | 0,955 | 2671 |
| <i>Génération 92-95</i> | 18 | 2,05 | 12,159 | [11,563 ; 12,756] | 0,963 | 2933 |
| <i>Génération 96-99</i> | 14 | 2,1 | 12,755 | [12,015 ; 13,494] | 0,969 | 3940 |
| <i>Génération 00-03</i> | 10 | 2,05 | 12,725 | [12,050 ; 13,400] | 0,999 | 17080 |
| <i>Génération 04-08</i> | 6 | N | N | N | N | N |
| <i>Moyenne totale</i> | 26 | 2,1 | 11,776 | [11,461 ; 12,091] | 0,996 | 7607 |

Tableau 4- 4 Paramètres d'ajustement d'une loi de Weibull à des taux de survie longitudinaux moyens par catégories de génération.

L'attrition des taux de survie longitudinaux affecte principalement la loi de survie en début de cycle de vie. Ce problème peut être contourné, pour partie, par l'adjonction d'une condition complémentaire sur l'âge limite de survie des véhicules particuliers. [Moutardier et Glaude \(1978\)](#) puis [Gallez \(1994a\)](#) fixent cet âge limite à 25 ans. Nous décidons néanmoins de ne pas contraindre les données sur leur âge maximal mais plutôt d'introduire une pondération des ajustements par les moindres carrés non-linéaire qui favorisera, pour chaque génération de véhicule observée, les valeurs des taux de survie les moins récents qui semblent aussi les plus robustes. En effet, les taux de survie situés en queue de distribution possèdent l'avantage de ne pas être soumis au palier d'introduction des véhicules d'entreprises venant s'ajouter après 4 ans. La pondération choisie est calculée suivant une fonction de l'exponentielle de l'âge pour chaque génération. Cette méthode ne dénature pas les résultats des ajustements effectués mais augmente de manière significative l'importance des observations de taux de survie qui se situent en queue de loi de survie et qui semblent les plus robustes. Les résultats de ces

Chapitre 4 Lois de survie du parc automobile

ajustements sont consignés dans le tableau 4-5 (voir en annexe 5-5 pour les résultats des ajustements par génération).

| Loi Weibull | Nb. Obs. | Alpha (α) | Beta (β) | Intervalle de confiance de Alpha (α) à 95% | Intervalle de confiance de Beta (β) à 95% | R ² | Fisher |
|------------------|-------------|--------------------|------------------|---|---|----------------|-------------|
| Génération 84-87 | 24 | 1,975 | 12,002 | [1,815 ; 2,135] | [11,377 ; 12,626] | 0,9923 | 1419 |
| Génération 88-91 | 20 | 2,294 | 13,119 | [2,118 ; 2,470] | [12,738 ; 13,500] | 0,9969 | 2861 |
| Génération 92-95 | 16 | 2,100 | 13,456 | [1,963 ; 2,376] | [13,285 ; 13,626] | 0,9961 | 3806 |
| Génération 96-99 | 12 | 1,803 | 13,793 | [1,626 ; 1,980] | [13,525 ; 14,061] | 0,9998 | 27175 |
| Génération 00-03 | 8 | 1,850 | 14,106 | [1,585 ; 2,176] | [13,721 ; 14,492] | 0,9997 | 22976 |
| Génération 04-08 | <i>n.c.</i> | <i>n.c.</i> | <i>n.c.</i> | <i>n.c.</i> | <i>n.c.</i> | <i>n.c.</i> | <i>n.c.</i> |
| Moyenne totale | 24 | 2,124 | 12,491 | [2,047 ; 2,200] | [12,221 ; 12,762] | 0,9981 | 5834 |

Tableau 4- 5 Paramètres obtenus par des ajustements pondérés par l'exponentielle de l'âge suivant une loi de Weibull appliquée à des taux de survie longitudinaux moyens par catégories de générations.

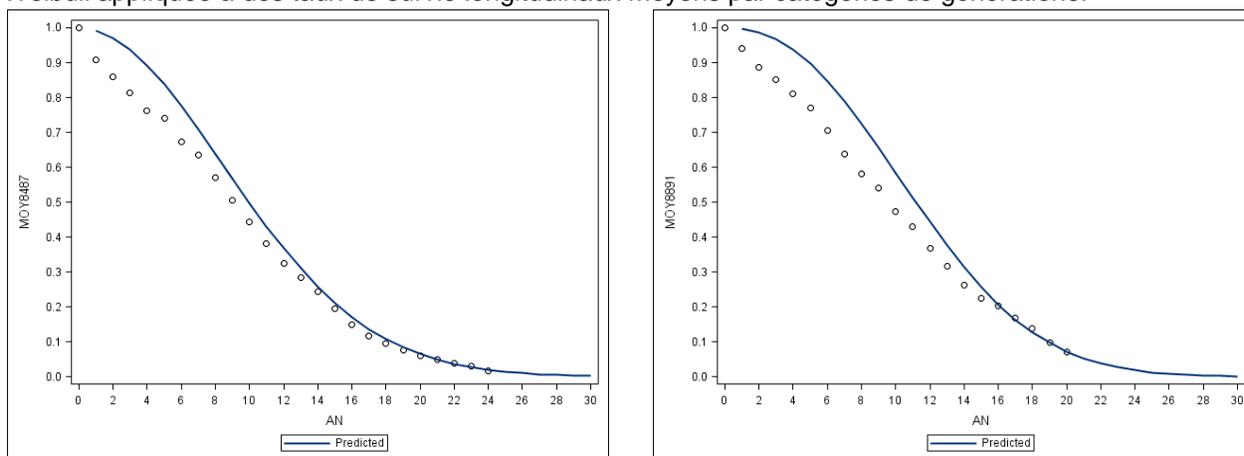


Figure 4- 28 Ajustements des taux de survie longitudinaux moyens des années 1984 à 1987(gauche) et 1988 à 1991 (droite) à une loi de survie de Weibull

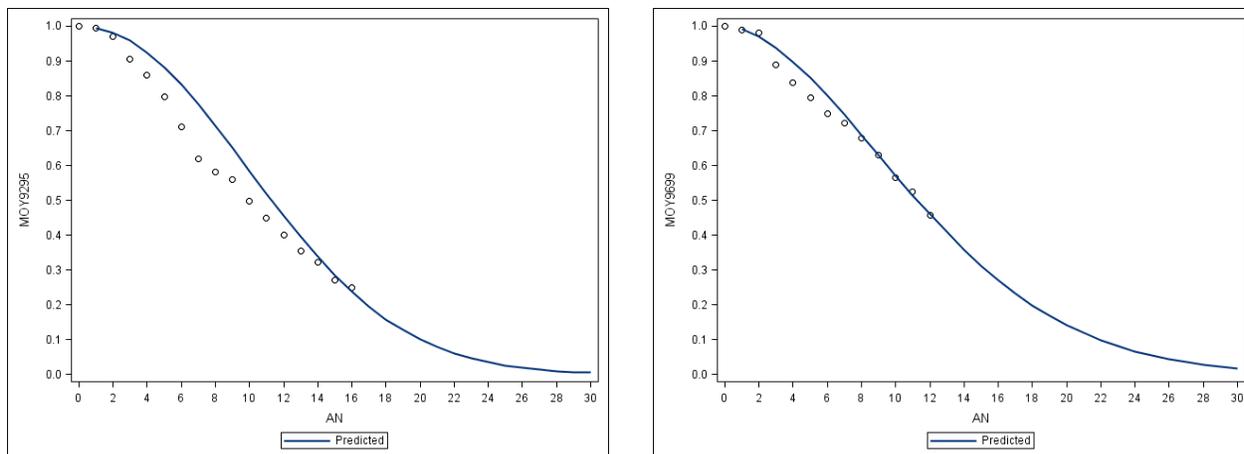


Figure 4- 29 Ajustements des taux de survie longitudinaux moyens des années 1992 à 1995 (gauche) et 1996 à 1999 (droite) à une loi de survie de Weibull

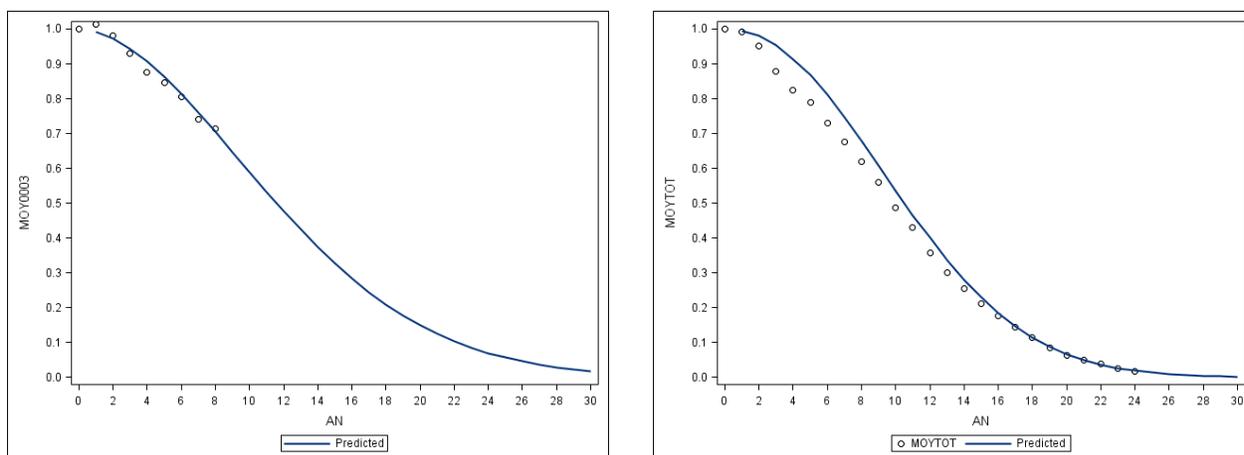


Figure 4- 30 Ajustements des taux de survie longitudinaux moyens des années 2000 à 2003 (gauche) et 1984 à 2008 (droite) à une loi de survie de Weibull

Les résultats obtenus (tableau 4-5) mettent en évidence la croissance progressive du paramètre beta qui passe de 12,0 ans sur la période 1984-1987 à 14,1 ans sur la période 2000-2003. On note cependant une baisse générale du paramètre alpha, qui passe de 2,29 pour la génération moyenne 1988-1991 à 1,85 pour la génération moyenne 2000-2003. Cette baisse progressive du paramètre alpha contrebalance les effets de la hausse du paramètre beta sur la hausse de la durée de vie médiane des véhicules particuliers. Au final la durée de vie médiane du parc automobile augmente progressivement d'environ 5 mois par génération moyenne en passant de 9,97 ans pour la génération moyenne 1984 à 1987 à 11,57 ans pour la génération moyenne 2000 à 2003.

Cette croissance assez modeste mais tout de même substantielle, représente la principale caractéristique de l'allongement de la durée de vie physique des véhicules particuliers expliquée par leur robustesse croissante depuis le milieu des années 80. Les nouvelles techniques de

peinture industrielle, notamment la cataphorèse, rallonge la durée de vie du châssis et de la carrosserie, ce qui permet de généraliser progressivement les garanties contre la corrosion et la rouille de la carrosserie par les constructeurs. Pour ce qui est des moteurs, les principales innovations techniques concernent le remplacement progressif du carburateur par l'injection directe et la baisse de la consommation unitaire. Par ailleurs, l'introduction de véhicules diesel de plus en plus nombreux au sein du parc automobile a sans doute eu un effet sur l'accroissement de la durée de vie globale générationnelle des véhicules particuliers.

3. Conclusion et choix optimal de la loi de survie

Les principaux travaux conduits jusqu'à présent dans l'évaluation paramétrique des lois de survie des véhicules particuliers français recourent principalement à des lois de type log-normales [Gallez, 1994a; Jaeger, 1999; Jeger, 2001 ; Gallez et Couturier, 2000]. Nos résultats montrent que la loi log-normale est adaptée à l'ajustement de taux de survie transversaux et longitudinaux des véhicules particulier. Pourtant, la loi de Weibull s'ajuste globalement mieux aux taux de survie transversaux selon le critère de Fisher.

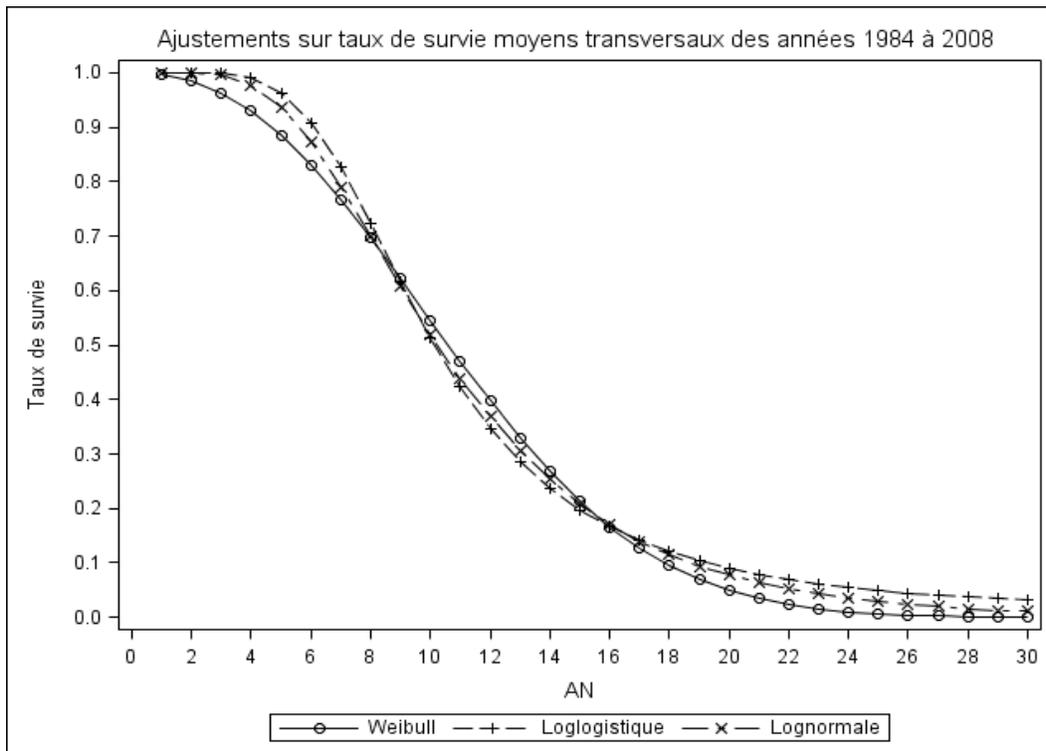


Figure 4- 31 Ajustements effectués avec trois formes de lois de survie sur la moyenne des taux de survie transversaux entre 1984 et 2008

Le recours à la loi de survie paramétrique de type Weibull permet d'améliorer la qualité des ajustements sur le taux de survie transversaux. Les principales retombées attendues d'un

meilleur ajustement sont l'amélioration de la précision des lois de survie élaborées ainsi qu'une amélioration en conséquence des estimations et des projections du parc automobile. Il faut tout de même noter que le recours à une loi de Weibull n'améliore pas toujours la qualité des ajustements notamment pour les années 1992 et 2006 (voir figures 4-32 et 4-33). Ces années sont caractérisées par une forte asymétrie entre les taux de survie des plus jeunes et les plus vieilles générations. Pour ces deux cas extrêmes, les hasards des lois log-logistiques et log-normale sont plus adaptés car non-monotones. Ces lois, et particulièrement la loi log-logistique, présentent aussi l'avantage d'avoir une queue de distribution plus épaisse.

D'autre part, les critères du coefficient de détermination (R^2) et de la statistique de Fisher, sont toujours en accord sur le choix de la loi de survie à adopter (voir figures 4-32 et 4-33). Ceci tient à la spécification de la statistique de Fisher qui dépend, entre autres, du nombre de variables des modèles et du nombre d'observation qui restent identiques pour chaque loi ajustée sur taux de survie transversaux (28 taux de survie estimés et 3 paramètres pour chaque loi). Néanmoins, même dans ce cas, la statistique de Fisher reste plus attractive en raison de ses capacités discriminatives entre les bons et les très bons résultats. En effet, l'échelle numérique de la statistique de Fisher est plus vaste que celle du coefficient de détermination. Il faut parfois descendre jusqu'à 10^{-4} près pour comparer la qualité de deux ajustement à l'aide du coefficient de détermination alors que cette comparaison est souvent plus nette avec la statistique de Fisher (voir figures 4-32 et 4-33).

Chapitre 4 Lois de survie du parc automobile

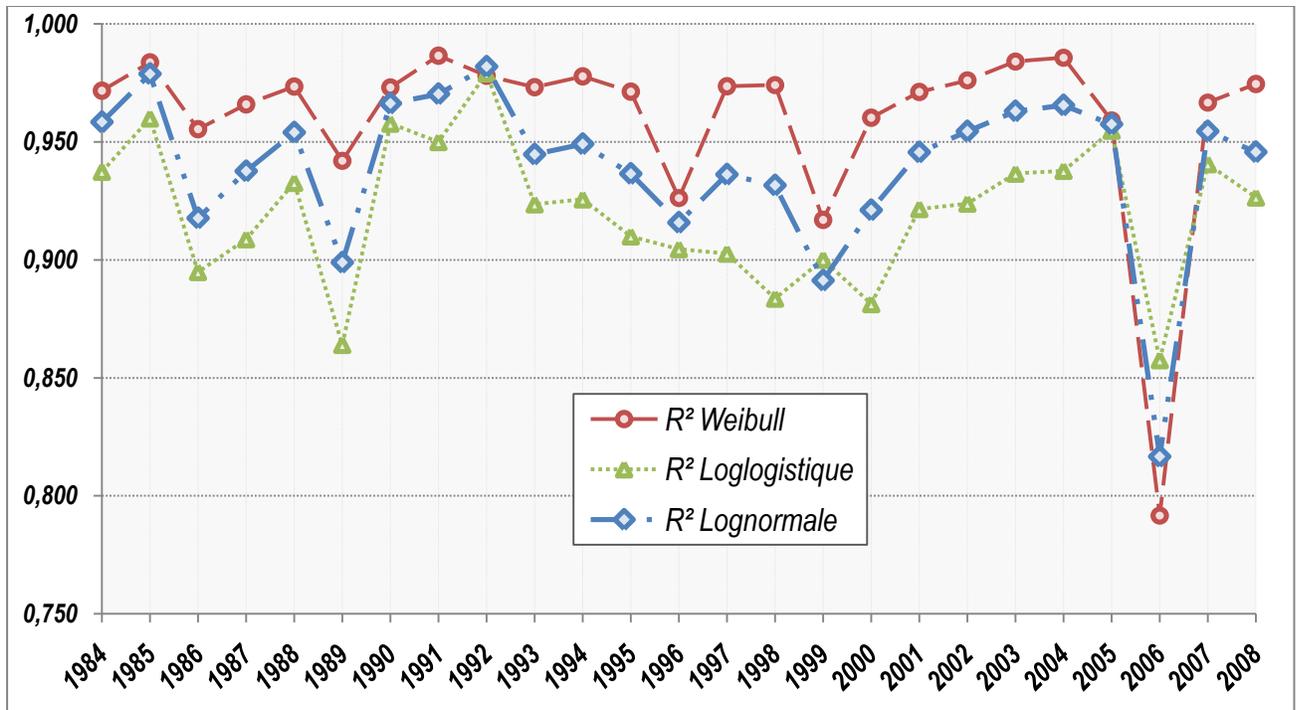


Figure 4- 32 Coefficients de détermination pour les taux de survie transversaux ajustés par les trois modèles paramétriques

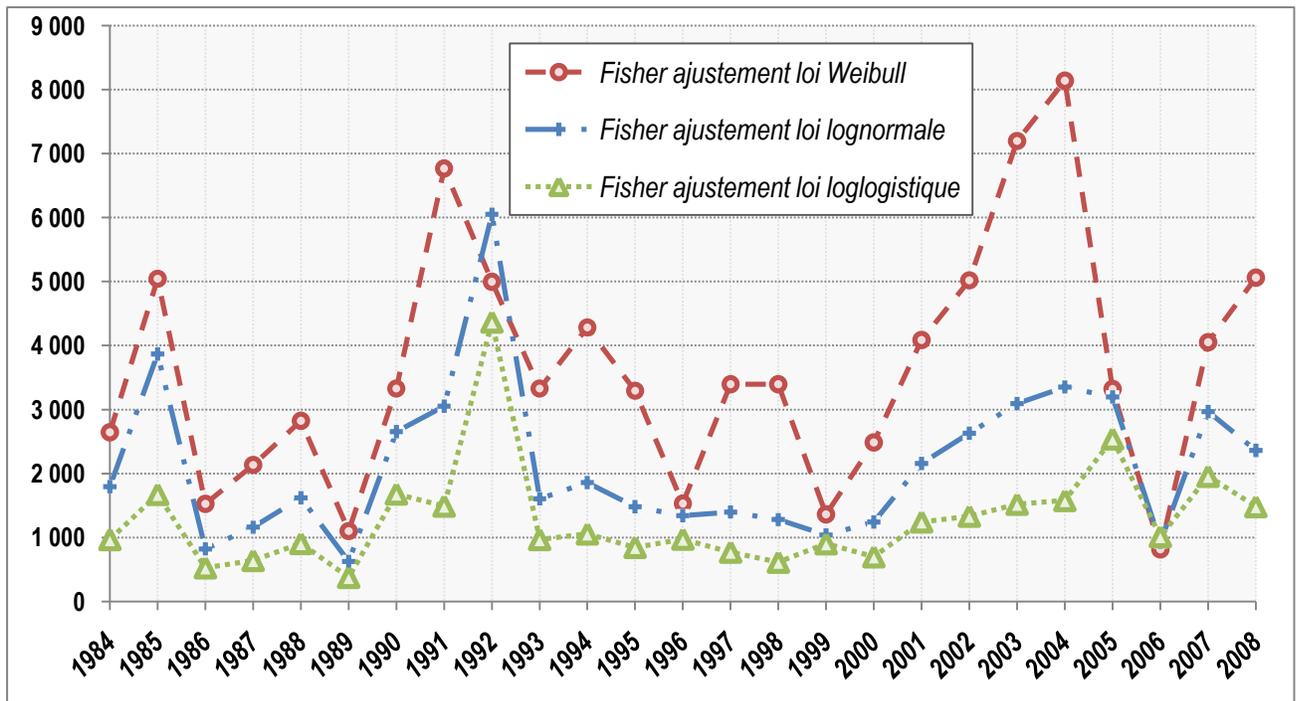


Figure 4- 33 Statistiques de Fisher pour les taux de survie transversaux ajustés par les trois modèles paramétriques

4 Durée de vie des VP par type de motorisation : Essence versus Diesel

Les travaux de [Gallez \(1994a\)](#) puis de [Gallez et Couturier \(2000\)](#) isolent les caractéristiques de motorisation comme un déterminant pouvant affecter la durée de vie des véhicules particuliers.

L'objectif de cette section est de vérifier s'il existe une différence de durée de vie notable par type de motorisation. Dans ce cas, la population de véhicules ayant la durée de vie la plus élevée pourrait avoir la plus forte contribution au vieillissement du parc automobile. S'il est vérifié que la durée de vie des véhicules à moteur diesel est plus importante que celle des véhicules à moteur essence, la diésélisation croissante du parc automobile aidant, il serait alors fort probable de voir la durée de vie du parc automobile continuer à augmenter dans les années à venir.

4.1. Taux de survie par type de motorisation (Diesel/Essence)

Nous construisons des taux de survie transversaux par type de motorisation suivant la méthode présentée précédemment, nous suivons ensuite l'évolution temporelle de ces taux par type de motorisation. Pour finir, nous comparons les durées de vie des deux types de motorisations.

4.1.1. Comparaison de taux de survie transversaux par type de motorisation

Pour comparer la durée de vie par catégorie de motorisation, des taux de survie transversaux sont calculés pour chaque année entre 2000 et 2008. La proportion de véhicules diesels décroît très vite avec l'année du panel qui est mise à contribution, c'est pourquoi nous ne remontons pas avant 2000. [Gallez et Couturier \(2000\)](#) avaient montré, pour les véhicules construits entre 1980 et 1992, que les taux de survie des véhicules diesels sont légèrement supérieurs à ceux des véhicules à essence après 5 ans. Nos résultats, pour les années 2000 et 2008 montrent que cet écart s'est creusé, en effet, les taux de survie transversaux des véhicules diesel sont supérieurs à ceux des véhicules essence après l'âge de 8 ans (voir figure 4-34) en 2001 et 2002. Avant 8 ans, l'écart semble plutôt favorable aux voitures à moteur essence. Dès 2006, les taux de survie des véhicules diesels surclassent progressivement ceux des véhicules essence. Les taux de survie des véhicules essence sont ainsi complètement dépassés par ceux des véhicules diesels en 2007 (voir figure 4-35).

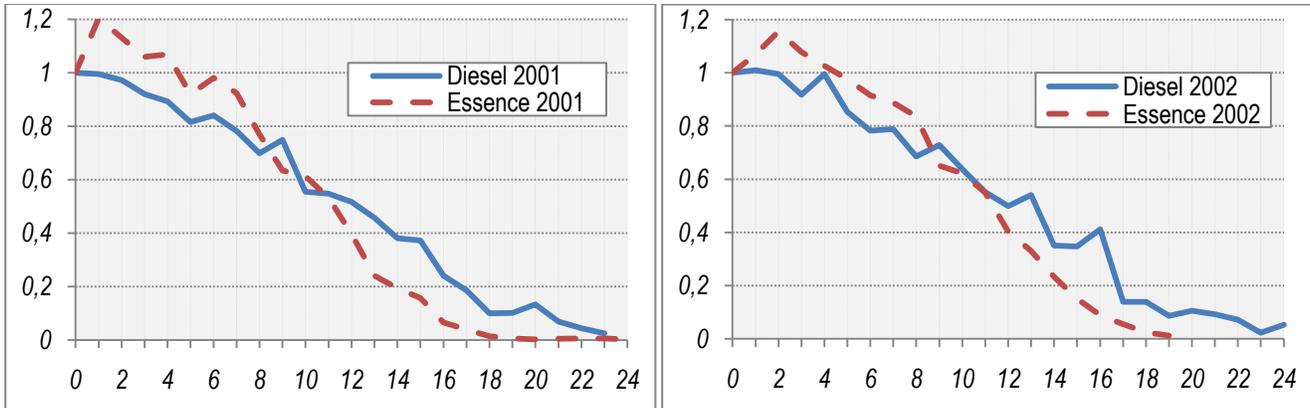


Figure 4- 34 Taux de survie transversaux des véhicules Essence et Diesels pour les années 2001 et 2002

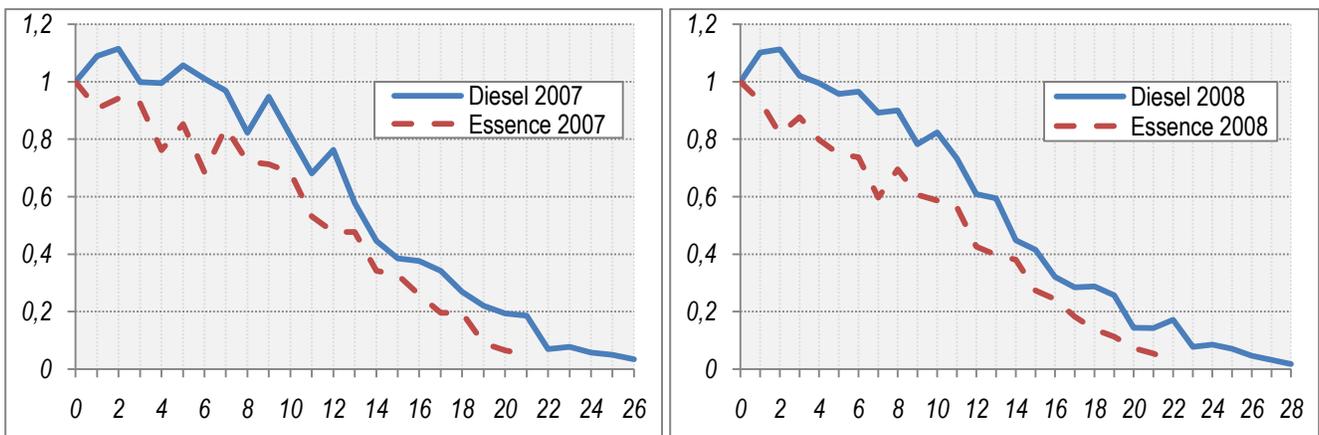


Figure 4- 35 Taux de survie transversaux des véhicules Essence et Diesels pour les années 2007 et 2008

En moyenne entre 2000 et 2008 les taux de survie transversaux des véhicules diesels sont supérieurs à ceux des véhicules essence. Cette observation tend à confirmer la supériorité en termes de longévité kilométrique des véhicules diesels. D'autre part l'écart entre les taux de survie des véhicules à moteurs diesels et essence tend à croître avec l'âge des véhicules (voir figure 4-36). Cet écart, peu élevé avant l'âge de 8 ans atteint son apogée entre l'âge de 12 à 20 ans (voir figure 4-36).

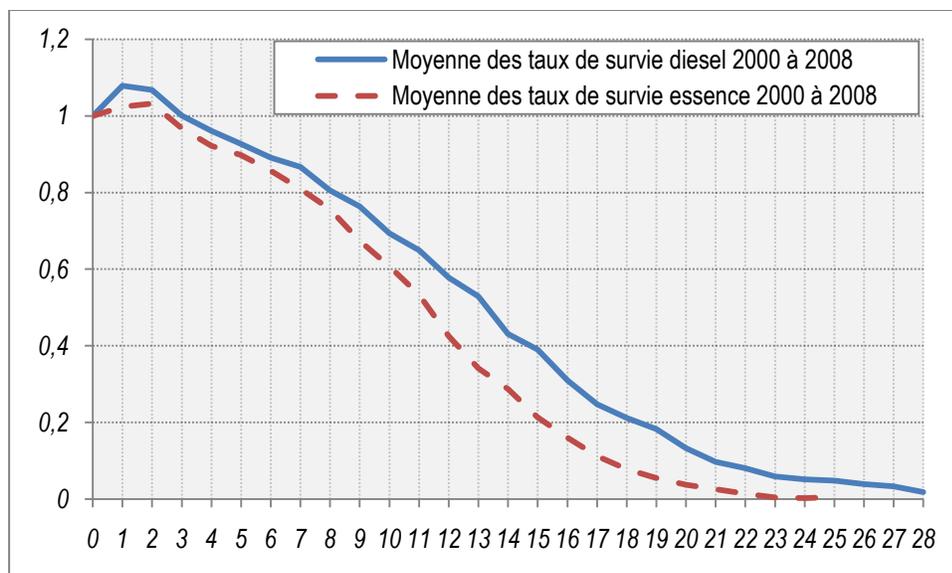


Figure 4- 36 Moyenne des taux de survie transversaux des véhicules Essence et Diesels pour les années 2000 à 2008

4.1.2. Evolution temporelle des taux de survie transversaux pour chaque type de motorisation

L'évolution de la durée de vie par type d'énergie (essence et diesel) sur la période 2000 à 2008 a été évaluée plus précisément, en comparant les paramètres estimés par ajustement de lois de Weibull sur trois courbes de survie transversales. Ces ajustements sont menés sur des taux de survie moyens par âge sur 3 sous-périodes d'une durée de trois années : 2000 à 2002, 2003 à 2005 puis 2006 à 2008.

La figure 4-37 nous permet de visualiser l'évolution temporelle de chaque groupe de génération. Nous constatons un allongement progressif des durées de vie des générations les plus anciennes de véhicules à motorisation essence après 8 ans. Avant 8 ans la durée de vie semble baisser (voir figure 4-37).

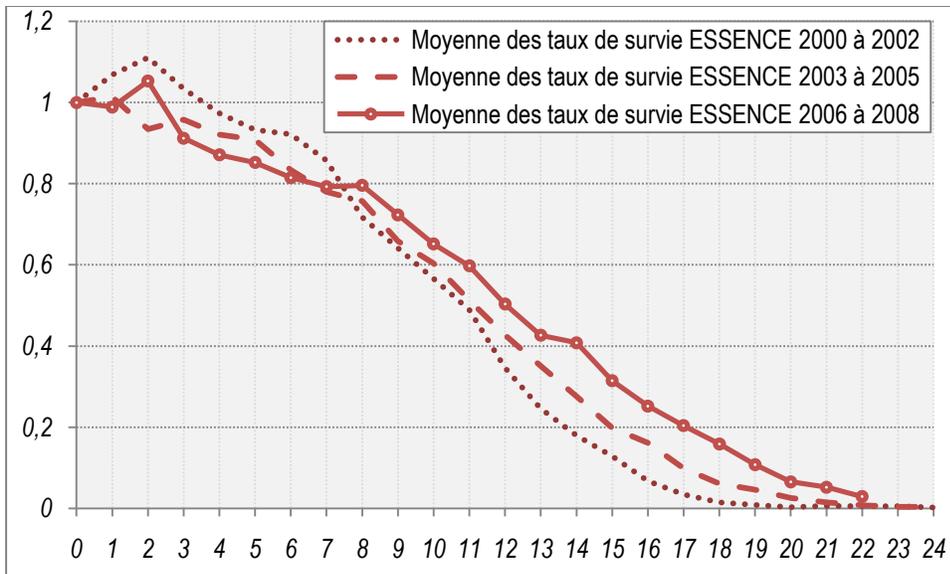


Figure 4- 37 Taux de survie transversaux moyens des véhicules Essence par périodes de 3 années entre 2000 et 2008

La figure 4-38 montre un allongement de la durée de vie des véhicules à moteur diesel. Contrairement à celui des véhicules à moteur essence, cet allongement concerne l'ensemble du cycle de vie des véhicules à moteur diesel puisque la figure 4-39 met en évidence un étirement vers « la droite » des courbes de survie avec le temps.

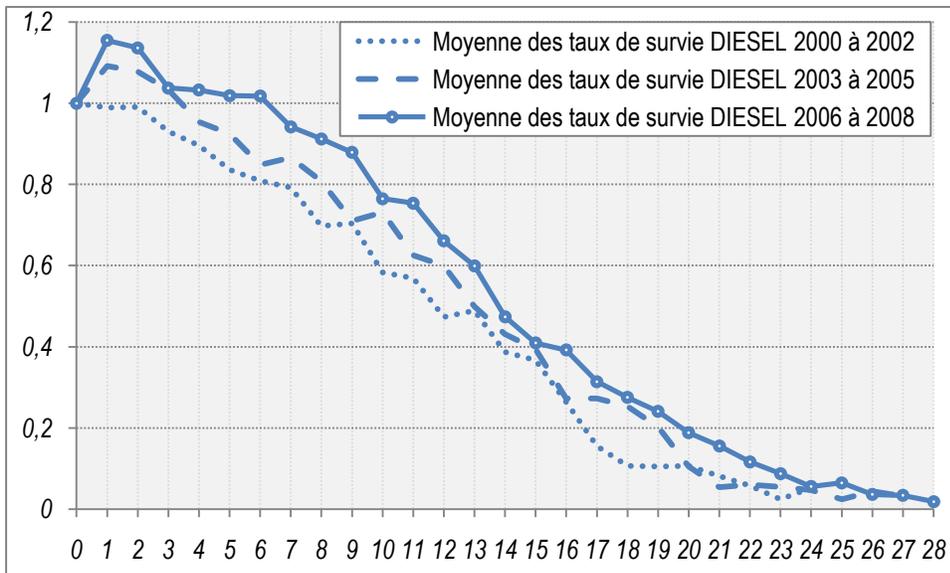


Figure 4- 38 Taux de survie transversaux moyens des véhicules Diesel par périodes de 3 années entre 2000 et 2008

4.2. Loi de survie par type de motorisation (Diesel/Essence)

Il est admis d'après les caractéristiques intrinsèques et conventionnelles testées par les constructeurs que, toutes choses égales par ailleurs (c'est-à-dire principalement à technologie

constructeur, cylindrée et niveau de gamme identiques), les véhicules diesel sont plus robustes. Cette robustesse se traduit par une longévité (espérance de vie kilométrique) supérieure à celle de leurs homologues à moteur essence. Afin de vérifier la différence de longévité, nous effectuons des ajustements sur des taux de survie transversaux par type d'énergie. Pour ce faire, nous utilisons la loi de Weibull qui caractérise le mieux la durée de vie des véhicules particuliers.

4.2.1. Evolution par type de motorisation

Le tableau 4-6 synthétise les résultats obtenus par l'ajustement d'une loi de Weibull sur des taux de survie transversaux moyens calculés sur la période large 2000 à 2008. Les résultats montrent que ce sont les véhicules diesel qui ont la durée de vie médiane la plus importante estimée à 13,1 ans (beta= 15,19 ans) contre une durée de vie médiane des véhicules à motorisation essence estimée à 11,1 ans (beta= 12,78 ans) pour la période 2000 à 2008.

| Loi Weibull | Observations | Alpha (α) | Beta (β) | Intervalle de confiance de Alpha (α) à 95% | Intervalle de confiance de Beta (β) à 95% | R ² | Fisher |
|-------------|--------------|--------------------|------------------|---|---|----------------|--------|
| Essence | 25 | 2,6346 | 12,7830 | [2,5278 ; 2,7415] | [12,6408 ; 12,9253] | 0,998 | 18044 |
| Diesel | 28 | 2,4782 | 15,1886 | [2,3338 ; 2,6227] | [14,9329 ; 15,4443] | 0,997 | 8444 |

Tableau 4- 6 Paramètres d'ajustement d'une loi de Weibull à des taux de survie transversaux moyens (pris entre 2000 et 2008) par type de motorisation.

Ces résultats montrent que les véhicules à moteur diesel possèdent un temps de « demi-vie » supérieur de 2 années à celui des véhicules essence. D'autre part la figure 4-39 nous permet de montrer que la courbe de survie des véhicules essence est surclassée par celle des véhicules diesels durant la période 2000 à 2008. La longévité kilométrique accrue des véhicules diesel est la principale explication d'une durée de vie plus importante. D'autre part, sachant que seulement 5 à 16% du parc automobile était composé de véhicules diesels entre 1985 et 1990, il y a de fortes présomptions à ce que les primes aux remplacements, mises en place entre 1994 à 1996, aient eu un impact plus important sur le déclassement des véhicules à moteur essence que sur celui des véhicules à moteur diesel moins nombreux et surtout plus jeunes à ce moment-là.

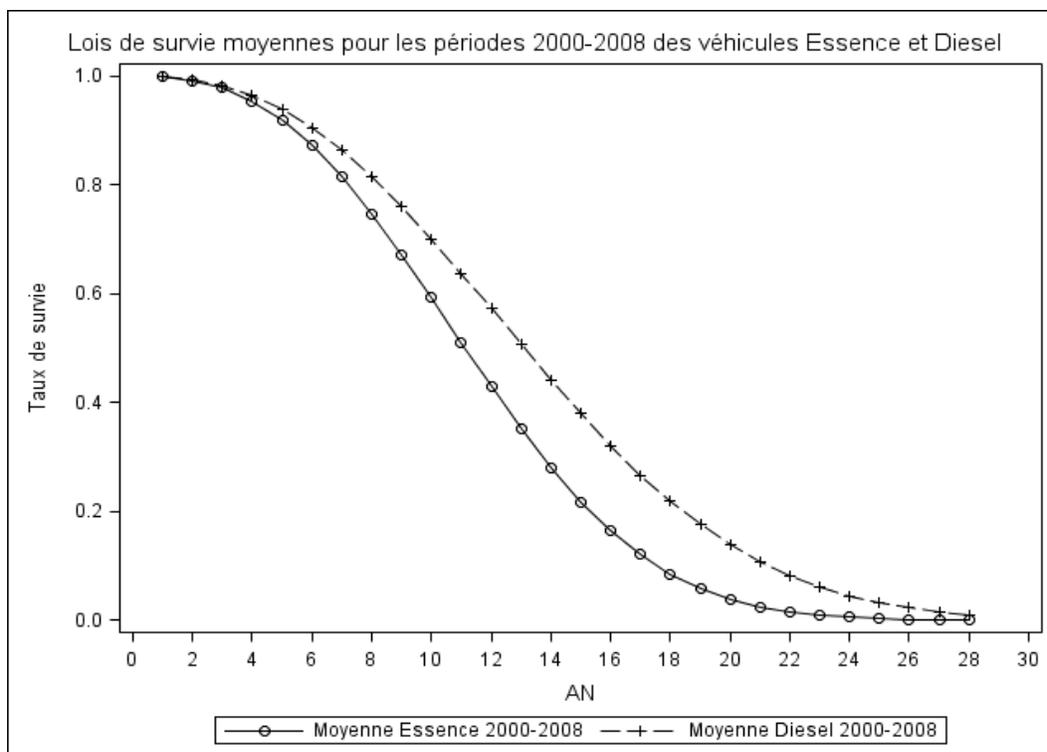


Figure 4- 39 Loi de Weibull ajustée sur des taux de survie transversaux moyens pour les années 2000 à 2008 par type d'énergies (diesel et essence)

Pour mieux comprendre le sens de l'évolution de la durée de vie par catégorie de motorisations nous décidons d'ajuster une loi de Weibull sur des taux de survie moyens donnés par groupes de 3 années entre 2000 à 2008 (2000-2002 ; 2003-2005 ; 2006-2008) et par type d'énergie (diesel/essence). Les ajustements montrent une croissance du paramètre beta pour chaque type de motorisation. D'autre part, l'évolution du paramètre alpha est différente pour chaque type de motorisation. Alors que ce paramètre croît pour les véhicules à moteur diesel, en passant de 2,1 (2000-2002) à 2,9 (2006-2008), il décroît pour les véhicules à moteur essence en passant de 3,3 à 2,3 sur les mêmes périodes. Ces observations laissent transparaître une hausse de l'asymétrie de la durée de vie entre jeunes et vieilles générations de véhicules à moteur diesel ainsi qu'une forte baisse de cette asymétrie pour la catégorie essence (voir tableau 4-7 et figure 4-40).

Chapitre 4 Lois de survie du parc automobile

| Type de Motorisation | Taux moyens par groupes d'années : | Nb. Obs | Alpha(α) | Beta(β) | Intervalle de confiance de Alpha(α) à 95% | Intervalle de confiance de Beta(β) à 95% | R ² | Fisher |
|----------------------|------------------------------------|---------|-------------------|-----------------|--|--|----------------|--------|
| Essence | Moyenne 2000 à 2002 | 24 | 3,2680 | 11,8454 | [2,9355 ; 3,6006] | [11,5722 ; 12,1187] | 0,9754 | 3821 |
| | Moyenne 2003 à 2005 | 24 | 2,5974 | 12,6303 | [2,4553 ; 2,7395] | [12,4383 ; 12,8222] | 0,9909 | 9542 |
| | Moyenne 2006 à 2008 | 22 | 2,3314 | 13,9859 | [2,0999 ; 2,5629] | [13,5764 ; 14,3954] | 0,9710 | 2912 |
| Diesel | Moyenne 2000 à 2002 | 24 | 2,1244 | 13,8103 | [1,9294 ; 2,3194] | [13,4007 ; 14,2200] | 0,9696 | 2934 |
| | Moyenne 2003 à 2005 | 27 | 2,4663 | 15,0832 | [2,2408 ; 2,6917] | [14,6844 ; 15,4820] | 0,9642 | 3464 |
| | Moyenne 2006 à 2008 | 28 | 2,8945 | 16,4445 | [2,5383 ; 3,2607] | [15,9203 ; 16,9687] | 0,9305 | 2259 |

Tableau 4- 7 Paramètres d'ajustement d'une loi de Weibull à des taux de survie transversaux moyens pour 3 groupes trisannuels: 2000 à 2002 ; 2003 à 2005 puis 2006 à 2008 par type de motorisation.

La croissance conjointe des paramètres alpha et beta pour la population de véhicules diesel laisse présager une accentuation du vieillissement du parc automobile pour les années à venir, la proportion de véhicules diesel ne cessant de croître au sein du parc. Rappelons que la proportion de véhicules diesel composant le parc atteint les 54% en 2008 (58% en 2010).

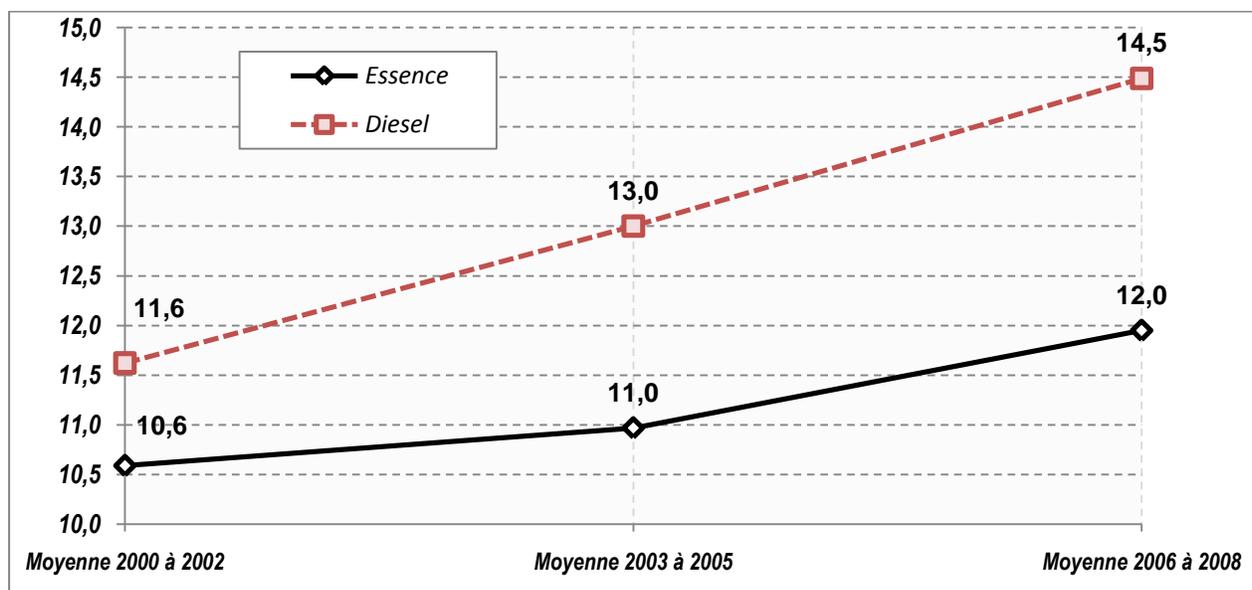


Figure 4- 40 Evolution de la durée de vie médiane par catégories de motorisation estimée sur des moyennes de taux de survie transversaux par catégories d'années. Source « Parc Auto »

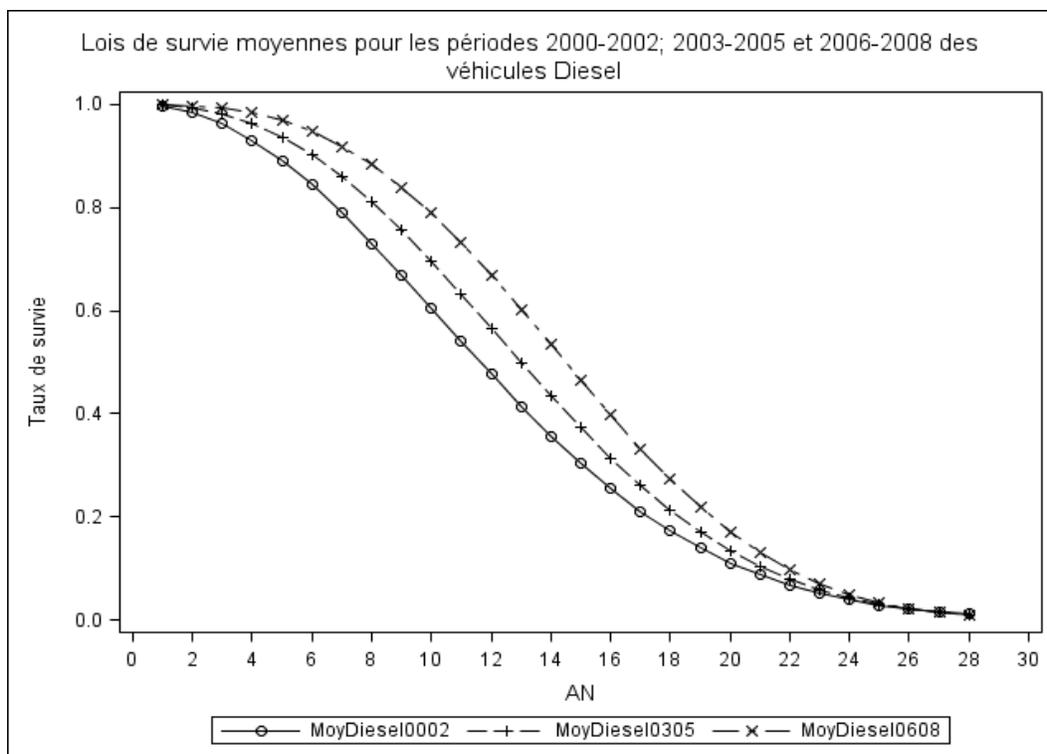


Figure 4- 41 Evolution temporelle de lois de survie pour les véhicules diesel

Sur la figure 4-41, nous pouvons visualiser l'accentuation progressive du renflement de la courbe de survie des véhicules à moteur diesel mesurable par la hausse du paramètre alpha. Sur la même figure, nous visualisons d'autre part un accroissement de l'étirement du tracé de ces dernières mesurable à travers la hausse du paramètre beta.

La figure 4-42 nous permet, quant à elle, de visualiser la baisse temporelle du paramètre alpha pour les véhicules essence reflétant la baisse de l'asymétrie de la courbe de survie. De même que pour les véhicules à moteur diesel, on observe une hausse du paramètre beta qui explique l'étirement des lois de survie des véhicules à moteur essence.

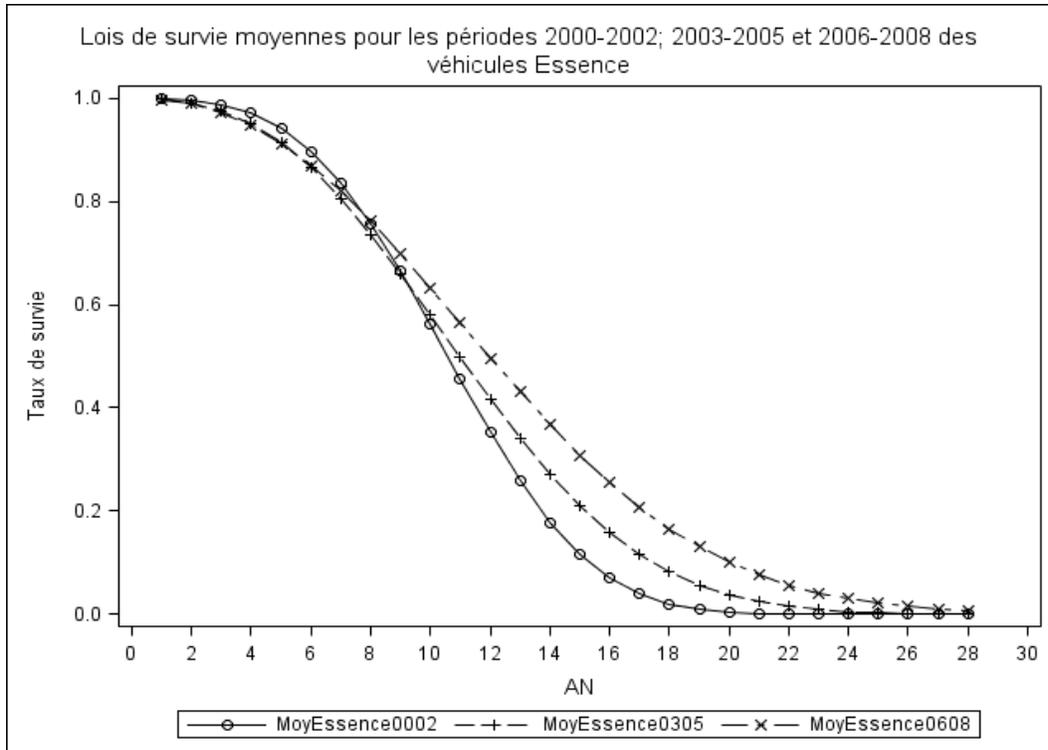


Figure 4- 42 Evolution temporelle de lois de survie pour les véhicules essence

4.2.2. Comparaisons Essence/ Diesel

L'enjeu de la distinction entre les lois de survie des véhicules à moteur essence et diesel se situe dans l'étude de l'effet sur le vieillissement du parc automobile de l'évolution de la durée de vie des véhicules particuliers distinguée par type d'énergie. En tenant compte du processus de désélisation du parc automobile en flux et en stock, il est possible d'envisager un possible rattrapage voire même un dépassement de l'âge moyen des véhicules essence par celui des véhicules diesel si le différentiel de durée de vie à l'avantage des véhicules diesels ne cesse de croître au sein du parc, et si le flux des nouvelles immatriculations de véhicules à moteur diesel diminue ou se stabilise.

Les figures 4-43 à 4-45 représentent les graphiques des ajustements de Weibull fournis par période (2000 à 2002, 2003 à 2005 et 2006 à 2008). Ils sont comparés pour chaque période par type de motorisation. Ces figures nous permettent d'observer le détachement progressif entre la durée de vie des deux types de motorisation. Ce détachement prend la forme d'un accroissement de l'écart entre les lois de survie des deux motorisations qui se creuse en faveur des véhicules diesel. On explique ce phénomène par la plus grande longévité des véhicules à moteur diesel.

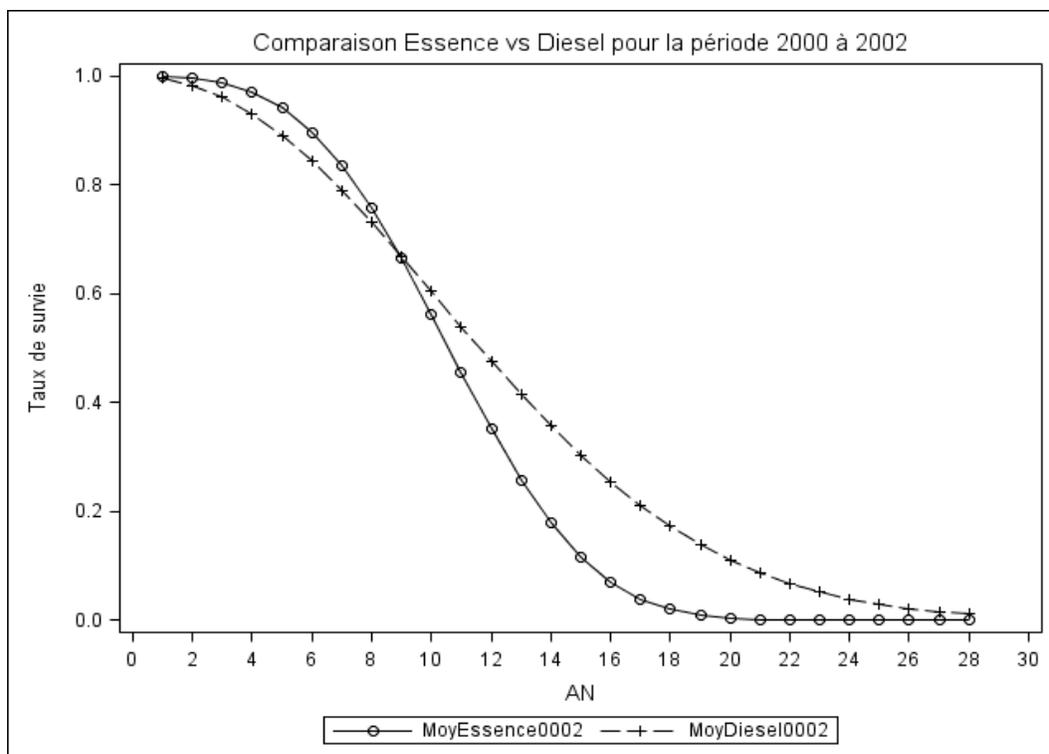


Figure 4- 43 Comparaison de la durée de vie des véhicules par type de motorisation sur la période 2000 à 2002

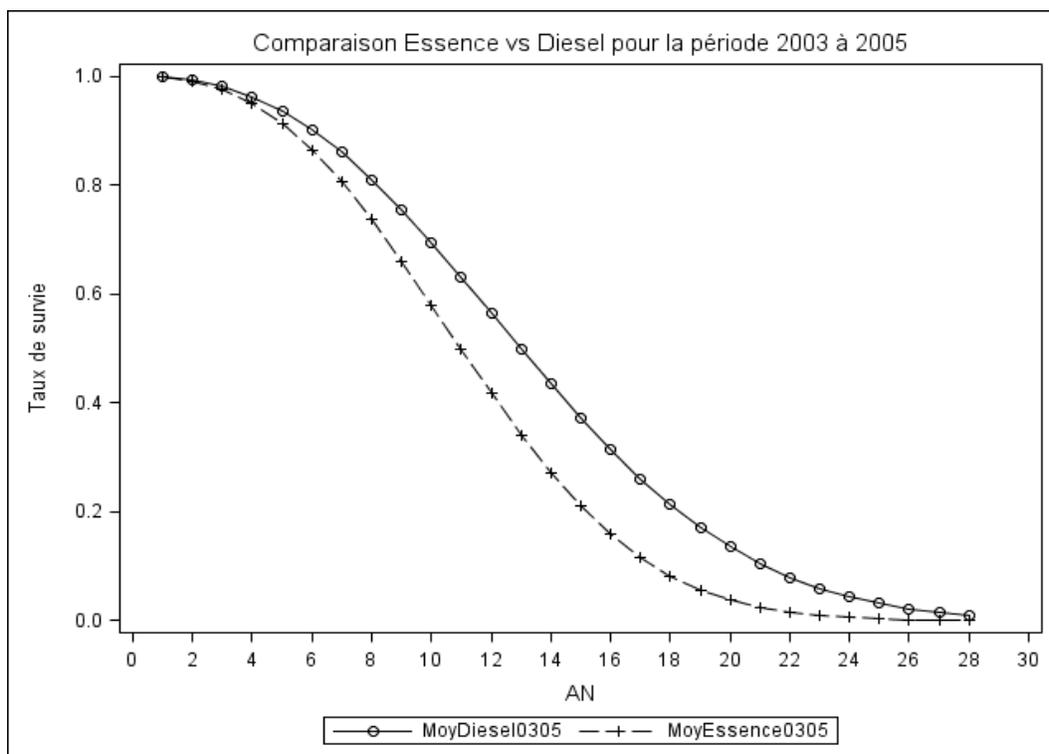


Figure 4- 44 Comparaison de la durée de vie des véhicules par type de motorisation sur la période 2003 à 2005

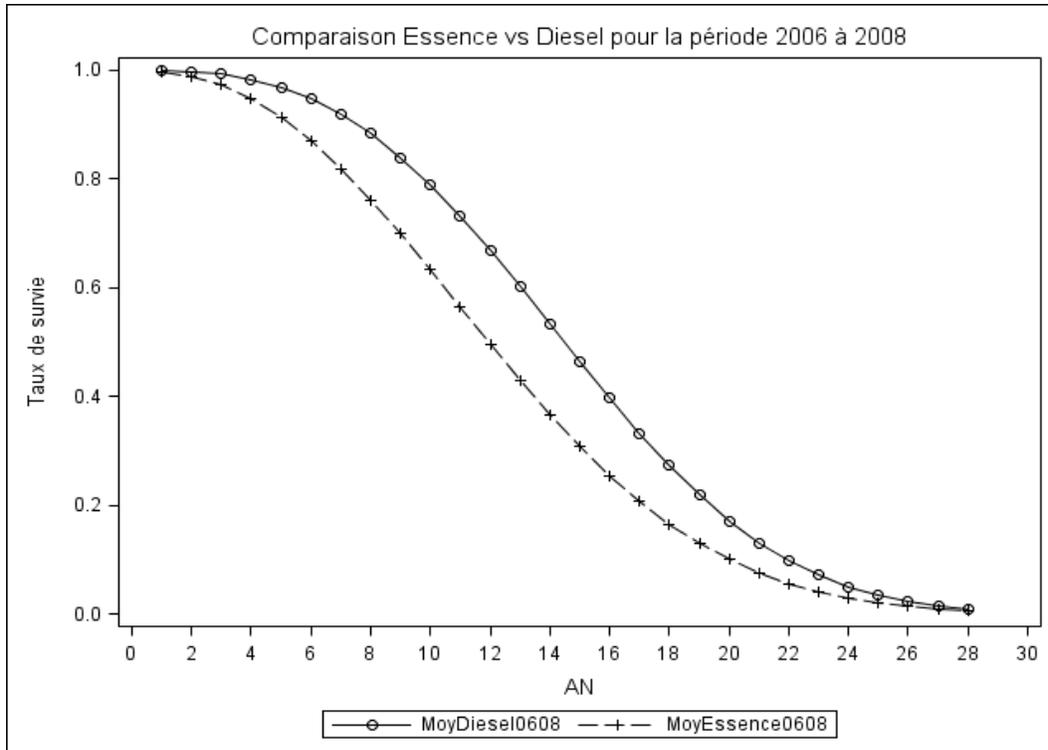


Figure 4- 45 Comparaison de la durée de vie des véhicules par type de motorisation sur la période 2006 à 2008

Plusieurs résultats ressortent de cette analyse, d'une part, compte tenu des paramètres associés à chaque type de motorisation, les paramètres alpha et beta sont pour chacune des 3 périodes d'étude significativement différents. Les comparaisons sur la base des graphiques et des paramètres estimés tendent à prouver que la diésélisation du parc automobile depuis le milieu des années 90 a eu un effet positif décisif sur l'évolution croissante de la durée de vie des véhicules (voir tableau 4-7). D'autre part, la comparaison des durées de vie opérées sur chacune des 3 sous-périodes de 3 années entre 2000 à 2008 et par type d'énergie laisse transparaître des différences importantes et croissantes à l'avantage des véhicules à motorisation diesel. Concernant le paramètre alpha, nous avons montré qu'il augmentait pour les véhicules diesel, en passant de 2,1 (2000-2002) à 2,9 (2006-2008) et qu'il diminuait pour les véhicules essence en passant de 3,3 à 2,3 sur les mêmes périodes. Ces tendances sont symptomatiques d'une hausse de l'asymétrie entre la durée de vie des jeunes et des vieilles générations de véhicules diesels et d'une baisse conséquente de l'asymétrie pour la catégorie de véhicules à moteur essence (voir tableau 4-7).

D'autre part, les résultats montrent une croissance du paramètre beta pour chaque type de motorisation, on note cependant que cette croissance s'opère plus rapidement pour la motorisation diesel. La durée de vie médiane estimée par période se creuse entre les deux

motorisations. Elle est estimée à 10,59 ans pour la période 2000 à 2002 et à 11,62 ans pour les véhicules diesels dans la même période. Ces résultats représentent une différence nette de 1,03 an sur la période. Cette différence passe à 2,03 ans sur la période 2003 à 2005 (les durées de vie médianes respectives pour les véhicules à essence et les véhicules à diesel étant estimées à 10,97 et 13,00 ans) puis à 2,54 ans sur la période 2006 à 2008 (les durées de vie médianes respectives pour les véhicules à essence et les véhicules à diesel étant estimées à 11,95 et 14,49 ans).

Ces résultats nous permettent de mieux appréhender les effets à moyen terme de la diésélisation du parc automobile. Cette dernière peut constituer un accroissement de l'âge moyen du parc ainsi qu'un frein au déploiement de nouvelles technologies si la longévité ou les taux de rétention des véhicules à moteur essence et diesel par les ménages restent sur un sentier de croissance constant. Cet effet peut s'accroître si les ménages orientent leurs choix de véhicules secondaires vers des véhicules à moteur diesel, sachant que les véhicules secondaires sont utilisés moins intensivement que les véhicules uniques ou principaux.

5 Lois de survies confortant les statistiques de volume de parc automobile

Les lois de survie obtenues par ajustement sur taux de survie longitudinaux et transversaux ne nous permettent pas de relier les séries statistiques d'immatriculations de véhicules neufs avec celles du parc automobile. L'objectif de cette partie est d'apporter des outils permettant de construire des lois de survie issues du calage des statistiques du parc automobile et des immatriculations de véhicules neufs.

5.1. Méthodologie

Cette approche consiste à simuler le parc annuel statique français (source CCFA) en recourant à l'utilisation de lois de survie paramétriques de type Weibull sur les statistiques d'immatriculations annuelles françaises (source CCFA). Cette approche est utilisée pour la première fois par Jeger (2001). Il s'agissait alors de simuler la constitution du parc français en appliquant une loi de survie de famille log-normale sur les volumes annuels de véhicules immatriculés puis de confronter, sur le passé, ces simulations au parc mesuré à l'aide des ventes de vignettes.

Cette approche est très pratique lorsqu'il s'agit de connaître les durées de vie médiane et moyenne du parc automobile en fonction d'hypothèses sur le choix de la loi de survie et sur certains de ses paramètres. Elle permet en outre de comprendre le processus de

renouvellement de générations de véhicules au sein du parc automobile malgré les limites que lui imposent les hypothèses fortes de non-prise en compte du mouvement migratoire (importations et exportations) des véhicules hors (ou à l'intérieur) des frontières nationales.

5.2. Ajustements et résultats sur le parc national

L'ajustement au parc consiste à caler les statistiques d'immatriculations annuelles sur le volume du parc à l'aide de lois de survie. Cette méthode repose sur l'application de coefficients de survie sur les volumes d'immatriculations annuels respectifs afin de d'obtenir son volume estimé. Les coefficients de survie annuels appliqués sont obtenus par calage d'une loi de Weibull sur une période de 30 ans, au-delà de cet âge les taux de survie estimés étant très faibles et donc négligeables.

Cependant, il existe une infinité de couples de paramètres alpha (α) et beta (β) qui permettent un ajustement correct, la variation de l'un des paramètres pouvant compenser celle de l'autre. Pour corriger ce problème, nous utilisons les paramètres de forme (α) obtenus par les ajustements effectués sur les taux de survie transversaux estimés à partir du panel Parc Auto. Ce choix est justifié par l'hypothèse de stabilité des formes des lois de survie transversales pour une année fixée.

Le paramètre de forme alpha (α) étant fixé, le calage de la loi de survie dépend, dès lors, entièrement de l'estimation du paramètre beta (β) qui devient unique. Rappelons que ce problème se pose quelle que soit la loi de survie qui est retenue pour effectuer le calage. Par souci de précision les valeurs du paramètre beta (β) sont estimées à 10^{-2} mois près.

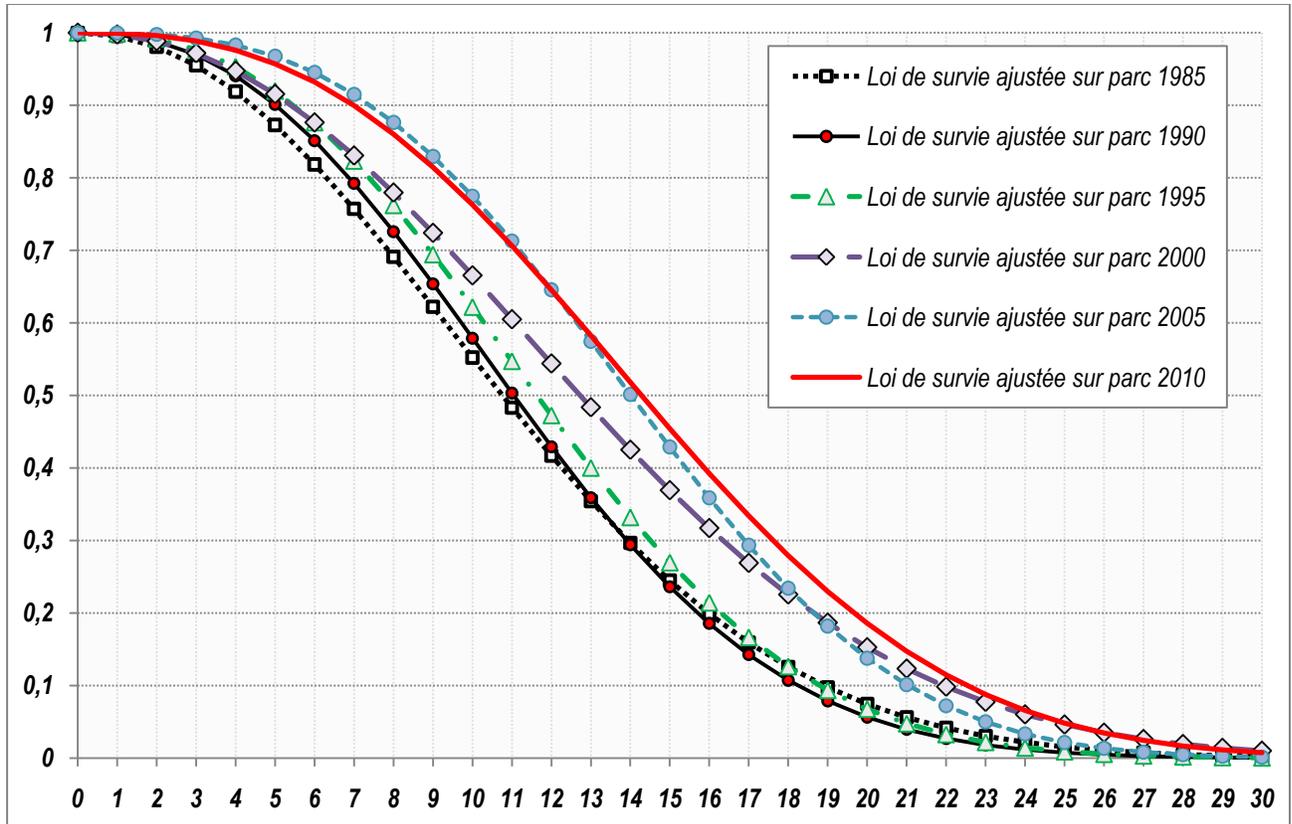


Figure 4- 46 Lois de survies calées sur le parc national par périodes de 5 années depuis 1985.

Nos résultats révèlent une durée de vie médiane quasi stable entre 1984 et 1989 fluctuant pour cette période dans un intervalle compris entre 10,71 (1984) et 10,83 ans (1987). La hausse de la durée de vie des véhicules particuliers est amorcée dès 1993 (voir figure 4-47), elle ralentit ensuite entre 1995 et 1996 sous l'action des programmes de « primes à la casse ». L'âge médian des véhicules particuliers gagne ensuite près de 2,5 ans, en passant de 11,71 ans à 14,23 ans entre 1997 et 2007.

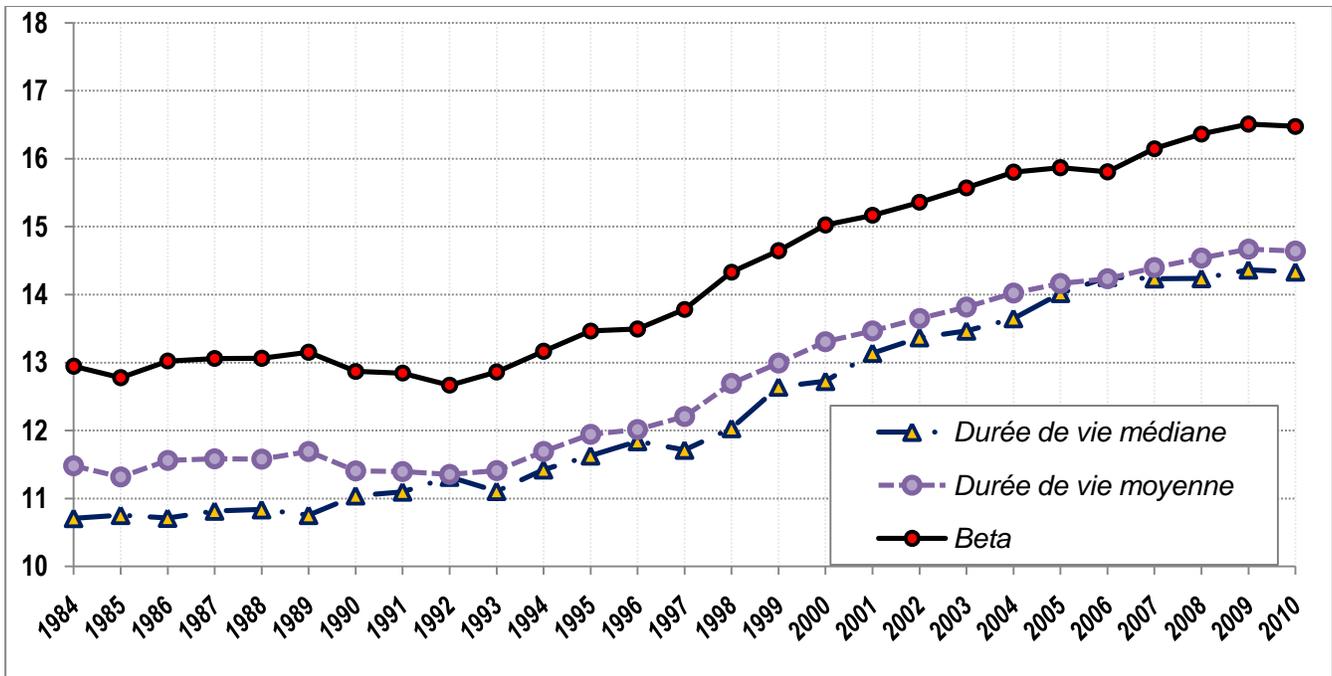


Figure 4- 47 Evolution temporelle du paramètre beta, de la durée de vie moyenne et médiane de 1984 à 2008 par calage des immatriculations et du volume du parc par une loi de survie Weibull

Nos résultats montrent que la durée de vie médiane des véhicules français augmente en moyenne de 2,2 mois tous les ans depuis 1993. En 2010 la durée de vie médiane confortant la taille du parc, estimé par le CCFA à 31 050 000 véhicules (au 1^{er} janvier 2010), atteint 14,34 ans pour une durée de vie moyenne de 14,64 ans (voir tableau 4-6). Ces résultats restent globalement comparables à ceux obtenus par ajustement d'une loi de Weibull sur des taux de survie transversaux même si la hausse de durée de vie des véhicules particuliers est moins prononcée par calage puisqu'elle est estimée à 3,5 ans entre 1984 et 2008 contre 4,5 ans, sur la même période, par ajustement sur taux de survie par la loi de Weibull (voir tableau 4-3).

Chapitre 4 Lois de survie du parc automobile

| Année | Paramètres | | Volumes de parcs | |
|-------|---------------------|-------------|------------------------|----------------------|
| | Alpha | Beta (mois) | Parc estimé par calage | Parc officiel (CCFA) |
| 1984 | 1,933 | 155,35 | 20 599 988 | 20 600 000 |
| 1985 | 2,128 | 153,32 | 20 799 930 | 20 800 000 |
| 1986 | 1,877 | 156,28 | 21 090 119 | 21 090 000 |
| 1987 | 1,945 | 156,73 | 21 500 070 | 21 500 000 |
| 1988 | 1,963 | 156,76 | 21 970 001 | 21 970 000 |
| 1989 | 1,820 | 157,85 | 22 520 002 | 22 520 000 |
| 1990 | 2,394 | 154,44 | 23 010 004 | 23 010 000 |
| 1991 | 2,508 | 154,15 | 23 550 003 | 23 550 000 |
| 1992 | 3,249 | 152,02 | 23 810 003 | 23 810 000 |
| 1993 | 2,498 | 154,36 | 24 020 020 | 24 020 000 |
| 1994 | 2,585 | 157,98 | 24 385 009 | 24 385 000 |
| 1995 | 2,503 | 161,57 | 24 900 009 | 24 900 000 |
| 1996 | 2,803 | 161,94 | 25 100 007 | 25 100 000 |
| 1997 | 2,255 | 165,39 | 25 499 628 | 25 499 700 |
| 1998 | 2,097 | 171,97 | 26 090 005 | 26 090 000 |
| 1999 | 2,49 | 175,77 | 26 810 020 | 26 810 000 |
| 2000 | 2,206 | 180,32 | 27 480 111 | 27 480 000 |
| 2001 | 2,555 | 182,01 | 28 060 328 | 28 060 000 |
| 2002 | 2,64 | 184,31 | 28 700 059 | 28 700 000 |
| 2003 | 2,525 | 186,85 | 29 160 012 | 29 160 000 |
| 2004 | 2,502 | 189,63 | 29 559 997 | 29 559 976 |
| 2005 | 2,959 | 190,43 | 29 899 994 | 29 899 976 |
| 2006 | 3,551 | 189,69 | 30 100 665 | 30 100 000 |
| 2007 | 2,908 | 193,76 | 30 400 125 | 30 400 000 |
| 2008 | 2,636 | 196,35 | 30 700 057 | 30 700 000 |
| 2009 | 2,636 ⁵² | 198,10 | 30 850 239 | 30 850 000 |
| 2010 | 2,636 | 197,70 | 31 051 477 | 31 050 000 |

Tableau 4- 8 Paramètres de calage du parc par une loi de Weibull

⁵² Le paramètre de forme alpha (α) n'est pas connu pour les années 2009 et 2010, les vagues annuelles du panel « Parc Auto » Kantar-Worldpanel-TNS-Sofres n'étant pas encore parues à la date de rédaction de cette thèse. Nous choisissons par conséquent de faire l'hypothèse d'une stabilité de ce paramètre en 2009 et 2010.

Le calage de lois de survie sur le volume du parc automobile peut s'avérer utile pour le modélisateur soucieux d'utiliser des lois de survies qui soient en accord à la fois avec les statistiques des parcs automobiles et des immatriculations de véhicules neufs. Lors du recours à ce type de lois de survie, le modélisateur doit rester conscient d'un certain nombre de limites qui proviennent des nombreuses hypothèses sous-jacentes à une telle approche :

- D'une part, ce calage ne prend nullement en compte le mouvement migratoire qui s'insère dans la compréhension de la démographie du véhicule. Les statistiques d'importations et d'exportations sont en effet peu (ou pas) disponibles quelle que soit la période d'étude.
- D'autre part, ces lois ne peuvent en aucun cas nous aider à comprendre les fluctuations conjoncturelles qui animent la mise au rebut ou la rétention des véhicules particuliers par les ménages. Ces dernières n'étant visibles qu'au travers l'estimation année après année puis de la comparaison des variations conjoncturelles de taux de survie estimés à partir d'une base de données ou d'un panel représentatif des véhicules utilisés par les ménages français. Dès lors, l'estimation des impacts d'une prime au renouvellement ne peut être estimée et analysée en utilisant une approche de calage sur le volume du parc automobile.
- Pour finir, les lois obtenues par calage souffrent de lacunes depuis 2001, puisque depuis cette date, les statistiques de parc automobile sont elles-mêmes estimées par le CCFA en recourant à des lois de survie. Ainsi depuis 2001, ces lois ne peuvent prétendre à servir d'outil pour comprendre la dynamique démographique qui anime le parc automobile mais uniquement à retrouver les hypothèses de survie émises par le CCFA qui impliquent une croissance du volume du parc.

5.3. Ajustements et résultats par type de motorisation

Le calage effectué par type de motorisation (essence et diesel) montre une différence de durée de vie médiane à l'avantage des véhicules diesel puisque en 2008 le paramètre beta est estimé à 15,95 ans (191,4 mois) pour les véhicules à moteur essence contre 17,28 ans (207,3 mois) pour les véhicules à moteur diesel. En ce qui concerne les durées de vie médiane on relève un écart de 1,17 an (13,88 ans contre 15,05 ans) entre la durée de vie des véhicules essence et diesel pour l'année 2008 (voir tableau 4-7 et figure 4-48).

Chapitre 4 Lois de survie du parc automobile

| Type de Motorisation | Année | Paramètres | | Volumes de parcs (en milliers de VP) | |
|----------------------|-------|------------|-------------|--------------------------------------|-----------|
| | | Alpha | Beta (mois) | Parc estimé par calage | Parc CCFA |
| Essence | 2007 | 2,0194 | 189 | 14 885 | 14 887 |
| | 2008 | 2,6305 | 191,4 | 14 171 | 14 168 |
| Diesel | 2007 | 2,9744 | 198,5 | 15 516 | 15 513 |
| | 2008 | 2,6551 | 207,3 | 16 532 | 16 532 |

Tableau 4- 9 Paramètres de calage des parcs essence et diesel par une loi de Weibull pour 2007 et 2008

Si l'on considère que le parc automobile est totalement renouvelé lorsqu'il reste moins d'un pourcent des véhicules d'une génération donnée alors en 2008 il fallait compter 28 années pour renouveler le parc essence et plus de 30 ans pour renouveler le parc diesel. Après 30 années il reste près de 0,5% du parc essence et 1,3% des véhicules diesel.

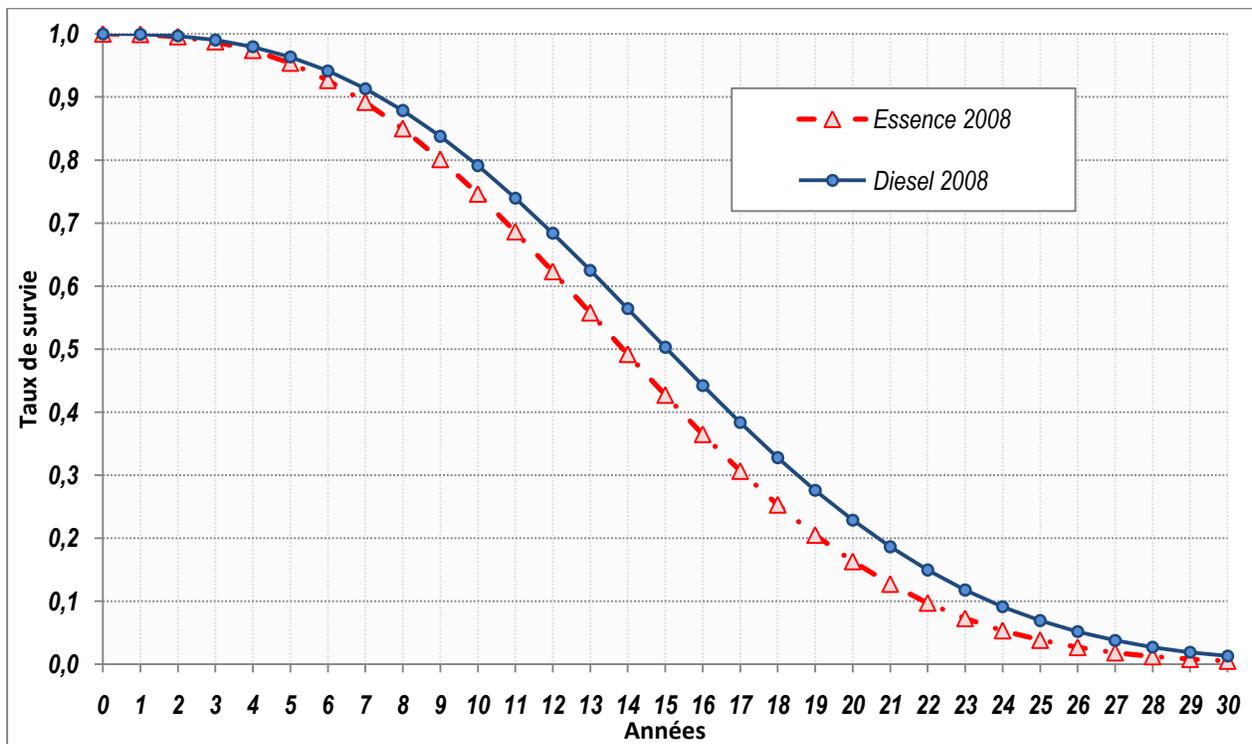


Figure 4- 48 Comparaison des lois de survie essence et diesel obtenus par calage des immatriculations sur le volume du parc automobile par une loi de Weibull pour l'année 2008

6 Durée de vie et longévité des VP

Dans cette section nous cherchons à mettre un coup de projecteur sur la relation qui lie la durée de vie, l'âge et l'usage des véhicules particuliers. La durée de vie des véhicules particuliers est influencée positivement par la longévité kilométrique et négativement par l'intensité d'usage, toutes deux respectivement mesurables à partir du kilométrage au compteur et du kilométrage annuel. Entrent aussi en compte, de manière évidente, l'état des routes et de l'infrastructure ainsi que le soin apporté au véhicule par son propriétaire (entretien régulier, souplesse dans la

conduite, etc.). Un véhicule est dit robuste lorsque sa longévité kilométrique est plus élevée que la moyenne. La robustesse d'un véhicule est une caractéristique difficilement observable puisque les véhicules les plus robustes sont souvent achetés pour cette qualité, justifiant en retour une intensité d'utilisation plus élevée que la moyenne. D'autre part, l'absence d'informations sur la date et le kilométrage au compteur des véhicules mis au rebut dans le panel parc Auto nous prive à la fois d'une analyse non-paramétrique [Kaplan et Meier, 1958] et d'une analyse semi-paramétrique de la survie [Cox, 1975] sur des populations de véhicules.

Afin de mieux comprendre et de mesurer le phénomène de déclassement (ou de sortie) des véhicules particulier nous avons fait appel à un modèle de comptage de Poisson. Une régression de Poisson nous permet de mettre en lien pour chaque génération, le volume annuel des sorties de véhicules observées avec des facteurs tels que la motorisation, l'intensité d'usage à travers le kilométrage annuel ou encore le kilométrage au compteur. L'objectif étant de quantifier l'effet de chaque facteur sur le déclassement des véhicules estimé à partir des sorties observées.

6.1. Choix du modèle : le modèle de Poisson

En matière de traitement de données de survie, la situation la plus fréquente est celle d'une variable numérique de comptage d'évènements rares. Dans notre traitement, nous sommes amenés à observer des sorties de périodicité annuelles pour une génération de véhicules fixée. Ces comptages de sorties sont par définition des nombres entiers à valeurs positives, considérés comme des évènements rares et se conformant ainsi à des réalisations d'une variable aléatoire discrète Y suivant une loi de Poisson de paramètre λ :

$$\Pr(Y = k) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!} \quad k \in \llbracket 0; n \rrbracket$$

$$E(Y) = \text{Var}(Y) = \lambda$$

En conséquence nous utiliserons des modèles de régression dérivés de Poisson qui font partie de la famille des modèles linéaires généralisés. Dans ce type de modèle, le logarithme de la variable dépendante est expliqué par une combinaison linéaire de variables explicatives :

$$\text{Log}(Y) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k$$

Ce qui peut aussi s'écrire :

$$Y = e^{\beta_0} * e^{\beta_1 x_1} + \dots + e^{\beta_k x_k}$$

Rappelons que la condition d'égalité entre la moyenne et la variance des données est un pré-requis élémentaire à l'application du modèle de Poisson. Dans certains cas, le modèle de Poisson n'est pas applicable en raison d'une variance supérieure à la valeur de la moyenne, on dit alors qu'il y a surdispersion des données. Allain et Brenac (2001) indiquent que ce problème peut être corrigé soit en modifiant le choix de la distribution (modèles quasi-poissonniens, binomial négatif ou quasi-binomial négatif) soit par une modification de la fonction de variance sans qu'il soit nécessaire dans ce cas de remplacer la distribution de Poisson [Domecq *et al.*, 2010]. C'est pourquoi, dans les modèles qui seront présentés, la loi binomiale négative⁵³ a systématiquement été testée préalablement à la loi de Poisson.

La lecture et l'interprétation des résultats sont facilitées lorsque ces derniers sont présentés sous forme de taux d'incidence relatifs (TIR). Par exemple, si l'on souhaite connaître l'impact de la diésélisation sur les sorties, le taux d'incidence relatif estime le taux de sortie des véhicules à moteur diesel comparativement à celui des véhicules à moteur essence.

Le taux d'incidence pour la $i^{\text{ème}}$ observation est, par définition, défini comme :

$$r_i = e^{\beta_0 + \beta_1 x_{1,i} + \dots + \beta_k x_{k,i}}$$

Si E_i est la variable d'exposition, le nombre de sorties du parc seront données par S_i tel que :

$$S_i = E_i e^{\beta_0 + \beta_1 x_{1,i} + \dots + \beta_k x_{k,i}} = e^{\text{Ln}(E_i) + \beta_0 + \beta_1 x_{1,i} + \dots + \beta_k x_{k,i}}$$

6.2 Modélisation des taux de sortie à kilométrage au compteur donné.

6.2.1 Les données

Les données utilisées sont issues d'un traitement effectué à partir des vagues 1990 à 2008⁵⁴ du panel Parc Auto. Des variables de kilométrage moyen au compteur et d'effectif pondéré par année d'observation ont été estimées et désagrégées par catégories de générations (pas plus de 20), de motorisations (essence /diesel) et d'usage en regroupant les véhicules selon qu'ils sont peu ou beaucoup utilisés. On estime sur la base des normes⁵⁵ d'usages issues du magazine l'Argus automobile, qu'un véhicule essence est peu (beaucoup) utilisé s'il parcourt

⁵³ Nous avons utilisé la fonction nbreg sur le logiciel Stata®

⁵⁴ Les années du panel antérieures à 1990 ne sont pas retenues en raison du manque d'homogénéité de la pondération des années 1988 et 1989. Notons par ailleurs que le panel ne dispose pas de pondération pour les années 1984 à 1987.

⁵⁵ Ces normes sont des kilométrages pivots qui sont utilisés pour l'estimation de la côte (prix) d'un véhicule sur le marché de l'occasion par l'application d'une plus-value ou d'une moins value kilométrique selon que le véhicule à roulé en-dessous ou au-dessus de ce seuil défini en fonction de la motorisation.

moins (plus) de 15 000 km par an. Ce seuil est estimé, toujours selon l'Argus, à 25 000 kilomètres pour un véhicule à moteur diesel.

A partir des effectifs représentatifs du parc nous estimons les sorties en différenciant pour chaque génération l'effectif de l'année n par celui de l'année $n-1$. Afin de lisser les imperfections dues aux fluctuations d'échantillonnages qui impliquent pour certains cas des sorties négatives, nous attribuons à ces dernières une valeur nulle.

6.2.2 Estimation et résultats

A partir des données présentées, nous estimons un modèle dont la variable dite « d'exposition » est le kilométrage moyen au compteur, ainsi tous les résultats sont présentés à kilométrage au compteur donné. Dans ce modèle, la variable endogène est, de fait, le décompte des sorties observées. Nous introduisons quelques variables explicatives comme l'usage binaire différencié par type de motorisation (dont les seuils ont été définis précédemment), le type de motorisation, l'année modèle qui nous permettra de tenir compte de l'effet génération et enfin les années afin de tenir compte de l'âge des véhicules. Afin de prendre en compte les effets spécifiques de l'usage selon la motorisation, nous introduisons les effets croisés de la motorisation et de l'usage. Les résultats sont consignés dans le tableau 4-10.

Chapitre 4 Lois de survie du parc automobile

| Variable | TIR | Ecart-type | Z | P> z | [I.C. 95%] |
|---------------------|--------|------------|--------|--------|------------------|
| <i>Diesel</i> | 0,2525 | 0,0055 | -63,4 | 0,0000 | [0,2419; 0,2635] |
| <i>Util2</i> | 0,3126 | 0,0066 | -55,44 | 0,0000 | [0,2999; 0,3257] |
| <i>DieselXUtil2</i> | 2,5270 | 0,0861 | 27,19 | 0,0000 | [2,3636; 2,7016] |
| <i>gen</i> | 1,1014 | 0,0018 | 57,88 | 0,0000 | [1,0977; 1,1050] |
| <i>Annee1991</i> | 8,7089 | 0,4209 | 44,78 | 0,0000 | [7,9210; 9,5742] |
| <i>Annee1992</i> | 4,0669 | 0,2167 | 26,33 | 0,0000 | [3,6636; 4,5147] |
| <i>Annee1993</i> | 4,1171 | 0,2110 | 27,62 | 0,0000 | [3,7236; 4,5521] |
| <i>Annee1994</i> | 3,7122 | 0,1866 | 26,09 | 0,0000 | [3,3639; 4,0967] |
| <i>Annee1995</i> | 2,2633 | 0,1239 | 14,93 | 0,0000 | [2,0331; 2,5196] |
| <i>Annee1996</i> | 3,2047 | 0,1548 | 24,11 | 0,0000 | [2,9152; 3,5230] |
| <i>Annee1997</i> | 2,2701 | 0,1151 | 16,17 | 0,0000 | [2,0554; 2,5073] |
| <i>Annee1998</i> | 2,7575 | 0,1292 | 21,66 | 0,0000 | [2,5156; 3,0227] |
| <i>Annee1999</i> | 2,7991 | 0,1262 | 22,83 | 0,0000 | [2,5623; 3,0577] |
| <i>Annee2000</i> | 1,8954 | 0,0901 | 13,45 | 0,0000 | [1,7267; 2,0806] |
| <i>Annee2001</i> | 1,5654 | 0,0752 | 9,33 | 0,0000 | [1,4247; 1,7200] |
| <i>Annee2002</i> | 1,3944 | 0,0670 | 6,92 | 0,0000 | [1,2690; 1,5321] |
| <i>Annee2003</i> | 2,4080 | 0,0993 | 21,31 | 0,0000 | [2,2210; 2,6109] |
| <i>Annee2004</i> | 0,7299 | 0,0395 | -5,81 | 0,0000 | [0,6563; 0,8117] |
| <i>Annee2005</i> | 0,8083 | 0,0412 | -4,18 | 0,0000 | [0,7314; 0,8932] |
| <i>Annee2006</i> | 0,9284 | 0,0444 | -1,55 | 0,1200 | [0,8453; 1,0197] |
| <i>Annee2007</i> | 0,5210 | 0,0289 | -11,77 | 0,0000 | [0,4673; 0,5808] |

Tableau 4- 10 Paramètres du modèle de Poisson intégrant le kilométrage au compteur comme variable d'exposition

Toutes les variables sont significatives (p -values $P > |z|$ égales à 0) à l'exception de l'année 2006. Le modèle est globalement bon (pseudo- $R^2=0,3424$ et log-vraisemblance = - 11 052). Les résultats présentés dans le tableau 4-10 indiquent que les véhicules à moteur diesel ont un taux de sortie beaucoup moins élevé que les véhicules à moteur essence. La différence entre les deux motorisations est assez marquée (TIR=0,25) ce qui permet d'exhiber une plus grande durée de vie à kilométrage au compteur donné. Cela permet de mettre en évidence une plus grande robustesse des véhicules à moteur diesel. Les véhicules ayant l'intensité d'usage la plus importante ont les taux de sortie du parc près de trois fois moins élevés (TIR=0,31) que leurs homologues à faible intensité d'usage. Ce résultat qui semble contradictoire au premier abord s'explique par le fait que les véhicules les plus vieux qui sont soumis à la plus faible intensité d'usage. L'usage annuel étant une fonction décroissante de l'âge des véhicules. Un croisement entre l'usage et la motorisation montre que les véhicules diesel qui parcourent plus de 25 000 km par an sont amenés à sortir 2,55 fois plus rapidement que les véhicules à moteur essence qui parcourent moins de 15 000 km par an (TIR 2,55). Ce résultat important, souligne la primauté de l'usage sur l'effet motorisation. L'effet génération est négatif puisqu'une hausse des

taux de sortie de 10% avec chaque génération est observé (TIR=1,10), ce résultat s'explique principalement par la hausse observée du kilométrage annuel moyen. En définitive ces résultats montrent que l'usage annuel ainsi que la motorisation sont les principaux déterminants du déclassement des véhicules.

6.3 Modélisation des taux de sortie à effectif retardé donné.

6.3.1 Les données

Les données introduites dans cette partie, sont différentes de celles précédemment mobilisées. Elles sont issues d'un traitement effectué à partir des vagues 1990 à 2008 du panel Parc Auto. Pour chaque type de motorisation (diesel/essence) neuf sous-groupes d'effectifs sont créés selon que le kilométrage au compteur et le kilométrage annuel se situent au dessous, en dessous ou entre les 1^{er} et 3^{ème} quartiles. A partir des ces effectifs par groupe de motorisation, sous-groupes de kilométrage au compteur et sous-sous-groupes de kilométrages annuels, nous estimons les sorties en différenciant pour chaque génération l'effectif de l'année n par celui de l'année n-1. En outre, afin de lisser les imperfections dues aux fluctuations d'échantillonnages qui impliquent pour certains cas des sorties négatives, nous attribuons à ces dernières une valeur nulle.

6.3.2 Estimation et résultats

Nous estimons un modèle dont la variable d'exposition est l'effectif retardé, de fait nos estimations sont formulées à effectif retardé constant. De fait, la variable endogène correspond aux taux de sorties estimés. Pour ce modèle nous introduisons comme variables explicatives l'année d'observation et le kilométrage annuel (selon que celui-ci se situe en dessous, au-dessous ou entre les valeurs du 1^{er} et du 3^{ème} quartile). Dans le but de tenir compte de la différence de longévité des véhicules par type de motorisation nous introduisons la motorisation ainsi que les effets croisés du kilométrage annuel et du kilométrage au compteur. Nous introduisons aussi les années d'observations afin de neutraliser leur effet sur les autres variables explicatives. Les résultats sont présentés dans le tableau 4-11.

Chapitre 4 Loïs de survie du parc automobile

| Variable | TIR | E-type | Z | P> z | [I.C. 95%] |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|------------------|
| <i>Diesel</i> | 0,4743 | 0,0146 | -24,25 | 0,0000 | [0,4465; 0,5038] |
| <i>Kman2</i> | 0,6673 | 0,0386 | -6,99 | 0,0000 | [0,5957; 0,7475] |
| <i>Kman3</i> | 1,7219 | 0,1092 | 8,57 | 0,0000 | [1,5207; 1,9498] |
| <i>Kilcompt2</i> | 0,9215 | 0,0527 | -1,43 | 0,1530 | [0,8237; 1,0309] |
| <i>Kilcompt3</i> | 1,1181 | 0,0700 | 1,78 | 0,0740 | [0,9890; 1,2641] |
| <i>Kman2xKilcompt2</i> | 0,9404 | 0,0690 | -0,84 | 0,4020 | [0,8143; 1,0859] |
| <i>Kman2xKilcompt3</i> | 0,9056 | 0,0735 | -1,22 | 0,2220 | [0,7723; 1,0618] |
| <i>Kman3xKilcompt2</i> | 0,5555 | 0,0454 | -7,2 | 0,0000 | [0,4733; 0,6520] |
| <i>Kman3xKilcompt3</i> | 0,4577 | 0,0409 | -8,75 | 0,0000 | [0,3842; 0,5453] |
| <i>Annee1991</i> | 0,6197 | 0,0416 | -7,13 | 0,0000 | [0,5432; 0,7068] |
| <i>Annee1992</i> | 0,2968 | 0,0258 | -14 | 0,0000 | [0,2503; 0,3518] |
| <i>Annee1993</i> | 0,7937 | 0,0497 | -3,69 | 0,0000 | [0,7019; 0,8974] |
| <i>Annee1994</i> | 0,5761 | 0,0401 | -7,92 | 0,0000 | [0,5025; 0,6604] |
| <i>Annee1995</i> | 0,2322 | 0,0226 | -14,99 | 0,0000 | [0,1918; 0,2811] |
| <i>Annee1996</i> | 0,3889 | 0,0307 | -11,98 | 0,0000 | [0,3331; 0,4539] |
| <i>Annee1997</i> | 0,2233 | 0,0219 | -15,3 | 0,0000 | [0,1843; 0,2707] |
| <i>Annee1998</i> | 0,7285 | 0,0466 | -4,95 | 0,0000 | [0,6426; 0,8258] |
| <i>Annee1999</i> | 0,6415 | 0,0430 | -6,63 | 0,0000 | [0,5625; 0,7315] |
| <i>Annee2000</i> | 0,9033 | 0,0553 | -1,66 | 0,0960 | [0,8012; 1,0184] |
| <i>Annee2001</i> | 0,3599 | 0,0298 | -12,36 | 0,0000 | [0,3061; 0,4233] |
| <i>Annee2002</i> | 1,1943 | 0,0685 | 3,1 | 0,0020 | [1,0672; 1,3364] |
| <i>Annee2003</i> | 1,1875 | 0,0686 | 2,98 | 0,0030 | [1,0604; 1,3298] |
| <i>Annee2004</i> | 1,1522 | 0,0683 | 2,39 | 0,0170 | [1,0258; 1,2942] |
| <i>Annee2005</i> | 0,3094 | 0,0273 | -13,32 | 0,0000 | [0,2603; 0,3678] |
| <i>Annee2006</i> | 0,3608 | 0,0296 | -12,44 | 0,0000 | [0,3072; 0,4237] |
| <i>Annee2007</i> | 0,3466 | 0,0289 | -12,71 | 0,0000 | [0,2943; 0,4082] |

Tableau 4- 11 Paramètres du modèle de Poisson intégrant l'effectif retardé comme variable d'exposition

Le modèle est globalement bon (pseudo- $R^2=0,2157$ et log-vraisemblance = - 5 131). Les résultats présentés dans le tableau 4-11 confirment que les véhicules à moteur diesel ont un taux de sortie beaucoup moins élevé que les véhicules à moteur essence (TIR=0,47). Ainsi, à effectif retardé constant, les véhicules à moteur diesel sortent plus de deux fois moins rapidement du parc que les véhicules à moteur essence. La différence entre les deux motorisations est beaucoup moins marquée que dans le modèle précédent (TIR=0,25) montrant que l'avantage lié à la robustesse des véhicules à moteur diesel perd de son effet en raison d'un usage annuel plus important. Les véhicules ayant l'intensité d'usage au-delà du 3^e quartile ont, à effectif retardé constant, des taux de sortie qui sont 72% plus élevés (TIR=1,72) que ceux qui sont en-dessous du 1^{er} quartile. Les croisements du kilométrage annuel avec le kilométrage affiché au compteur montrent que les taux de sorties baissent avec les catégories de quartiles

Chapitre 4 Lois de survie du parc automobile

associés. Ce résultat qui semble contradictoire au premier abord s'explique par le fait que ce sont les véhicules les plus vieux, de fait, les plus susceptibles d'être déclassés rapidement qui affichent l'usage annuel le plus faible. En effet, l'usage annuel est une fonction décroissante de l'âge des véhicules.

CONCLUSION

Il convient, avant tout, de rappeler notre problématique initiale sur l'observation du *vieillissement du parc automobile qui remet en cause la stabilité temporelle des lois de survie du parc automobile*. Ce chapitre permet de répondre à cette question en liant les observations qui ont été faites sur le vieillissement au processus de renouvellement du parc automobile. L'observation du vieillissement est expliquée par une relative inertie des immatriculations de véhicules neufs combinée à l'accroissement progressif de la durée de vie des véhicules particuliers. En effet, la dynamique démographique du parc automobile est animée par deux mouvements bien distincts :

- les entrées correspondant aux immatriculations de véhicules neufs ainsi qu'aux importations de véhicules.
- les sorties correspondant à la mise au rebut motivée par l'obsolescence et destruction prématurée (suite aux accidents de la route par exemple) ainsi qu'à l'exportation de véhicules hors du territoire.

Ces deux mouvements démographiques définissent le solde naturel du parc automobile obtenu en retranchant les sorties aux entrées. Ainsi, les immatriculations de véhicules neufs et le déclassement des véhicules représentent les deux seuls facteurs démographiques majeurs jouant sur le vieillissement du parc automobile. Dans ce contexte la relative stabilité des immatriculations de véhicules neufs observée depuis plus d'une décennie vient s'ajouter à l'allongement de la durée de vie du parc automobile pour expliquer le ralentissement global du renouvellement du parc.

Soulignons par ailleurs qu'il semble difficile de lier l'allongement de la durée de vie des véhicules particuliers à la stagnation du marché de la demande de véhicules neufs. On n'observe, en effet, ainsi aucune symétrie entre le flux des immatriculations de véhicules neufs et le flux de véhicules sortants du parc. On suppose habituellement que la demande de remplacement est induite par le déclassement des véhicules particuliers. Cette hypothèse simplificatrice occulte l'existence d'un marché transactionnel de l'occasion. La demande de remplacement est principalement motivée par un besoin de consommation souvent facilitée par la revente d'un préalable du véhicule.

Dans le chapitre 3, notre questionnement s'était focalisé sur les facteurs du vieillissement du parc automobile. Nous n'étions pas fixés sur le sens de l'évolution (à l'allongement ou à la baisse) de la durée de vie des véhicules particuliers et donc de son impact réel sur le vieillissement observé du parc automobile. Ce chapitre prouve que l'allongement de la durée de

vie des véhicules particuliers est un facteur démographique majeur ayant un impact sur le vieillissement du parc.

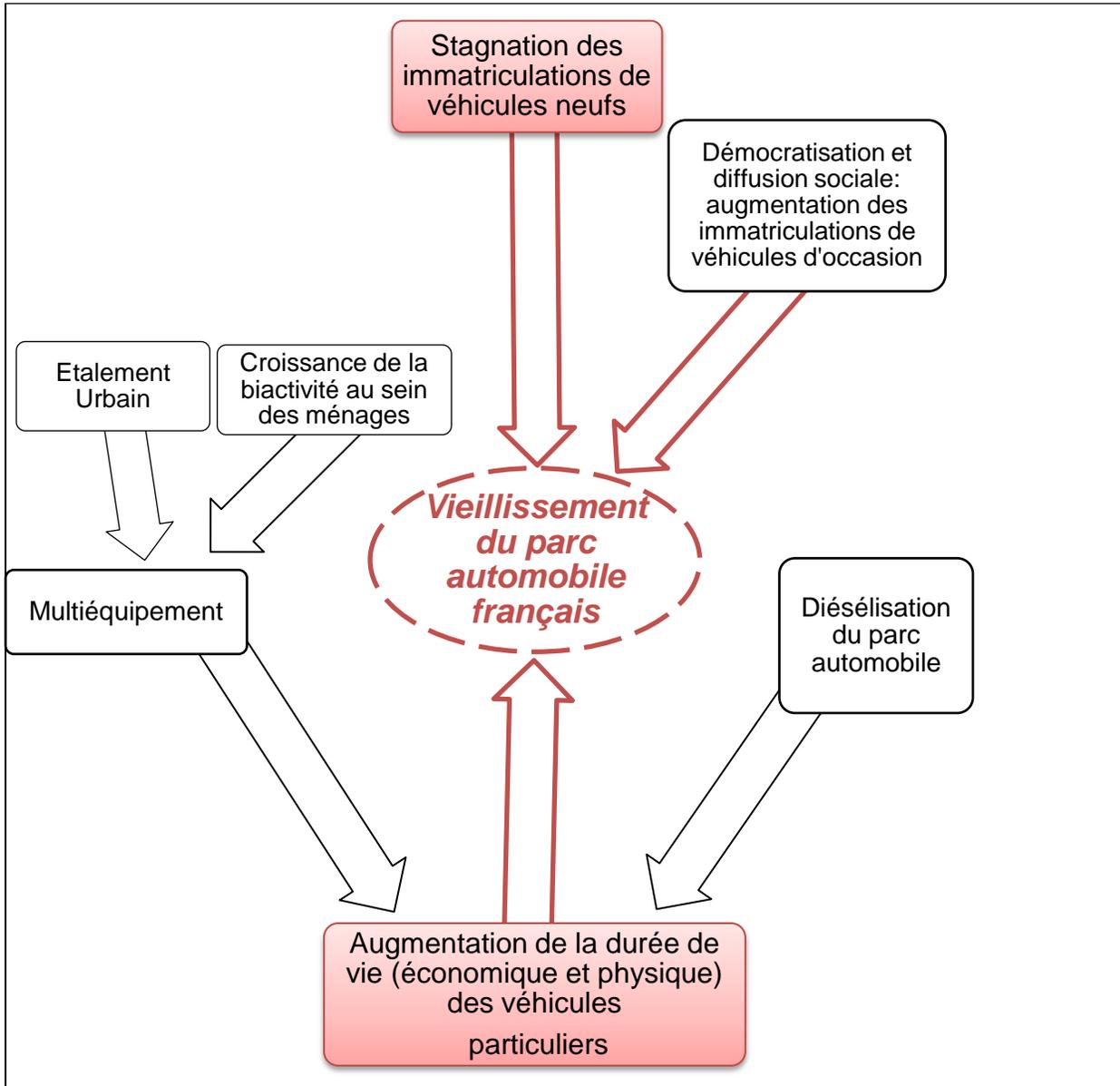


Figure 4- 49 Déterminants associés à l'allongement de la durée de vie et de l'accentuation du vieillissement du parc. En encadré rouge les facteurs démographiques donnant le solde naturel du parc. NB : cette figure n'indique ni l'intensité de chacun des facteurs ni les éventuelles boucles de rétroaction.

Dans le présent chapitre nous avons montré que la durée de vie des véhicules particuliers augmente. Une baisse du déclassement des véhicules conduit irrémédiablement à la hausse du solde naturel pour les plus anciennes générations de véhicules si les entrées (immatriculations de véhicules neufs) sont stationnaires. Cette baisse du déclassement explique par conséquent le constat fait sur le vieillissement structurel du parc automobile. Ce vieillissement trouve ses causes dans l'allongement de la durée de vie des véhicules particuliers expliqué lui-même par des facteurs socio-économiques liés à l'usage comme le multi-équipement et la diésélisation du parc. La figure 4-49 résume les actions des divers facteurs déjà énoncés comme impactant directement sur le vieillissement du parc automobile. L'évolution et l'allongement progressif de la durée de vie des véhicules particuliers, a été mesurée suivant deux dimensions :

- La durée de vie médiane estimée par ajustement d'une loi de Weibull sur des taux de survie transversaux gagne près de 4,6 années en passant de 8,62 ans pour la génération 1984-1987 à 13,23 ans pour la génération 2004-2008.
- Les ajustements effectués sur des taux de survie longitudinaux montrent que la durée de vie médiane du parc automobile augmente moins fortement en passant de 9,97 ans pour la génération moyenne 1984 à 1987 à 11,57 ans pour la génération moyenne 2000 à 2003. Rappelons que la durée de vie générationnelle est un bon indicateur de l'évolution de la durée de vie physique.

Nous en concluons que l'augmentation de la durée de vie des véhicules particuliers est affectée à la marge par la hausse de la robustesse des véhicules particuliers. La hausse observée de la durée de vie est principalement expliquée par la conjonction de facteurs socio-économiques tels que la diésélisation du parc, du multi-équipement des ménages ou encore de la diffusion sociale de l'équipement.

Une régression de Poisson appliquée à des données issues des vagues 1990 à 2008 du panel Parc Auto donnant le kilométrage moyen au compteur et l'effectif pondéré par année d'observation par type d'usage (bas ou haut), d'âge de génération et de motorisation nous permet de mieux comprendre le lien entre la longévité et la durée de vie. Les véhicules diesel ont un taux de sortie du parc nettement inférieur à celui des véhicules essence ($TIR=0,25$), ce qui confirme nos observations faites à partir des lois de survie du parc.

A partir de données d'effectifs pondérés différenciés par type de motorisation (diesel/essence) puis selon que les kilométrages au compteur et annuel se situent au dessous, en dessous ou entre le 1^{er} et le 3^{ème} quartile, nous menons une seconde régression. Nous confirmons, à effectif retardé constant, que les véhicules à moteur diesel ont un taux de sortie beaucoup moins élevé que les véhicules à moteur essence ($TIR=0,50$). La différence entre les

Chapitre 4 Lois de survie du parc automobile

deux motorisations est beaucoup moins marquée que dans le modèle précédent ($TIR=0,25$) montrant que l'avantage lié à la robustesse des véhicules à moteur diesel perd de son effet en raison d'un usage annuel plus important.

Chapitre 5 : Renouveaulement, projection et impact environnemental du parc automobile.

SOMMAIRE

CHAPITRE 5 : RENOUVELLEMENT, PROJECTION ET IMPACT ENVIRONNEMENTAL DU PARC AUTOMOBILE.201

| | |
|---|-----|
| INTRODUCTION | 203 |
| 1 LE PARC AUTOMOBILE A L'HORIZON 2020 : LE SCENARIO « SANS RUPTURE »..... | 203 |
| 1.1 Scénarios et hypothèses de déploiement technologique | 203 |
| 1.2 Simulation du déclassement par lois de survie du parc..... | 205 |
| 1.2 Simulation du renouvellement du parc automobile | 206 |
| 2 LE PARC AUTOMOBILE A L'HORIZON 2020 : COMPARAISON ET CHOIX DE SCENARIOS AVEC INTRODUCTION DE MOTORISATIONS ALTERNATIVES | 208 |
| 2.1 Les différents couples technologies-énergies connus | 208 |
| 2.2 Les technologies développées | 210 |
| 2.3. Modèles de déploiement technologique à l'horizon 2020 | 213 |
| 3 LE PARC AUTOMOBILE A L'HORIZON 2020 : SCENARIO DEPOORTER ET ASSIMON | 220 |
| 4 LE PARC AUTOMOBILE A L'HORIZON 2020 : SCENARIO DUVAL-DESTIN..... | 224 |
| 5. COMPARAISON DES SCENARIOS DE DEPOORTER ET ASSIMON ET DE DUVAL-DESTIN | 227 |
| 5.1 Structure du parc par type d'énergies selon le scénario Depoorter et Assimon | 227 |
| 5.2 Structure du parc par type d'énergies selon le scénario Duval-Destin..... | 229 |
| 6. INVENTAIRES D'EMISSIONS DU PARC AUTOMOBILE A L'HORIZON 2020..... | 230 |
| 6.1 Structure du parc automobile par énergie et catégorie de cylindrées à l'horizon 2020 | 231 |
| 6.2 Autres données et hypothèses pour l'utilisation de COPERT IV..... | 239 |
| 6.3 Résultats et bilan des inventaires d'émissions..... | 241 |
| CONCLUSION | 244 |

INTRODUCTION

Ce dernier chapitre a une visée applicative de la modélisation par lois de survie du renouvellement du parc automobile. Nous commencerons par construire un modèle stylisé de projection de la structure du parc automobile à l'horizon 2020 selon un scénario dit « sans rupture », c'est-à-dire ne considérant aucune diffusion technologique. Cette projection de la structure du parc sera menée sur la base d'une simulation d'un renouvellement du parc par type d'énergies en mobilisant les lois de survie de Weibull estimées par des ajustements sur des taux de survie transversaux par type de motorisation (diesel/essence) présentées dans le précédent chapitre.

Progressivement, dans le but d'introduire des technologies d'avenir (véhicules hybride, tout électriques, PAC), nous développerons une approche comparative de la littérature des scénarios de prévision de déploiement des véhicules hybrides et tout électriques dans le but de créer une prospective des immatriculations par types d'énergies. A l'issue de cette étude comparative, nous retiendrons deux scénarios divergents dans leurs projections sur les parts de marchés de véhicules hybrides retenues, d'une part le scénario volontariste émis par [Depoorter et Assimon \(2011\)](#) et d'autre part le scénario, plus conservateur, émis par [Duval-Destin \(2010\)](#). Des structures de parc projetées à l'horizon 2020 seront estimées pour chaque scénario de déploiement selon le même mode opératoire que pour le scénario de parc dit « sans rupture ».

Les résultats de ces structures seront encore affinés par catégories de cylindrées (<1,4L ; 1,4-2,0L ; 2,0L<) afin de satisfaire à une prospective à l'horizon 2020 des niveaux d'émissions estimés à partir du logiciel COPERT IV. Les résultats des inventaires d'émissions seront finalement comparés pour chaque structure de parc issue de nos deux hypothèses de diffusion technologique contrastées.

Ainsi, l'objectif de ce chapitre est de mener une comparaison des impacts environnementaux respectifs et d'estimer le gain en matière d'émissions associé à un scénario favorisant un déploiement prononcé de véhicules hybrides face à un scénario plus mesuré.

1 Le parc automobile à l'horizon 2020 : le scénario « sans rupture »

1.1 Scénarios et hypothèses de déploiement technologique

La loi logistique est bien adaptée, quel que soit le secteur, pour simuler la diffusion de nouvelles technologies [[Sauvant, 2002](#) ; [Crozet, 2008](#)]. Son usage se justifie d'un point de vue économique, car le développement de nouvelles technologies est en règle générale assez progressif. Cette progressivité de la diffusion se justifie par la prudence des consommateurs qui, au moment de la diffusion du nouveau bien durable, détiennent peu d'informations sur sa

fiabilité, mais aussi par certains avantages du nouveau bien souvent mal évalués, ou encore, en raison de coûts souvent prohibitifs au moment de son introduction sur le marché. Concernant le secteur automobile, on peut aussi ajouter quelques facteurs supplémentaires comme les habitudes et les usages des consommateurs ainsi que les intérêts économiques et financiers des acteurs, ou encore de la capacité et la volonté des pouvoirs publics à accompagner l'offre naissante.

La loi logistique permet de prendre en compte différentes phases du processus de diffusion technologique. Des ajustements effectués sur les parts de marchés respectives des véhicules diesel et essence montrent qu'à l'exception des parts de marché observées entre 1995 et 2008, imprégnées d'une distorsion de marché durablement introduite par les primes aux remplacements des dispositifs « Balladur » puis « Juppé » (voir chapitre 3), elles répondent bien à une spécification paramétrique de type logistique (voir chapitre 3). Les processus de diffusion des parts de marché du véhicule diesel et de décroissance de la motorisation essence (y compris GPL) et diesel suivent toutes deux des lois logistiques complémentaires :

$$\begin{cases} y_{diesel}(t) = \frac{S}{1 + \alpha \cdot e^{-\beta \cdot (t-t_0)}} \\ y_{essence}(t) = 100 - y_{diesel}(t), \text{ avec } t_0 = 1970 \text{ et } t \geq 1970 \end{cases}$$

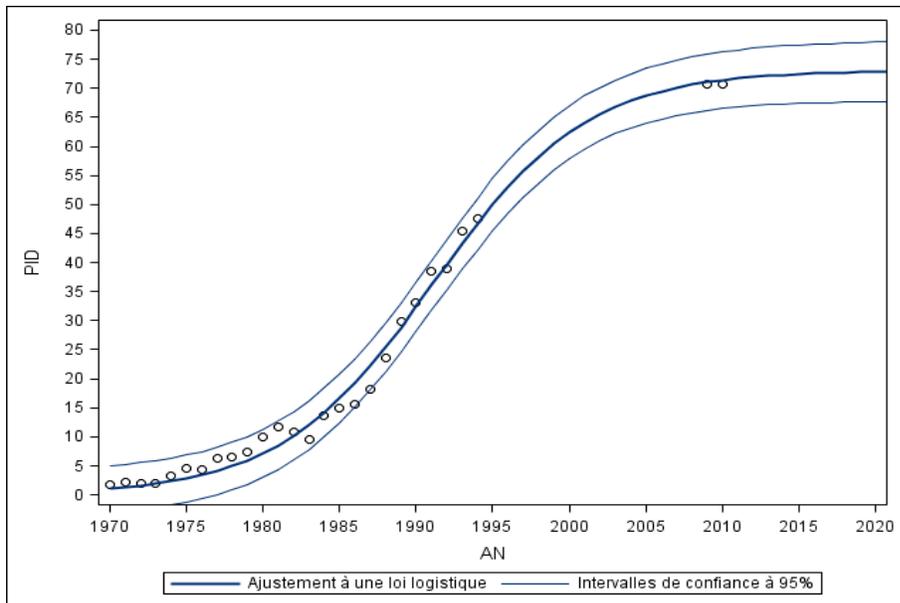


Figure 5- 1 Modèle logistique de projection de la part de marché (pourcentage des immatriculations totales) des véhicules à moteur diesel.

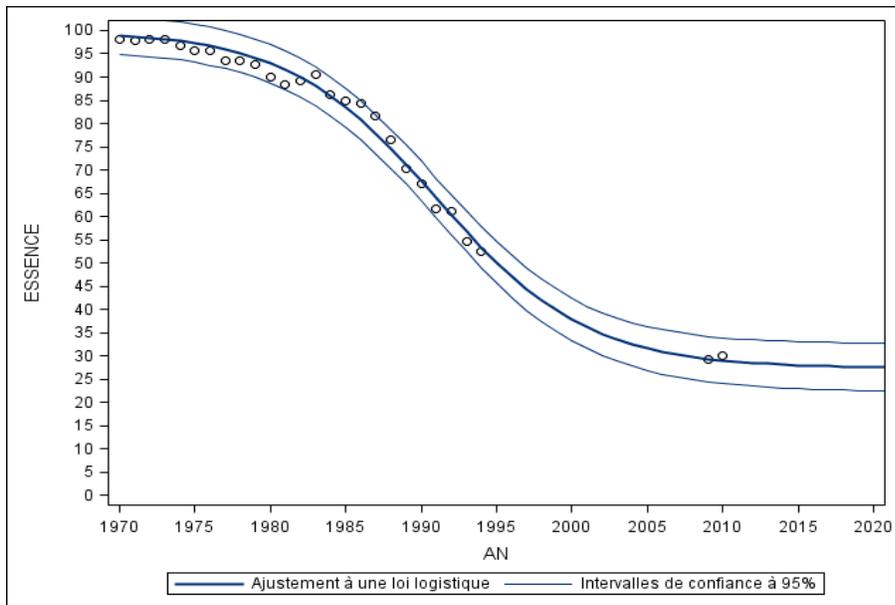


Figure 5- 2 Modèle théorique de projection de la part de marché des véhicules essence (y compris GPL)

| <i>Ajustement</i> | It | N | Alpha (α) | Beta(β) | Seuil de saturation | Intervalle de confiance de Alpha(α) à 95% | Intervalle de confiance de Beta(β) à 95% | Intervalle de confiance de S à 95% | R ² | Fisher |
|-------------------|----|----|--------------------|-----------------|---------------------|--|--|------------------------------------|----------------|--------|
| <i>Diesel</i> | 14 | 27 | 0,2003 | 68,0674 | 72,6150 | [0,1812 ; 0,2194] | [45,33 ; 90,81] | [69,32 ; 75,91] | 0,99574 | 1867 |

Tableau 5- 1 Résultats des ajustements par une loi logistique des parts de marché des véhicules diesel

Le scénario présenté, de type « sans rupture » (sans rupture technologique), se fonde sur les tendances actuellement observées de baisse progressive des parts de marché des véhicules à moteur essence au profit de leurs homologues à moteur diesel. Il faut tout de même souligner qu'il n'est pas improbable malgré les tendances actuelles et passées, d'observer à l'avenir une baisse, même épisodique, de la part des véhicules à moteur diesel en faveur de celle des véhicules à moteur essence. Le principal facteur militant en faveur de cette hypothèse est le rattrapage du prix du super sans plomb par le prix du gazole, susceptible de rendre les véhicules à moteur essence un peu plus attractifs. Bien que cette hypothèse soit plausible car souhaitée par les compagnies pétrolières françaises afin de rééquilibrer la demande de super et de gazole pour le moment nettement à l'avantage de cette dernière (la demande de gazole est en 2008, de l'ordre de 3 à 3,5 fois plus importante que celle de super), elle ne rassemble pour le moment aucune action (loi, règlement, fiscalité, etc.) significative qui justifierait de la classer comme une piste hautement probable.

1.2 Simulation du déclassement par lois de survie du parc

Nous venons de poser les hypothèses de projection des parts de marché des véhicules neufs par type de motorisation suivant une diffusion logistique des véhicules à moteur diesel. Afin

simuler le rythme de renouvellement du parc automobile nous devons introduire les hypothèses inhérentes au processus de déclassement des véhicules particuliers.

Pour cela nous pouvons faire appel aux lois de survie du chapitre 4 (le tableau 5-2 ci-dessous fait écho au tableau 4-7) et particulièrement aux lois de survie transversales qui ont permis de prouver une durée de vie plus importante pour les véhicules à moteur diesel. Nos résultats avaient mis en évidence, que les véhicules à moteur diesel ont la durée de vie médiane la plus élevée. Cette dernière avait été estimée à 14,5 ans (beta= 16,44 ans) pour 2006 à 2008. Pour cette même période, la durée de vie médiane des véhicules à motorisation essence avait été estimée à 11,95 ans (beta= 13,99 ans).

| Type de Motorisation | Taux moyens par groupes d'années : | Nb. Obs | Alpha (α) | Beta (β) | Intervalle de confiance de Alpha (α) à 95% | Intervalle de confiance de Beta (β) à 95% | R ² | Fisher |
|----------------------|------------------------------------|---------|--------------------|------------------|---|---|----------------|--------|
| <i>Essence</i> | <i>Moyenne 2006 à 2008</i> | 22 | 2,3314 | 13,9859 | [2,0999 ; 2,5629] | [13,5764 ; 14,3954] | 0,9710 | 2912 |
| <i>Diesel</i> | <i>Moyenne 2006 à 2008</i> | 28 | 2,8945 | 16,4445 | [2,5383 ; 3,2607] | [15,9203 ; 16,9687] | 0,9305 | 2259 |

Tableau 5- 2 Paramètres d'ajustement d'une loi de Weibull à des taux de survie transversaux moyens pour la période 2006 à 2008 par type de motorisation.

Comme nous l'avons montré dans le chapitre 4, l'évolution estimée du déclassement va dans le sens d'un allongement de la durée de vie des véhicules particuliers. Il y a donc de fortes présomptions à ce que la durée de vie médiane du parc automobile continue à croître à l'avenir. Nous décidons cependant d'émettre l'hypothèse de stabilité du processus de déclassement entre la période 2006-2008 et 2020. Cette hypothèse nous permettra d'appliquer les lois de survie transversales estimées sur la période 2006-2008 par type de motorisation pour nos projections de parc à l'horizon 2020. Rappelons que l'usage de ces lois de survie nous prive de toute projection du volume du parc automobile. Nous avons en effet montré que ces lois sous-estiment le volume du parc. Nous décidons cependant de nous focaliser principalement sur la représentativité de la structure du parc plutôt que sur la projection de son volume⁵⁶.

1.2 Simulation du renouvellement du parc automobile

La simulation du processus de renouvellement du parc automobile, peut être réalisée en appliquant les taux de survie sur les statistiques d'immatriculations. Les hypothèses sur les projections des parts de marchés et sur les lois de survie étant fixées, il reste à émettre une hypothèse sur le volume des immatriculations annuelles entre 2010 et 2020. Sachant que la moyenne annuelle du volume des immatriculations de véhicules neufs entre 1990 et 2009 est estimée à 2,05 millions de véhicules, nous décidons de nous appuyer sur deux scénarios de volume d'immatriculations :

⁵⁶ Nous aurions pu sacrifier la représentativité du parc en nous focalisant sur l'estimation du volume du parc en recourant aux lois de survies estimées par calage par type d'énergies (voir chapitre 4 section 5).

Chapitre 5 Renouvellement, projection et impact environnemental du parc automobile

- Un scénario bas fondé sur un niveau constant d'immatriculations annuelles de véhicules neufs de 2 millions de véhicules.
- Un scénario haut fondé sur un volume constant d'immatriculations annuelles de véhicules neufs de 2,1 millions de véhicules.

Les résultats de ces projections par type de scénario sont fournis en milliers de véhicules en activité par année modèle couvrant la période 2010-2020 dans le tableau 5-3. La figure 5-3 présente la structure du parc selon nos deux hypothèses à l'horizon 2020.

| Scénario | Motorisation | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|---------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Scénario Haut | Diesel | 1 177 | 1 257 | 1 327 | 1 384 | 1 430 | 1 465 | 1 490 | 1 506 | 1 515 | 1 519 | 1 520 |
| | Essence | 480 | 506 | 528 | 546 | 559 | 569 | 576 | 579 | 581 | 581 | 580 |
| Scénario Bas | Diesel | 1 121 | 1 197 | 1 264 | 1 318 | 1 362 | 1 395 | 1 419 | 1 434 | 1 442 | 1 446 | 1 448 |
| | Essence | 457 | 482 | 503 | 520 | 533 | 542 | 548 | 552 | 553 | 553 | 552 |

Tableau 5- 3 Projection de la structure annuelle du parc par type de motorisation et par année de construction (en milliers) à l'horizon 2020. Scénario « sans rupture »

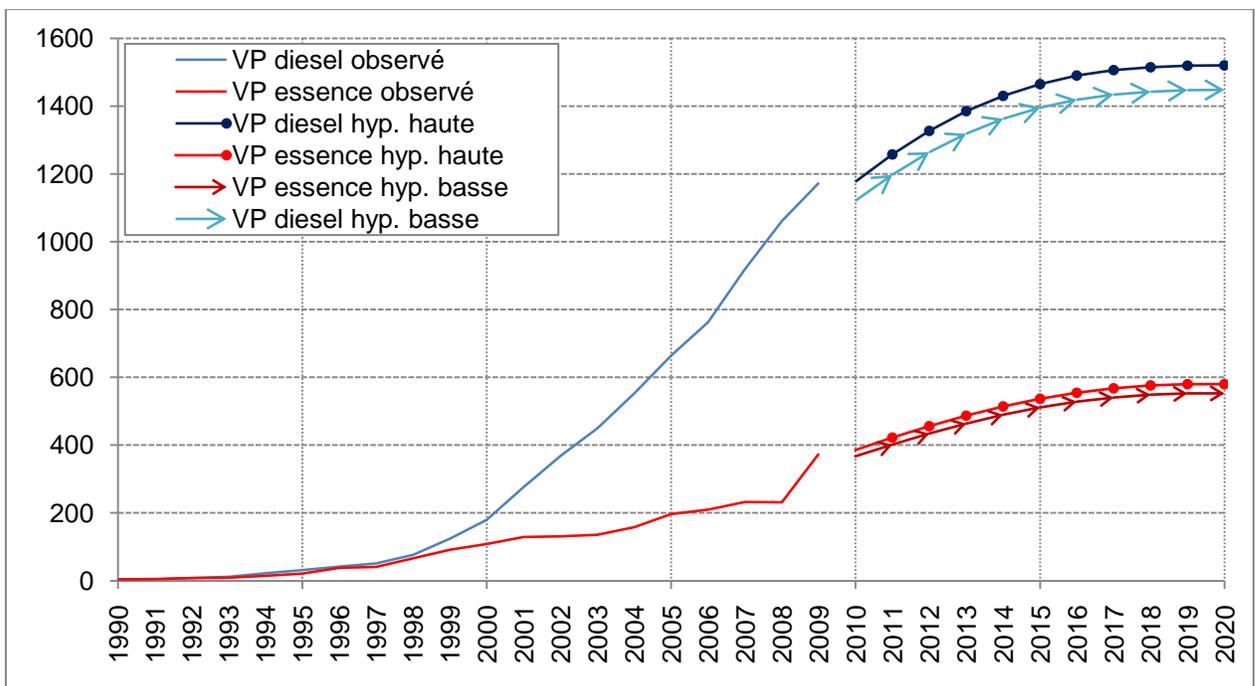


Figure 5- 3 Modèle de projection de la structure annuelle du parc par type de motorisation et par année de construction à l'horizon 2020. Scénario « sans rupture »

Sur la figure 5-3 nous remarquons que les proportions annuelles de véhicules diesel ont un fort ascendant sur celles de leurs homologues à moteur essence. Ce phénomène s'explique par les évolutions de parts de marchés qui continuent à favoriser la diésélisation ainsi que par l'usage de lois de survie qui retranscrivent fidèlement les avantages des véhicules diesel en matière de durée de vie. D'autre part, on observe que les véhicules dont l'année modèle est antérieure à 1995 seront largement minoritaires dans le parc en 2020.

Cette modélisation qui s'appuie sur les tendances passées, ne fait cependant aucune part au développement de motorisations alternatives, notamment les véhicules hybrides ou tout électriques (parfois 100% électrique ou plug-in électrique). Le développement de la motorisation hybride a pourtant déjà commencé dès le début des années 2000. Celui de la motorisation tout électrique commence à peine à avoir un développement perceptible relativement aux deux motorisations majoritaires au sein du parc automobile.

2 Le parc automobile à l'horizon 2020 : comparaison et choix de scénarios avec introduction de motorisations alternatives

Le précédent scénario de type « sans rupture », n'introduit aucune hypothèse sur le développement de motorisations alternatives (hybrides, tout électrique, PAC, biocarburants). Le principal obstacle à l'intégration de nouvelles motorisations dans les scénarios réside dans la faible représentativité de ces dernières dans le parc et dans l'incertitude qui pèse sur leur vitesse de déploiement. Très peu d'observations sont disponibles dans le fichier d'immatriculations du FCA, et moins encore dans la vague 2008 du panel Parc Auto. Les hypothèses introduisant les technologies alternatives doivent être choisies avec la plus grande précaution pour deux raisons principales : elles sont d'une part relativement nombreuses et d'autre part les scénarios déjà développés semblent diverger notamment sur les projections des parts de marché des véhicules hybride et électriques. Les scénarios [Duval-Destin \(2010\)](#) et du [BIPE \(2010\)](#) forment un parfait exemple de scénarios divergents que nous comparerons dans la suite.

2.1 Les différents couples technologies-énergies connus

Le développement de motorisations alternatives au moteur thermique sont attendues pour permettre la baisse de la dépendance énergétique aux matières fossiles et des émissions polluantes du transport routier. Ces progrès espérés, concernent à la fois la ressource énergétique utilisée mais aussi la motorisation dont le progrès concerne principalement le rendement énergétique. Les constructeurs automobiles ont présenté depuis quelques années de nombreuses alternatives technologiques au pétrole pour la motorisation des véhicules particuliers. La figure 5-4 résume différentes alternatives énergétiques à l'essence et au gazole. Ces différentes alternatives sont nombreuses, nous retrouvons par exemple le GPL⁵⁷, les

⁵⁷ Le Gaz Pétrole Liquéfié (GPL) est un sous produit de raffinage du pétrole, composé d'un mélange de butane (C₄H₁₀) et de propane (C₃H₈). Son utilisation est uniquement compatible avec les véhicules à moteur essence. Il permet d'émettre moins d'hydrocarbures imbrûlés que l'essence. Depuis 1998, son utilisation sur des véhicules légers est entièrement sécurisée grâce à la pose d'une soupape de sécurité.

GNV⁵⁸ ou les biocarburants⁵⁹ mais aussi certains carburants dits de « de synthèse » tels que le GTL⁶⁰, CTL⁶¹, BTL⁶².

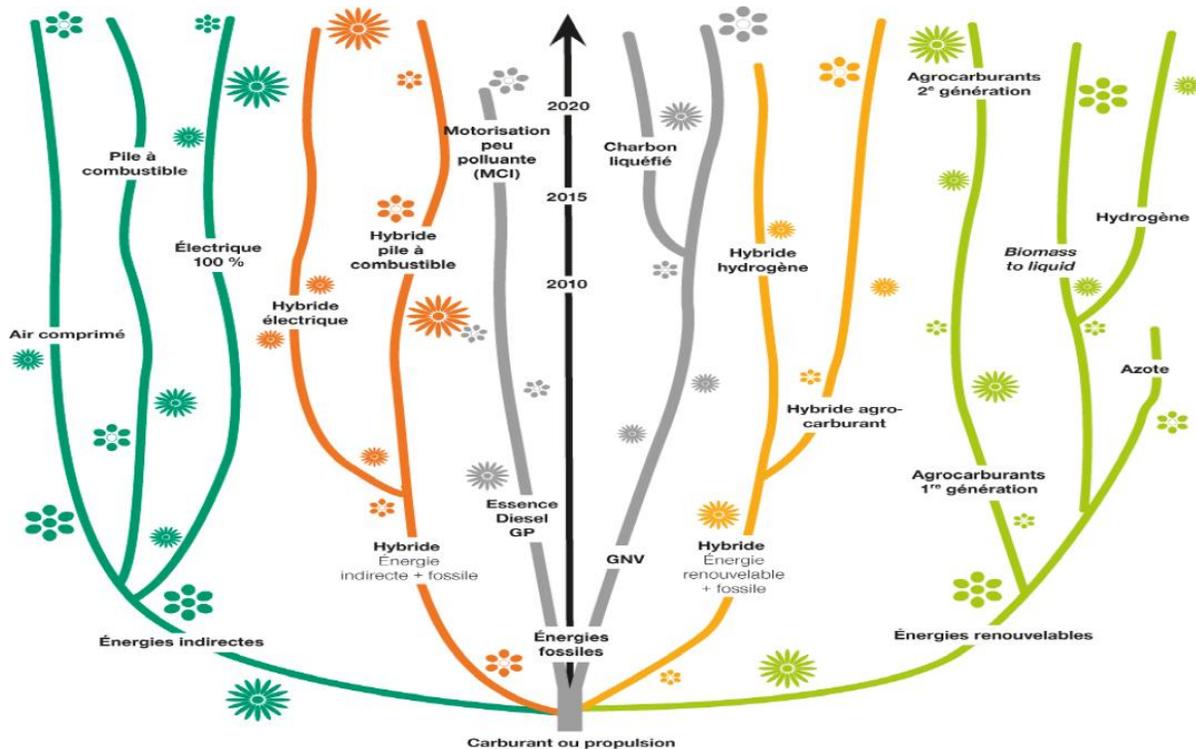


Figure 5- 4 Possibilités technologiques alternatives aux énergies fossiles. Source : BIPE

Aux différentes sources d'énergie possibles, il faut adjoindre les énergies indirectes telles que l'énergie électrique, à air comprimé ou les piles à combustibles (PAC). Notons par ailleurs que toutes les énergies fossiles peuvent aussi être exploitées par un moteur hybride, ce qui multiplie les possibilités.

⁵⁸ Le Gaz Naturel Véhicule (GNV) est composé majoritairement de méthane (CH₄, de l'ordre de 90%). Pour les émissions de monoxyde de carbone (CO), le GNV se place entre l'essence et le diesel, et est bien meilleur que le GPL. Les émissions d'hydrocarbures (HC), composées à 90% de méthane non toxique, sont, en moyenne, proches des deux autres motorisations. Les émissions d'oxydes d'azote (NO_x) sont comparables à celles de l'essence, et de 6 à 25 fois moindres que celles du diesel. Enfin le GNV n'émet pas de particules.

⁵⁹ Les deux principaux biocarburants actuellement développés industriellement sont les esters méthyliques d'huile végétale (EMHV) et l'éthanol. En 2003, les biocarburants représentaient 0,7% du volume total de carburants utilisés dans les transports en France.

⁶⁰ Les technologies GTL (Gas to Liquid) permettent de fabriquer des carburants à partir du gaz naturel en utilisant le procédé de synthèse Fischer-Tropsch. Le GTL est un carburant de très bonne qualité, car il ne contient pas de composés aromatiques, d'oléfines, ni de soufre.

⁶¹ Les technologies CTL (Coal to Liquid) permettent de produire des carburants à partir du charbon. On rappelle que les réserves mondiales de charbon sont estimées à 200 années de consommation actuelle. Ces 20 dernières années peu d'efforts de recherche ont été engagés dans le CTL mais une montée durable du prix du pétrole pourrait relancer son intérêt.

⁶² La filière BTL (Biomass to Liquid) est au stade de la recherche-développement pour la production de gazole. Les matières collectées (bois, herbe, ...) sont transformées en « gaz de synthèse » puis en gazole par le procédé de synthèse Fischer-Tropsch.

Bien que toutes les filières présentées aient fait l'objet de projets de recherche et développement de la part des constructeurs et équipementiers automobile, il est peu probable de les voir toutes être proposées au consommateur dans un avenir proche. Ces filières énergétiques, qui doivent en outre être associées à des motorisations adaptées demandent d'importants investissements en recherche et développement qui ne peuvent être facilement rentabilisés s'ils sont en concurrence « frontale » les uns avec les autres. Dans une telle optique, en l'absence d'un choc majeur sur les prix du baril de brut et sur ceux de la production électrique, nous décidons de retenir dans les orientations prises par tous les acteurs (constructeurs, équipementiers, pouvoirs publics, etc.) celles qui vont dans le sens d'un développement des véhicules à moteur essence et diesel thermiques performants ainsi que des véhicules hybrides et 100% électriques. Des projections à horizons plus lointains (2030 à 2050) auraient certainement fait intervenir le déploiement des véhicules mus par une motorisation dont l'énergie provient d'une pile à combustible⁶³ (PAC) [Crozet *et al.*, 2008]. La PAC représente la technologie dite de « rupture », car elle permet de se passer complètement des ressources fossiles pour un bilan d'émissions de gaz à échappement théoriquement⁶⁴ nul car uniquement composé de vapeur d'eau.

2.2 Les technologies développées

L'industrie automobile qui comprend les constructeurs automobiles et les équipementiers est le secteur d'activité le plus actif en matière de propriété industrielle en France selon l'[Institut National de la Propriété Industrielle \(INPI\) \(2009\)](#)⁶⁵. En France, l'industrie automobile représente près de 80% des demandes de dépôt de brevets publiées en 2008. Malgré cette importante dynamique en matière de recherche et développement, qui ont permis des avancées significatives en matière de sécurité qu'elle soit passive (coussins gonflables de sécurité, renforts latéraux, ceintures à prétensionneurs, etc.) ou active (antiblocage des roues (ABS), système électronique de contrôle de stabilité (ESP), etc.), de confort (climatisation, navigateurs

⁶³ La pile à combustible (PAC) est inventée en 1839 par Sir William Grove. Des applications concrètes furent développées dès le milieu du XXe siècle dans le domaine spatial. Ce n'est que récemment, avec les préoccupations sur les émissions de GES et sur l'épuisement des ressources fossiles, que son application aux transports terrestres est envisagée. Le principe de fonctionnement de la pile à combustible est la réaction inverse de l'électrolyse de l'eau. Dans cette dernière l'hydrogène (H₂) et l'oxygène (O₂) sont combinés en faisant passer un courant électrique dans un électrolyte. Bien que la PAC apporte un rendement global de 30% à 40%, contre 10% à 30% pour le moteur thermique, son développement industriel se fera vraisemblablement à long terme (15 à 20 ans) pour deux raisons principales : d'une part de nombreux problèmes techniques sont encore mal résolus ; d'autre part, son coût est actuellement très élevé. D'après l'Institut Français du Pétrole, le coût des piles fabriquées aujourd'hui (de type PEM « Proton Exchange Membrane » ou basse température) est supérieur à 3 000 /kW, à comparer aux 30 à 50 /kW pour les moteurs thermiques conventionnels produits en série.

⁶⁴ En théorie il faudrait prendre en compte l'énergie utilisée pour produire l'hydrogène liquide.

⁶⁵ Le trio de tête en matière de dépôts de brevets est constitué par les groupes PSA (961 brevets), Renault (950 brevets) et l'Oréal (457 brevets).

de bord, limiteur de vitesse, etc.) ou de rendement énergétique des moteurs (injection directe, downsizing, etc.), on constate globalement une forte inertie dans l'évolution des motorisations proposées aux particuliers.

En effet, concernant la France, le parc automobile est actuellement dominé par deux types de motorisations fossiles, les véhicules à moteurs diesel et essence qui représentent en 2009 respectivement 58% et 42% du volume du parc automobile [CCFA, 2010]. Cette suprématie des motorisations essence et diesel semble pourtant remise en question à l'avenir, d'une part avec la raréfaction des ressources pétrolières qui vont impacter le prix des carburants et d'autre part avec la mise en place de politiques au niveau français, européen et mondiaux pour diminuer la dépendance énergétique, les émissions de GES et les polluants locaux. Dans ce contexte, il semble essentiel de comprendre le virage technologique qui semble être entrepris par les constructeurs et équipementiers pour parer l'inévitable extinction des ressources fossiles. Cette section permet de décrire les principales technologies que les constructeurs comptent déployer pour faire face aux défis futurs. Ces technologies peuvent être classées en deux grandes catégories, d'une part les moteurs à combustion interne à fort rendement énergétique, dans la continuité des motorisations essence et diesel proposées actuellement, et d'autre part les véhicules hybrides regroupant moteurs électriques et thermiques en alternant ou mixant les deux sources d'énergies dans le but de minimiser la consommation de carburant.

2.2.1 Le moteur thermique à combustion interne

Le moteur thermique à combustion interne ne cesse d'être l'objet de recherches au niveau mondial centrées sur l'objectif d'obtenir une combustion quasi parfaite permettant la mise sur le marché de véhicules à moteur essence et diesel performants [Jeuland et Montagne, 2006]. Les progrès espérés semblent importants et doivent permettre l'amélioration conjointe du rendement du moteur à combustion interne et la réduction des émissions polluantes (particulièrement les oxydes d'azote) et des GES.

Les recherches lancées depuis de nombreuses années par les constructeurs, équipementiers et pétroliers débouchent sur la mise au point de moteurs diesel à combustion interne plus performants dotés de la technologie HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition ou combustion homogène) et prêts à être commercialisés⁶⁶. Le moteur à essence n'est toutefois pas en reste dans cette course à l'amélioration de la technologie de combustion interne, puisque les constructeurs et équipementiers ont développé une technologie analogue à celle du HCCI pour le diesel pour les moteurs à essence nommée CAI (Controlled Auto Ignition ou auto-inflammation contrôlée). Contrairement à la technologie diesel HCCI ou l'auto-

⁶⁶ Le moteur HCCI existait déjà avant l'apparition de l'allumage électronique. Son coût prohibitif ainsi que les freins technologiques n'ont pas permis de garantir une fiabilité en cohérence avec une introduction sur le marché.

inflammation du mélange air-carburant est obtenue par les fortes pressions et la température, la technologie CAI permet le retraitement des gaz brûlés résiduels (CAI).

Qu'il s'agisse de la technologie HCCI ou de la technologie CAI, le principe général reste le même : permettre un mélange air-carburant parfaitement homogène dans les chambres de combustion. Ce mélange homogène est obtenu par l'apport de gaz d'échappement réinjectés ou conservés dans la chambre à température élevée permettant d'atteindre, lors de la phase de compression, l'amorce d'une combustion par auto inflammation nommée « auto-allumage ».

Outre les gains en matière de rendement énergétique et de baisse des émissions d'oxydes d'azote [Jeuland et Montagne, 2006], les avantages d'une telle technologie sont multiples. Il devient notamment superflu d'incorporer un système d'allumage pour les moteurs à essence, mais de manière plus générale cette technologie permet de simplifier l'équipement nécessaire à une plateforme à injection directe. Il faut tout de même indiquer que le contrôle du dosage dans les proportions stœchiométriques du carburant injecté par le calculateur de combustion est très complexe, puisqu'il doit gérer à la fois la quantité de gaz brûlés réinjectés et celle du carburant nécessaire. Cette dernière observation reste la principale limite à la généralisation de la technologie CAI pour les moteurs à essence mais semble moins contraignante pour la technologie HCCI s'adressant aux moteurs diesel. Grâce aux technologies CAI et HCCI, l'Association Européenne des Constructeurs Automobiles (ACEA), pense que le moteur à combustion interne sera encore d'actualité en 2020. Selon, le constructeur Renault (2011), les technologies HCCI et CAI, sont, du moins à long terme, de bons candidats pour équiper les véhicules hybrides, ce qui pourrait permettre d'ajouter des gains sur la baisse de la consommation de carburant et donc sur les émissions associées.

2.2.1 Le véhicule hybride

Le véhicule hybride est un véhicule où coexistent à la fois un moteur électrique et un moteur thermique. L'objectif de l'association des deux types d'énergies consiste à minimiser la consommation de carburant et ainsi les émissions polluantes associées en optimisant le fonctionnement de chacun des moteurs. La gestion du système hybride se fait par un calculateur de bord qui arbitre en temps réel le choix de l'énergie mobilisée permettant de satisfaire à la demande de puissance tout en minimisant la consommation de carburant utilisée. En règle générale la pleine efficacité du moteur électrique se fait au démarrage et à faible vitesse (jusqu'à 30 km/h pour une Toyota Prius). Avec la hausse de la vitesse la motricité est progressivement prise en charge par le moteur thermique. Ce dernier prend totalement le relais pour les vitesses élevées. Notons qu'en cas de forte accélération et même à vitesse élevée, le moteur thermique peut être assisté par le moteur électrique à la discrétion du calculateur de bord.

Le véhicule hybride offre des avantages et fonctionnalités supplémentaires par rapport aux véhicules thermiques [Badin *et al.*, 2004 ; Montaru, 2009] :

1. Optimisation de la gestion d'énergie des accessoires électriques ;
2. Stop & Start (coupure du moteur à l'arrêt et démarrage automatique) ;
3. Récupération d'énergie au freinage ;
4. Assistance électrique à la traction ;
5. Mode tout électrique ou « Zero Emission Vehicle » (ZEV);
6. Autonomie en tout électrique ;
7. Recharge de la batterie sur le réseau.

Il existe différents types de véhicules hybrides, une classification assez cohérente est d'ailleurs proposée par Montaru (2009), selon les différentes fonctionnalités (allant de 1 à 7) dont peut être doté un véhicule hybride. Les différences en matière de fonctionnalités se traduisent par des différences dans les besoins électriques, les taux d'électrifications variant ensuite en fonction des besoins. Montaru (2009) regroupe les véhicules par groupes selon des caractéristiques de gammes de dimensionnement en puissance, de tension et d'énergie délivrée par le pack de batteries :

- Soft ou micro hybride ayant les fonctionnalités (1) et (2) et/ou (3) (exemple : Citroën C3)
- Mild hybrid ayant les fonctionnalités (1), (2), (3), (4) et parfois (5) (exemple : Honda Insight)
- Full hybrid ayant les fonctionnalités (1), (2), (3), (4), (5) et parfois (6) (exemple : Toyota Prius)
- Plug-in hybride ayant les fonctionnalités (1), (2), (3), (4), (5), (6) et (7) (exemple : Volvo V60)
- Véhicule tout-électrique ayant les fonctionnalités (3), (6) et (7) (exemple : Renault Kangoo)

2.3. Modèles de déploiement technologique à l'horizon 2020

L'ensemble des acteurs politiques et économiques s'accordent à dire que la transition technologique se réalisera avant 2020 ne serait-ce qu'en raison de la demande en produits pétroliers qui ne cesse de croître avec le développement économique des pays émergents (la Chine, l'Inde ou le Brésil). Le pic de production de pétrole (ou « peak oil ») se situe d'après de nombreuses projections autour de 2015. Selon des projections du DoE (Department of Energy, ministère américain de l'Énergie) le pic se situerait entre 2011 et 2015. Dans cette perspective éminemment probable, durant la phase transitoire qui sépare 2012 et 2020, des moyens importants sont en train d'être déployés en France par les pouvoirs publics (plan « véhicule décarboné ») pour accompagner et accélérer les changements économiques et écologiques attendus nécessaires pour accorder une place significative aux motorisations alternatives.

Des changements sont déjà perceptibles dans les comportements d'achat des automobilistes qui se tournent de plus en plus vers les véhicules peu émetteurs. Si la tendance de l'activité du marché automobile en France ne semble guère favorable au sortir de la prime au renouvellement en décembre 2010 mise en place dans le cadre du plan de relance dès décembre 2008, la perspective d'une dynamique attendue sur les nouveaux marchés devrait, en revanche, offrir de réelles opportunités de développement aux constructeurs. Ces dynamiques peuvent s'appuyer sur la substitution des motorisations alternatives par des motorisations thermiques ainsi que sur les gains de performances énergétiques de ces dernières. Les différents scénarios que nous allons présenter sont tous d'accord sur le fait que les motorisations thermiques demeureront dominantes à horizon 2020, et cela, même en supposant un rythme de déploiement technologique soutenu.

2.3.1. Scénarios de diffusion technologique existants

Il existe de nombreux modèles de diffusion technologique concernant différentes technologies pour différents horizons temporels 2012, 2015, 2020, 2030 et parfois 2040. Dans un scénario prometteur, le BIPE⁶⁷ (2010) prévoit pour la France à l'horizon 2020 une part de marché de 15% pour les véhicules tout électriques et de 24% pour les véhicules hybrides. A l'opposé du scénario du BIPE (2010), on trouve celui de la Société des Ingénieurs de l'Automobile (SIA) qui prévoit, selon un scénario conservateur Duval-Destin (2010), une proportion de motorisations thermiques encore proche de 90% des immatriculations à l'horizon 2020. Ce qui laisse une part modeste de 10% pour les technologies alternatives pour 2020.

Entre le scénario prometteur du BIPE (2010) et celui de la SIA [Duval-Destin, 2010], il existe pourtant une pluralité de scénarios de déploiement technologique réalistes et convergents. Le scénario Nogues (2007) réalisé pour EDF est assez proche de celui de annoncé par Duval-Destin (2010) et peut être classé parmi les scénarios les plus conservateurs. Ce scénario qui a été formulé avec l'objectif de comprendre l'évolution de la demande énergétique pour les transports est fondé sur un taux de croissance des immatriculations neuves de 1% par an à partir de 2005 et sur des hypothèses d'une part de marché du diesel de 75% à partir de 2010. Il est fondé sur des projections de parts de marché des véhicules hybrides et électriques respectivement égales à 0,2 et 0,1% pour 2012 à 1 et 0,4% pour 2015 à 10 et 2% pour 2020 puis à 40 et 5% à l'horizon 2030.

Le scénario retenu par Hacquemand *et al.* (2009) prend pour hypothèse qu'à une part de marché de à 85% pour les motorisations thermiques, s'ajoutent 10% de véhicules hybrides et 5% de véhicules tout électriques en 2020. Cette vision est principalement justifiée par le potentiel des innovations technologiques en termes de gains de consommation et de diminution

⁶⁷ Bureau d'Information et de Prévision Economique

des rejets de CO₂ et de polluants locaux. Elle s'explique aussi par une hypothèse de déploiement très progressif des véhicules hybrides et électriques. Leur usage est dans un premiers temps limité à la circulation de flottes captives poussées par les aides des pouvoirs publics qui permettent de favoriser l'essor du marché.

Le scénario de déploiement technologique retenu par [Depoorter et Assimon \(2011\)](#) est conforme aux objectifs du plan gouvernemental⁶⁸. Il est conçu sur l'hypothèse d'une diffusion progressive des technologies électriques et hybrides. La diffusion anticipée démarre lentement en 2010 et s'accélère après 2015. Les hypothèses de part de marché pour les véhicules hybrides et électriques sont estimées à 7,5% en 2016, 30% en 2020 et 35% en 2025.

[Christidis et al. \(2003\)](#) montrent, dans le cadre d'une recherche européenne, qu'il y a une forte hétérogénéité dans le déploiement entre pays expliquée par le coût des énergies de substitution. Par exemple, les pays où l'électricité est peu chère et notamment les pays pour lesquels l'électricité est majoritairement d'origine nucléaire montrent un potentiel important pour le développement du véhicule électrique. Selon [Christidis et al. \(2003\)](#) en France à l'horizon 2020 la part de marché du véhicule électrique est estimée à 4% et celle du véhicule hybride à 24%. Pour l'Allemagne les déploiements des véhicules électriques et hybrides sont respectivement estimés à 3 et 23%.

Pour finir, le scénario [Wirmark et al. \(2006\)](#) formulé pour EUCAR (European Council for Automotive R&D) est un scénario au niveau européen de développement des technologies hybrides et électriques. Il prévoit 15% de véhicules hybrides thermiques-électriques, hybrides rechargeables et de véhicules pile à combustible (PAC) alimentés à l'hydrogène, 22% de véhicules alimentés aux biocarburants, 60% de moteurs à combustion interne (dont 30% essence et 30% diesel) et 3% de véhicules alimentés au GPL ou GNV à l'horizon 2030 (voir figure 5-5).

⁶⁸ Voir les dossiers de presse du 1er octobre 2009 : « Lancement du plan national pour le développement des véhicules électriques et hybrides rechargeables » et du 13 avril 2010 : « Avancées du plan de développement des véhicules électriques et hybrides », Jean-Louis Borloo et Christian Estrosi.

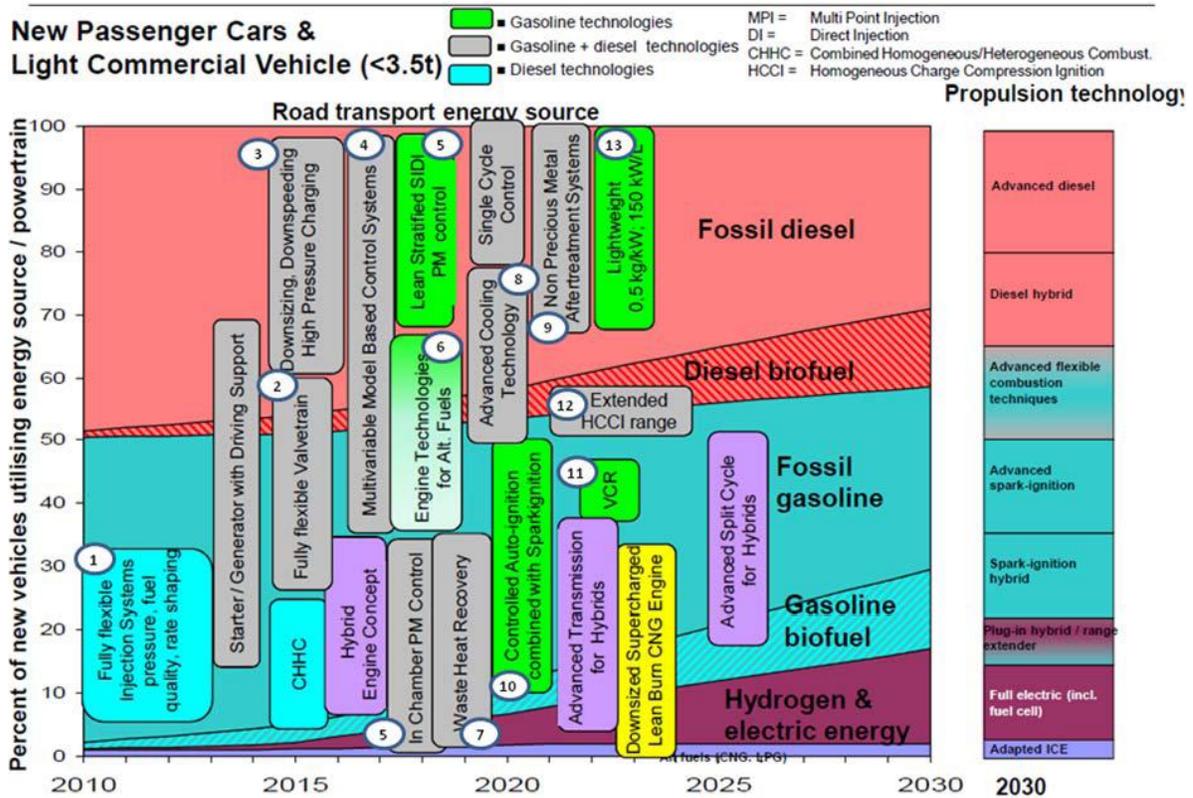


Figure 5- 5 Prévisions des parts de marchés par catégorie technologiques pour les véhicules particuliers et utilitaires en Europe. Scénario Wirmark et al. (2006) pour EUCAR

Le scénario *Wirmark et al. (2006)* reste assez en retrait dans les parts de développement allouées aux technologies hybrides, électriques et de PAC. Ce scénario qu'il soit pragmatique et réaliste ou au contraire empreint d'une volonté industrielle, est emblématique du paradoxe auquel sont confrontés les industriels et pétroliers. Ces derniers doivent rentabiliser et exploiter le sentier encore dominant de la motorisation thermique en investissant dans les technologies et les compétences indispensables à l'optimisation des gains sur les moteurs actuels. Dans le même temps, dans un marché qui présuppose la rareté et une allocation optimale des ressources dévolues à l'investissement en recherche et développement, les investissements tournés exclusivement vers des technologies vouées à être concurrencées puis à disparaître sont des stratégies qui deviennent économiquement de plus en plus risquées. Les constructeurs et pétroliers doivent pourtant anticiper l'inéluctable disparition des énergies fossiles pour ne pas se faire distancer dans un avenir incertain. Le risque étant une perte de suprématie pour les leaders (constructeurs, pétroliers, équipementiers) débouchant sur une redistribution des places et un bouleversement des compétences technologiques dans une nouvelle structure de marché favorable à l'essor des motorisations alternatives.

Rappelons tout de même que le scénario *Wirmark et al. (2006)* est un scénario à l'échelle européenne qui tient compte des nombreuses spécificités en matière de dépendance énergétique de certains pays européens n'ayant pas fait le choix de l'énergie nucléaire.

Incidentement, il minore tous les scénarios de déploiement précédemment présentés qui concernent spécifiquement les capacités de déploiement technologique pour la France.

2.3.2. Classification des scénarios de diffusion technologique

Avant de sélectionner notre scénario de déploiement technologique, nous devons de façon préliminaire opérer une classification des 7 scénarios de déploiement technologique décrits dans la section précédente. La classification que nous proposons repose sur un critère simple, selon que la part de moteurs thermiques à l'horizon 2020 se situe au-dessus de 85% ou au-dessous de 65%. Le scénario sera dit « optimiste » si cette part est en dessous de 65%, « intermédiaire » si elle est supérieure à 65% et inférieure à 85%, et « pessimiste » si elle est strictement supérieure à 85%. Le tableau 5-4 résume la classification présentée :

1. Les scénarios dits « optimistes » (en Bleu) : le scénario formulé par le [BIPE \(2010\)](#) est le seul à entrer dans cette catégorie. Rappelons qu'il prévoit une part de marché de 40% pour l'ensemble électrique et hybride à l'horizon 2020.
2. Les scénarios dits « réservés » (en Rose). Ils sont au nombre de 3 et sont plutôt formulés par les associations de constructeurs automobile notamment [Duval-Destin \(2010\)](#) et [Wirmark et al. \(2006\)](#), mais aussi [Nogues \(2007\)](#) pour l'opérateur national EDF.
3. Les scénarios dits « intermédiaires » (en Vert) sont au nombre de 3, ils sont d'origines diverses mais on peut dire qu'ils sont pour la plupart émis par des centres d'études ou de recherche indépendants.

| Scénario | Motorisation | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 |
|---------------------------------|---------------------------------|----------------|------|------|------|
| BIPE (2010) | Thermique | | 61% | | |
| | Hybride | | 24% | | |
| | Tout-électrique | | 15% | | |
| Christidis <i>et al.</i> (2003) | Thermique | | 72% | | |
| | Hybride | | 24% | | |
| | Tout-électrique | | 4% | | |
| Depoorter et Assimon (2011) | Thermique | | 70% | 65% | |
| | Hybride + tout-électrique | (7,5% en 2016) | 30% | 35% | |
| Duval-Destin (2010) | Thermique | | 90% | | |
| | Hybride + tout-électrique + PAC | | 10% | | |
| Hacquemand <i>et al.</i> (2009) | Thermique | | 85% | | |
| | Hybride | | 10% | | |
| | Tout-électrique | | 5% | | |
| Nogues (2007) | Thermique | 98,60% | 88% | | 55% |
| | Hybride | 1% | 10% | | 40% |
| | Tout-électrique | 0,40% | 2% | | 5% |
| Wirmark <i>et al.</i> (2006) | Thermique | | 95% | 90% | 85% |
| | Hybride + tout-électrique + PAC | | 5% | 10% | 15% |

Tableau 5- 4 Résumé des scénarios de déploiement technologique pour la France et pour l'Europe.

Ces différents scénarios de déploiement technologique, donnant des perspectives diverses sur les parts de marché des technologies présentes et futures, sont à la fois nombreux et relativement hétérogènes. Il est par conséquent assez ardu et risqué d'envisager un scénario unique qui définirait à la fois l'évolution des parts de marché associées aux motorisations d'origines fossiles dominantes (diesel et essence) et de celles associées aux véhicules hybrides, électriques et alimentés à l'hydrogène. On peut tout de même noter un point commun à tous les scénarios de déploiement technologique qui prévoient un déploiement plus marqué des véhicules hybrides que de leurs homologues exclusivement alimentés à l'électricité. Cette supériorité s'explique principalement par les nombreuses contraintes technologiques liées aux batteries, aux infrastructures de recharge, et aux conditions d'accompagnement du marché.

2.3.3. Freins liés au développement du véhicule hybride et tout-électrique

Le principal frein à la diffusion des véhicules électriques est lié au prix élevé des batteries. Selon [BCG \(2010\)](#) le coût probable des batteries à l'horizon 2020 devrait se situer entre 360 à 440 dollars par kWh correspondant à une fourchette de 1800 à 4400 dollars pour une batterie destinée à un véhicule hybride rechargeable (5 à 10 kWh pour 20 à 40 km d'autonomie). Le niveau de référence actuellement utilisé par les constructeurs pour planifier leurs flottes futures de voitures électriques étant de 250 dollars par kWh correspondant à une fourchette de coût comprise entre 1 250 à 2 500 dollars pour une batterie de véhicule hybride rechargeable. Ce coût peut monter à plus de 10 000 dollars pour une batterie dédiée à un véhicule exclusivement électrique (10 à 50 kWh pour une autonomie de 200 à 300 km). Les questions de coût sont aussi à mettre en lien avec la problématique de la disponibilité des matériaux et notamment du lithium.

Outre le coût, il existe d'autres limites au développement du véhicule tout électrique liées à la batterie. Ces limites concernent le stockage de l'énergie et le problème de l'autonomie qui reste limitée puisque la durée de vie des batteries est limitée à environ trois ans après leur fabrication, ce qui correspond à environ 500 à 1000 cycles de charge. D'autre part, il faut aussi tenir compte du temps de charge des batteries sans commune mesure avec le temps nécessaire pour faire un plein de carburant.

D'autres freins sont liés aux infrastructures nécessaires à la recharge. Il s'agit d'une part des investissements attendus pour accélérer le développement généralisé des infrastructures nécessaires à la recharge, mais surtout de l'ajustement des capacités d'offre d'électricité à la demande future potentielle. On note pour finir, un frein lié aux conditions d'accompagnement du marché, les subventions publiques semblant en effet indispensables pour sécuriser l'essor du véhicule électrique.

2.3.4. Choix des scénarios avec déploiement technologique

Dans cette section nous proposons de confronter le scénario le plus optimiste de la catégorie des scénarios « intermédiaires », c'est-à-dire celui de [Depoorter et Assimon \(2011\)](#) à celui de [Duval-Destin \(2010\)](#), scénario le plus pessimiste de la classe de ceux dits « réservés ». Nous écartons d'office le scénario de [Wirmark et al. \(2006\)](#) réservé pour des travaux menés à l'échelle européenne.

Les scénarios choisis, nous permettent de conforter deux visions réalistes mais suffisamment divergentes pour apporter des exemples applicatifs donnant un aperçu des seuils supérieurs et inférieurs associés au développement de la motorisation thermique et hybride (ainsi que tout-électrique et PAC). Dans les faits on observe l'amorce d'un départ de diffusion des véhicules hybrides et électriques dans un scénario qui semble identique à celui de la diffusion du véhicule diesel du début des années 70. Une condition nécessaire, à la réalisation de l'objectif de

Depoorter et Assimon (2011) est la coordination des moyens industriels et politiques, en mobilisant la capacité des acteurs de la filière automobile en France à des initiatives politiques de développement durable. Concrètement, cette coordination de moyens a vu le jour avec la mise en place de plan « véhicule décarboné » soutenu par le Grenelle de l'Environnement. Ce plan ambitieux qui visait initialement 100 000 véhicules, a finalement abouti à 23 000 commandes fermes, dont 10 000 pour la Poste, passées en décembre 2011 à Renault et Peugeot. Le plan « véhicule décarboné » vise d'autre part l'objectif de 2 000 000 de véhicules hybrides et tout électriques.

3 Le parc automobile à l'horizon 2020 : scénario Depoorter et Assimon

Rappelons que le scénario de déploiement technologique retenu par Depoorter et Assimon (2011) est conçu sur la base de parts de marché estimées à 7,5% en 2016, 30% en 2020 et à 35% en 2025. Nous y ajoutons l'hypothèse d'une part de marché nulle en 2010. L'ajustement obtenu à partir d'une loi logistique sur les parts de marchés édictées nous fournit les résultats présentés dans le tableau 5-5. La représentation graphique de la loi donnée figure 5-6.

| Loi logistique | It | N | Alpha (α) | Beta (β) | Seuil de saturation | Intervalle de confiance de Alpha (α) à 95% | Intervalle de confiance de Beta(β) à 95% | Intervalle de confiance de S à 95% | R ² | Fisher |
|--|----|---|--------------------|------------------|---------------------|---|--|------------------------------------|----------------|--------|
| <i>Véhicules hybrides et électriques</i> | 15 | 4 | 0,7731 | 379,3 | 35,0005 | [0,6759 ; 0,8702] | [118,0 ; 640,6] | [33,827 ; 36,1734] | 0,99995 | 85573 |

Tableau 5- 5 Résultats des ajustements par une loi logistique des parts de marché des véhicules hybrides et électriques. A partir du scénario Depoorter et Assimon (2011)

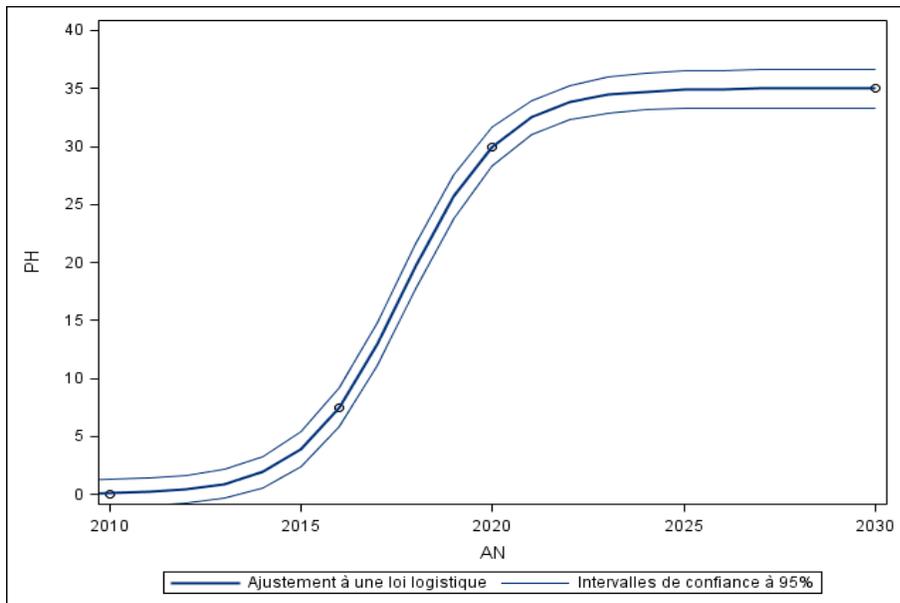


Figure 5- 6 Modèle logistique de projection de la part de marché (pourcentage des immatriculations totales) des véhicules à moteurs hybrides et électriques. Basé sur les hypothèses de Depoorter et Assimon

Les parts de marché projetées des véhicules essence et diesel sont obtenues à partir de l'hypothèse que ces derniers se développent en cédant à parts égales des parts de marché aux véhicules hybrides et électriques. En effet, nous ne pouvons être catégoriques pour le moment concernant les questions liées à l'arbitrage des parts de marchés respectives.

Les parts de marché respectives des véhicules diesel, essence et hybride (y compris tout électrique) sont représentées sur la figure 5-7.

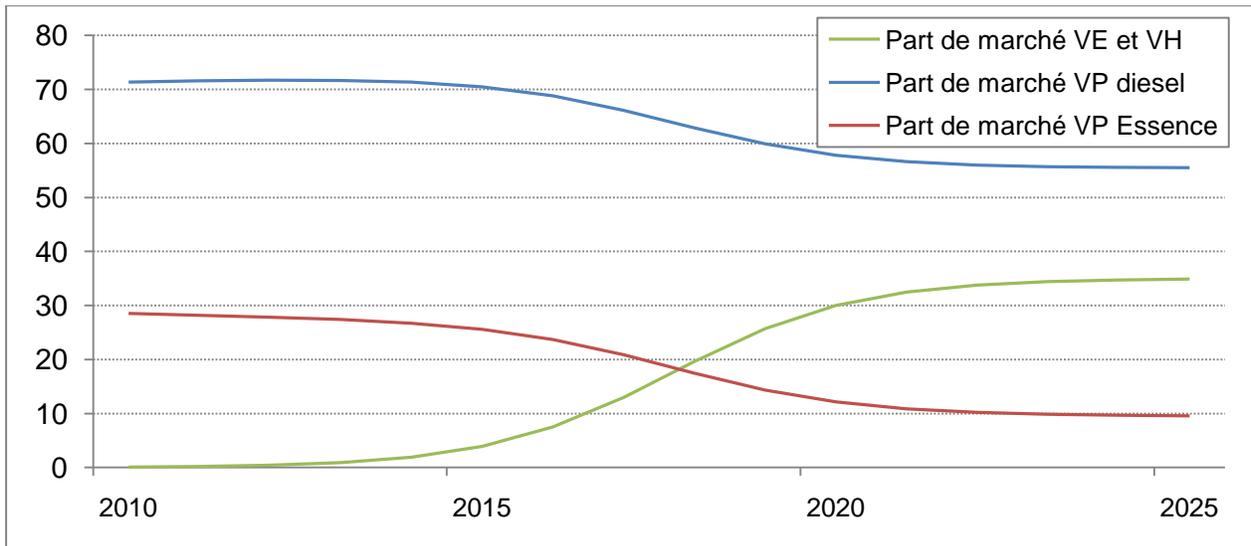


Figure 5- 7 Projection des parts de marchés des véhicules à moteurs hybrides et électriques.

Chapitre 5 Renouvellement, projection et impact environnemental du parc automobile

La durée de vie des véhicules hybrides n'étant pas connue, nous décidons de nous appuyer sur les estimations les plus récentes issues des ajustements sur les taux de survie transversaux de l'année 2008. Les paramètres de la loi de survie de Weibull de l'année 2008, tirés du tableau 4-3, sont présentés ci-dessous dans le tableau 5-6.

| Loi Weibull | Nb. Obs | Alpha (α) | Beta (β) | Intervalle de confiance de Alpha (α) à 95% | Intervalle de confiance de Beta (β) à 95% | R ² | Fisher |
|-------------|---------|--------------------|------------------|---|---|----------------|--------|
| Année 2008 | 28 | 2,636 | 15,142 | [2,433 ; 2,838] | [14,823 ; 15,460] | 0,99974 | 5061 |

Tableau 5- 6 Paramètres d'ajustement d'une loi de Weibull aux taux de survie transversaux pour l'année 2008.

Rappelons que la loi de survie de l'année 2008 se situe de manière logique à mi-chemin entre la loi de survie des deux motorisations thermiques (voir figure 5-8).

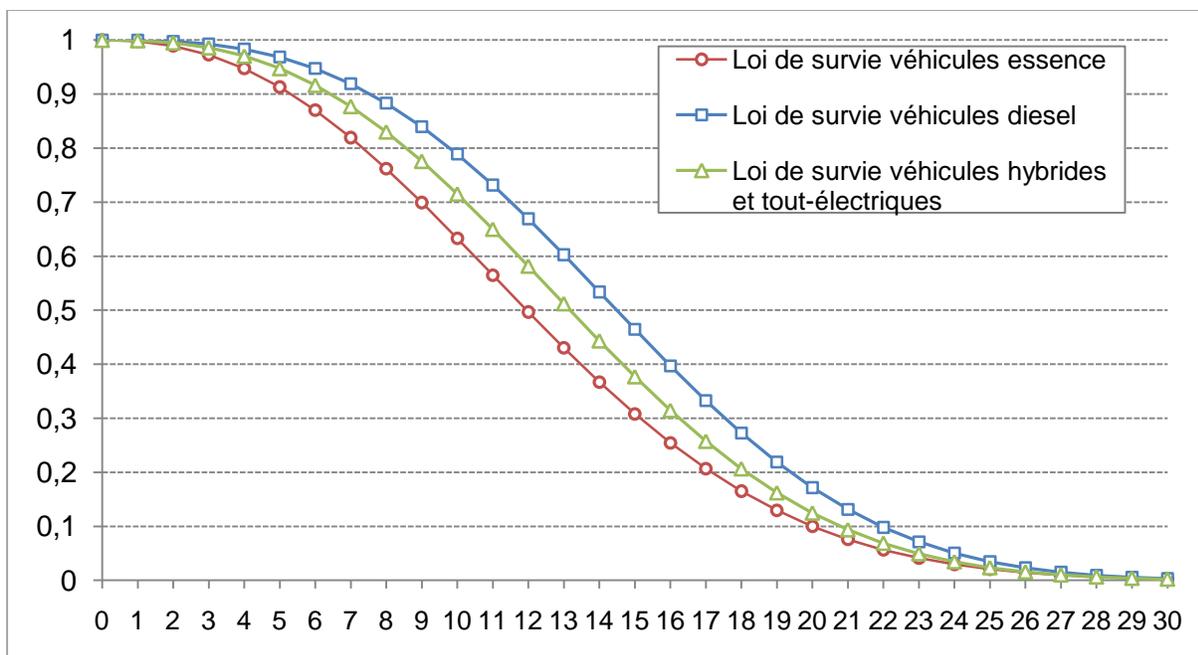


Figure 5- 8 Lois de survies utilisées pour les véhicules diesel essence et hybride (+ tout-électrique)

Les parts de marché ainsi que les lois de survie respectives sont des données suffisantes pour nous permettre de simuler le processus de renouvellement du parc automobile dans le cadre du scénario [Depoorter et Assimon \(2011\)](#). Comme dans le cas du scénario « sans rupture » il nous reste à formuler une hypothèse sur le volume des immatriculations annuelles entre 2010 et 2020. Nous reprenons les deux scénarios retenus pour le scénario « sans rupture »:

- Un scénario bas fondé sur un volume constant d'immatriculations annuel de véhicules neufs de 2 millions de véhicules.

Chapitre 5 Renouvellement, projection et impact environnemental du parc automobile

- Un scénario haut basé sur un volume constant d'immatriculation annuel de véhicules neufs de 2,1 millions de véhicules.

Les résultats de ces projections par type de scénario fournissent la structure annuelle du parc automobile par année de construction (voir tableau 5-7).

| Scénario | Motorisation | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|---------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Scénario Haut | Diesel | 379 | 414 | 446 | 472 | 489 | 491 | 471 | 426 | 363 | 301 | 256 |
| | Essence | 1 182 | 1 263 | 1 330 | 1 384 | 1 419 | 1 434 | 1 421 | 1 379 | 1 318 | 1 258 | 1 214 |
| | Hybride* | 1 | 3 | 7 | 17 | 37 | 78 | 153 | 269 | 411 | 540 | 630 |
| Scénario Bas | Diesel | 361 | 394 | 424 | 449 | 465 | 468 | 449 | 406 | 345 | 287 | 243 |
| | Essence | 1 126 | 1 202 | 1 267 | 1 318 | 1 352 | 1 366 | 1 353 | 1 313 | 1 255 | 1 198 | 1 157 |
| | Hybride* | 1 | 3 | 7 | 16 | 35 | 74 | 146 | 256 | 391 | 514 | 600 |

Tableau 5- 7 Projection de la structure annuelle du parc par type de motorisation et par année de construction (en milliers) à l'horizon 2020. Calcul basé sur l'hypothèse de déploiement Depoorter et Assimon (2011).

*y compris les véhicules tout-électriques

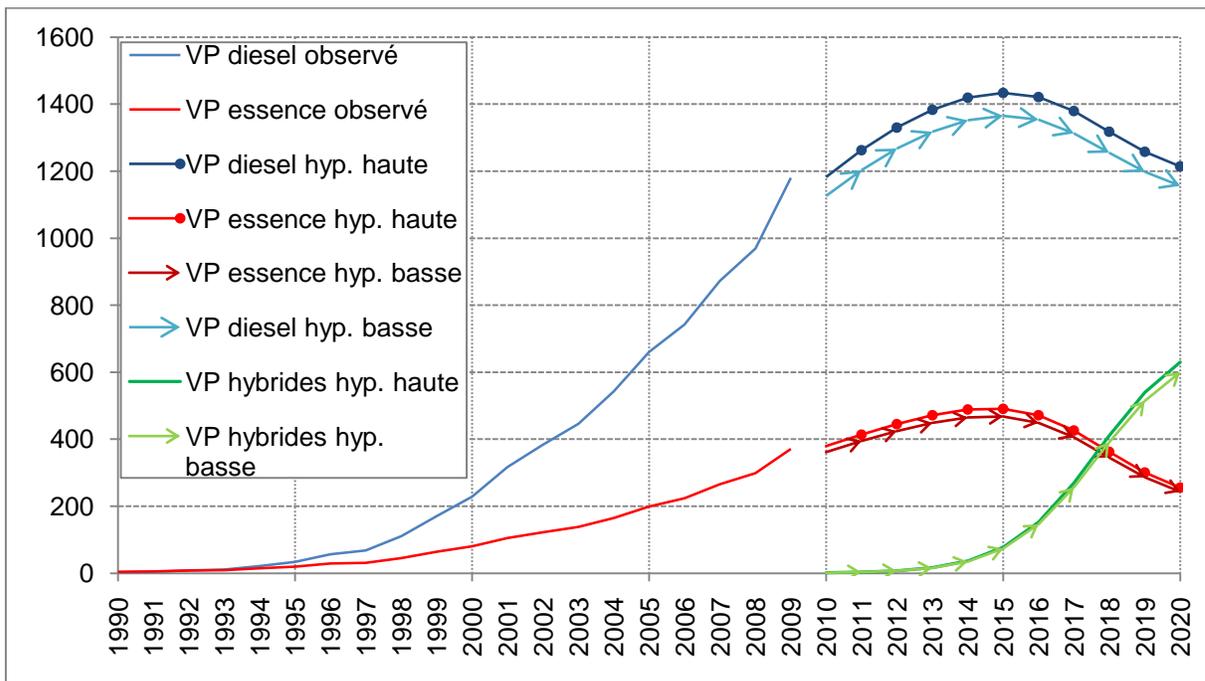


Figure 5- 9 Modèle de projection de la structure annuelle du parc par type de motorisation et par année de construction à l'horizon 2020. Basé sur l'hypothèse de déploiement Depoorter et Assimon

La figure 5-9 présente la structure du parc basée sur l'hypothèse de déploiement Depoorter et Assimon (2011) à l'horizon 2020 et sous les hypothèses formulées sur la durée de vie des véhicules particuliers. Cette figure permet d'illustrer une baisse des proportions de véhicules essence et diesel qui s'opère dès 2015. A partir de cette date, l'essor des véhicules hybrides (et électriques) semble modifier durablement la composition et la structure du parc. A l'horizon 2020, nos estimations montrent que le parc serait composé de près de 2 147 000 véhicules hybrides et électriques selon l'hypothèse haute. En considérant l'hypothèse basse ce chiffre

passé à 2 045 000 véhicules. Le nombre d'immatriculations de véhicules hybrides et électriques, à l'horizon 2020, est respectivement estimé à 630 000 véhicules selon l'hypothèse haute et à 600 000 selon l'hypothèse basse (voir tableau 5-7).

4 Le parc automobile à l'horizon 2020 : scénario Duval-Destin

Le scénario de déploiement technologique émis par Duval-Destin (2010) est conçu sur la base d'une part de marché des véhicules hybrides, tout électriques et PAC égale à 10% en 2020. Cette hypothèse n'est pas suffisante pour permettre d'ajuster une loi logistique sur la part des véhicules hybrides, électriques et PAC. Nous décidons d'ajouter quelques points remarquables intermédiaires bien choisis à ce scénario. Les hypothèses de déploiement ajoutées correspondent à une part de marché nulle en 2010, et égale à 2,5 ; 10 ; 17,5 et 20 aux horizons respectifs de 2015, 2020, 2025 et 2030. Les hypothèses ajoutées au scénario Duval-Destin (2010) (au nombre de 4) nous permettent d'obtenir un ajustement satisfaisant, bien que l'intervalle de confiance de Wald soit assez relâché. Le résultat de cet ajustement est fourni dans le tableau 5-8. La représentation graphique de la loi logistique associée est donnée par la figure 5-10.

| Loi logistique | It | N | Alpha (α) | Beta (β) | Seuil de saturation | Intervalle de confiance de Alpha (α) à 95% | Intervalle de confiance de Beta(β) à 95% | Intervalle de confiance de S à 95% | R ² | Fisher |
|-----------------------|----|---|--------------------|------------------|---------------------|---|--|------------------------------------|----------------|--------|
| Véhicules hybrides* | 10 | 5 | 0,7731 | 379,3 | 35,0005 | [0,6759 ; 0,8702] | [118,0 ; 640,6] | [33,827 ; 36,1734] | 0,99995 | 85573 |

Tableau 5- 8 Résultats des ajustements par une loi logistique des parts de marché des véhicules hybrides et électriques. Basé sur le scénario Duval-Destin (2010) modifié.

*y compris tout-électriques et PAC

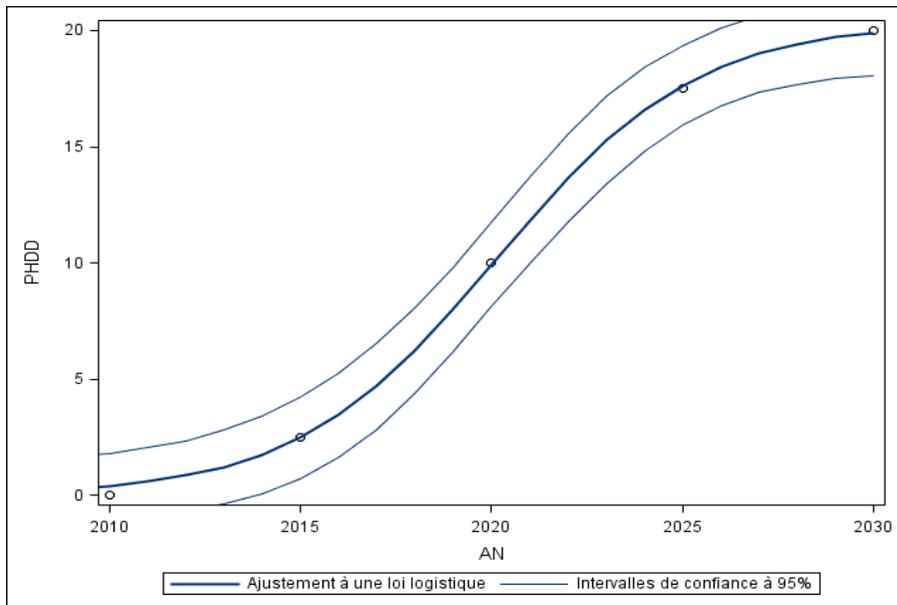


Figure 5- 10 Modèle logistique de projection de la part de marché (pourcentage des immatriculations totales) des véhicules à moteurs hybrides et électriques. Basé sur les valeurs Duval-Destin

De la même manière que pour le scénario [Depoorter et Assimon \(2011\)](#), les parts de marché des véhicules à moteur essence et diesel se développent, par hypothèse, en cédant à proportions égales leurs parts de marchés respectives aux véhicules hybrides, électriques et PAC. Les parts de marché respectives des véhicules diesel, essence et hybrides (y compris tout-électriques et PAC) sont représentées sur la figure 5-11.

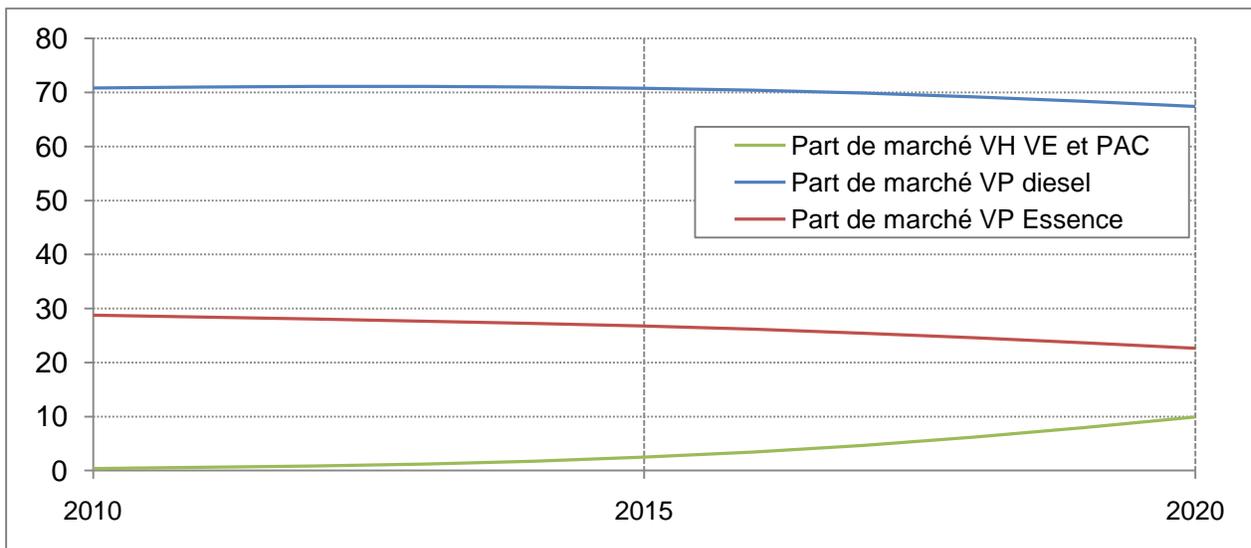


Figure 5- 11 Projection des parts de marchés des véhicules à moteurs thermiques et hybrides (y compris tout-électriques et PAC).

Nos hypothèses concernant la durée de vie des différentes catégories de véhicules s'appuient sur les mêmes hypothèses que celles formulées pour la projection de la structure de parc obtenu par le scénario [Depoorter et Assimon \(2011\)](#). D'autre part, nous effectuons les

Chapitre 5 Renouvellement, projection et impact environnemental du parc automobile

projections de la structure de parc (voir tableau 5-9) à l'aide des mêmes hypothèses (basse et haute) sur le volume des immatriculations annuelles entre 2010 et 2020.

| Scénario | Motorisation | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|---------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Scénario Haut | Diesel | 383 | 417 | 449 | 476 | 498 | 513 | 520 | 520 | 511 | 496 | 476 |
| | Essence | 1 173 | 1 252 | 1 319 | 1 373 | 1 413 | 1 440 | 1 454 | 1 457 | 1 449 | 1 435 | 1 416 |
| | Hybride* | 0 | 10 | 15 | 23 | 34 | 49 | 70 | 97 | 130 | 168 | 208 |
| Scénario Bas | Diesel | 364 | 397 | 427 | 453 | 474 | 488 | 496 | 495 | 487 | 472 | 453 |
| | Essence | 1 117 | 1 192 | 1 256 | 1 307 | 1 346 | 1 371 | 1 385 | 1 387 | 1 380 | 1 367 | 1 349 |
| | Hybride* | 0 | 9 | 14 | 21 | 32 | 47 | 67 | 92 | 124 | 160 | 198 |

Tableau 5- 9 Projection de la structure annuelle du parc par type de motorisation et par année de construction (en milliers) à l'horizon 2020. Basé sur l'hypothèse de déploiement Duval-Destin (2010) modifiée. *y compris les véhicules tout-électriques et PAC

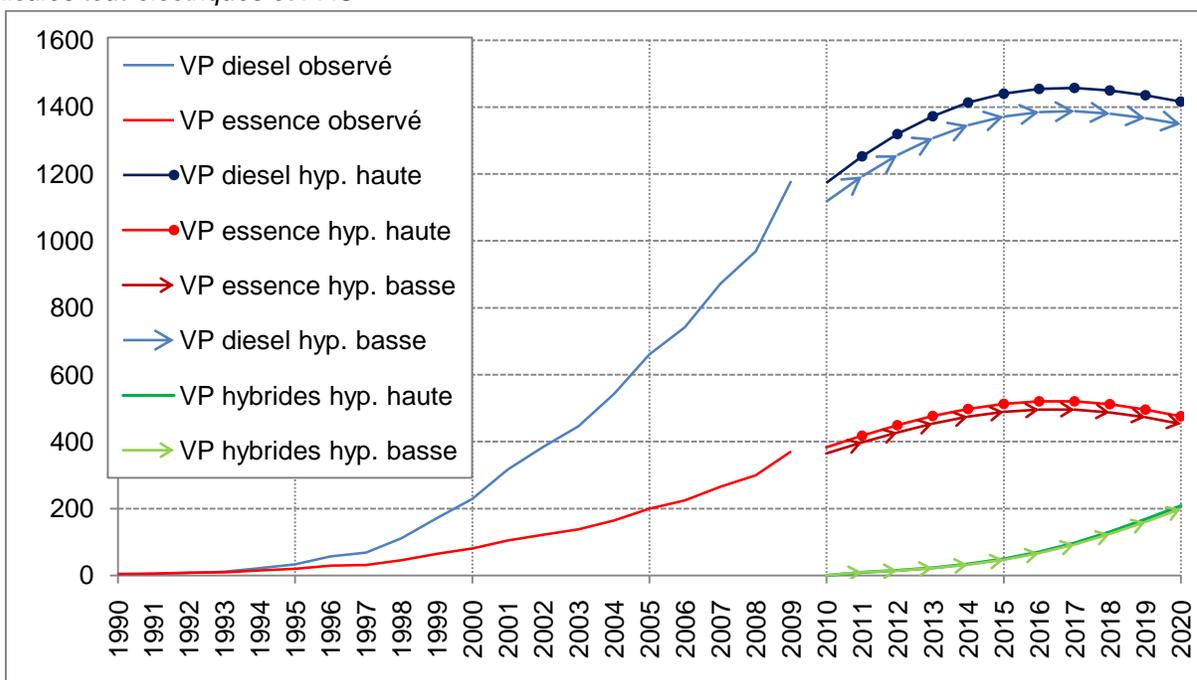


Figure 5- 12 Modèle de projection de la structure annuelle du parc en milliers de véhicules par type de motorisation et par année de construction à l'horizon 2020. Selon l'hypothèse de déploiement Duval-Destin

La figure 5-12 présente la structure du parc projetée en 2020 donnée par année modèle. Cette structure est construite selon nos hypothèses de durée de vie et d'un déploiement technologique suivant l'hypothèse de [Duval-Destin \(2010\)](#), à laquelle nous avons ajouté quelques observations intermédiaires afin de se conformer à notre ajustement par une loi logistique. Cette figure permet d'illustrer le fléchissement qui semble s'opérer dès 2018 sur les proportions de véhicules essence et diesel sous le coup du déclassement et de la baisse des parts de marchés de ces véhicules à moteur thermique, profitant ainsi aux véhicules hybrides, tout-électriques et PAC.

A l'horizon 2020, selon l'hypothèse haute, on estime à 803 000 le nombre de véhicules à motorisations alternatives (hybrides, électrique et PAC) présents au sein du parc automobile. Selon l'hypothèse basse, ce chiffre passe à 765 000 véhicules. Le nombre d'immatriculations de véhicules hybrides (y compris tout électrique et PAC) est estimé pour 2020 à 208 000 véhicules selon l'hypothèse haute et à 198 000 unités selon l'hypothèse basse (voir tableau 5-9).

5. Comparaison des scénarios de Depoorter et Assimon et de Duval-Destin

Cette section est destinée à comparer nos deux structures du parc obtenues précédemment en émettant des hypothèses de déclassement suivant des lois de survie de Weibull sur des schémas de déploiements technologiques tirés des hypothèses de [Depoorter et Assimon \(2011\)](#) et de [Duval-Destin \(2010\)](#). Pour se rapprocher un peu plus des statistiques de volume du parc obtenu par [Bourdeau \(1998\)](#) et [Hugrel et Joumard \(2004\)](#), nous resterons sur les scénarios hauts d'immatriculations (2,1 millions de véhicules particuliers immatriculés par an). Nos projections montrent en particulier que les motorisations thermiques resteront dominantes à horizon 2020 selon les deux scénarios précités.

Nous avons écarté le scénario « sans rupture » qui nous semble fortement improbable aux vues des tendances d'équipement actuellement observées, puisque des changements significatifs sont déjà perceptibles dans les comportements d'achat des automobilistes qui se tournent progressivement vers les véhicules hybrides et tout-électriques. Selon le [CCFA \(2011\)](#) sur dix mois en 2011, les ventes de véhicules hybrides ont atteint 10 563 unités (dont 1 304 en octobre). D'autre part, entre le début 2011 et octobre 2011, les immatriculations de véhicules électriques ont plus que triplé, à 2 788 unités, dont 1 634 voitures particulières, 949 véhicules utilitaires et 205 quadricycles.

5.1 Structure du parc par type d'énergies selon le scénario Depoorter et Assimon

Notre parc projeté en recourant aux hypothèses de déploiement de [Depoorter et Assimon \(2011\)](#) affiche une structure largement dominée par les véhicules à moteur diesel. Ces derniers représenteront près de 70,8% du parc en 2020. Selon ce même scénario, les véhicules à moteur à moteur essence et hybrides représenteront respectivement 22,1% et 7,1% du parc en 2020 (voir figure 5-13). Une comparaison sommaire de l'électrification du parc (déploiement de véhicules hybrides et tout-électriques) au processus de diésélisation, nous enseigne que la proportion de véhicules hybrides estimée à l'horizon 2020 est presque deux fois plus importante que celle des véhicules à moteur diesel, estimée à 3,9%, pour la même phase de maturation en 1980 (soit environ dix années après leur mise en service). Cette comparaison doit cependant être relativisée par les différences techniques qui ont longtemps désavantagé les moteurs diesel

Chapitre 5 Renouvellement, projection et impact environnemental du parc automobile

face aux essences. Il aura fallu attendre plus de 15 ans pour voir se systématiser les turbos et le remplacement progressif du carburateur par les systèmes à injection qui ont permis le rattrapage technologique du moteur diesel sur le moteur essence (voir chapitre section 1.1.1 p. 104 pour plus de détails).

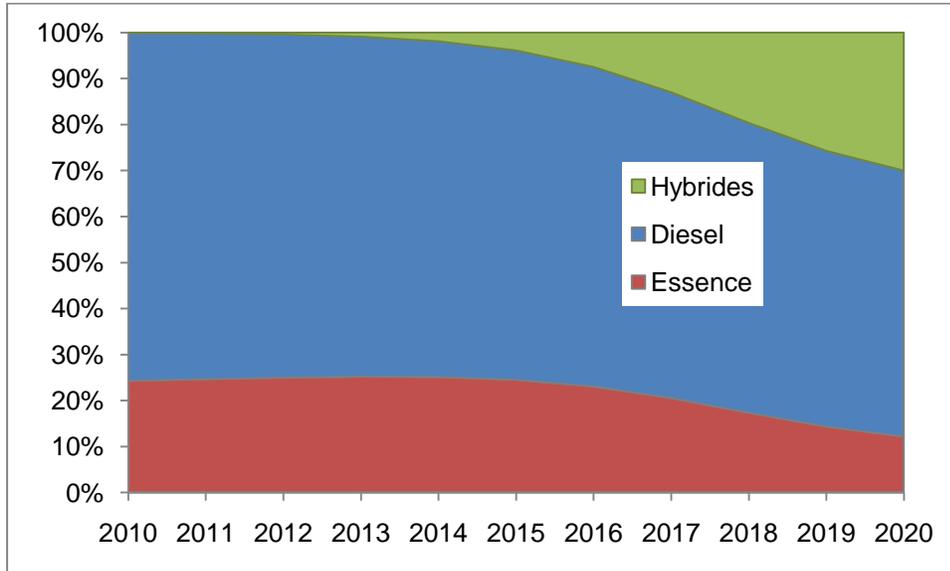


Figure 5- 13 Projection de la distribution annuelle du parc par type de motorisation à l'horizon 2020. Basé sur l'hypothèse de déploiement Depoorter et Assimon

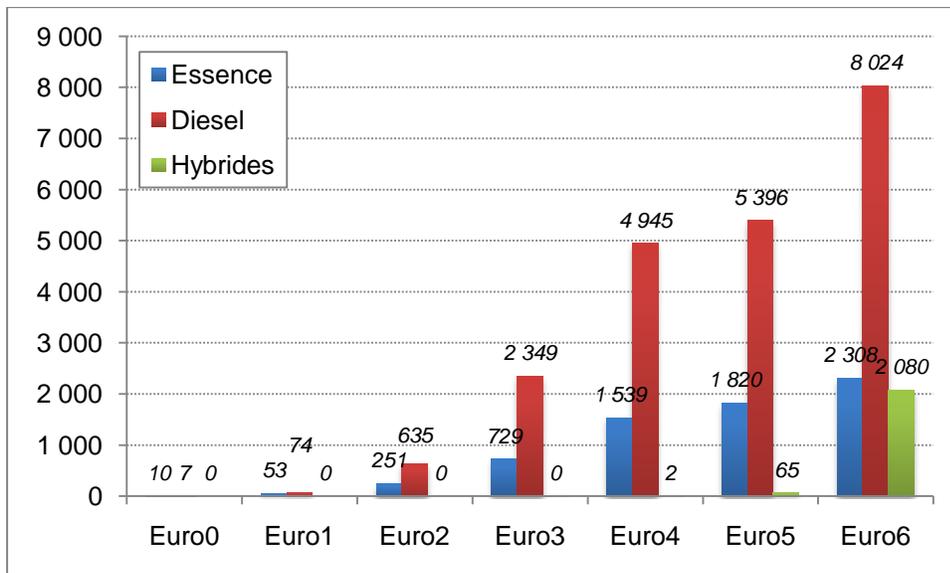


Figure 5- 14 Projection de la structure du parc en milliers de véhicules par type de motorisation et par catégories Euro à l'horizon 2020. Selon l'hypothèse de déploiement Depoorter et Assimon.

Hybrides : y compris véhicules tout-électriques

La figure 5-14 illustre la composition du parc par catégorie de normes Euros et par type de motorisation. On constate qu'étant donné la vitesse de renouvellement, les véhicules antérieurs à la norme Euro 1 sont en faible proportion. A l'inverse, les véhicules labellisés Euros 6, sont

majoritaires avec près de 12,3 millions de représentants. Concernant la ventilation par type de motorisation à l'intérieur de la catégorie de véhicule Euro 6, on note près de 2,1 millions (16,8%) de véhicules hybrides et électriques, 8 millions (64,6%) de véhicules à moteur diesel et 2,3 millions (18,6%) de véhicules à moteur essence.

5.2 Structure du parc par type d'énergies selon le scénario Duval-Destin

En se basant sur les hypothèses du scénario de déploiement technologique [Duval-Destin \(2010\)](#) qui concerne les véhicules hybrides, tout-électriques et PAC, la proportion de véhicules hybrides présente dans le parc est estimée à 2,7% pour 2020. Pour le même horizon, la proportion de véhicules thermiques est estimée à 97,3% dont 72,6% de véhicules à moteur diesel et 24,7% de véhicules à moteur essence (voir figure 5-15).

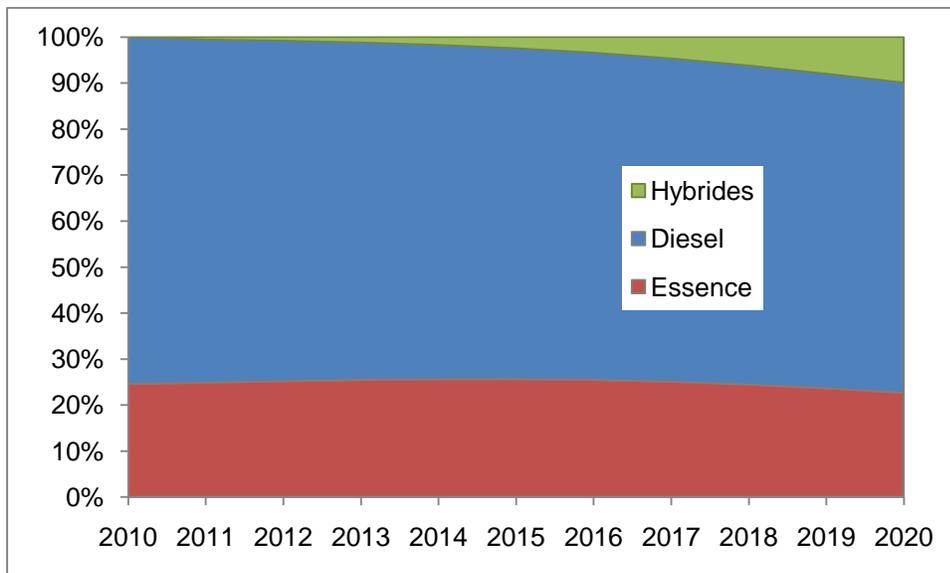


Figure 5- 15 Projection de la distribution annuelle du parc par type de motorisation à l'horizon 2020. Selon l'hypothèse de déploiement Duval-Destin modifiée.

Hybrides : y compris véhicules tout-électriques et PAC

La projection de la part de véhicules hybrides, tout-électriques et PAC à l'horizon 2020 se situe bien en retrait de celle obtenue à partir du scénario [Depoorter et Assimon \(2011\)](#). Elle est en effet plus de 2,5 fois moins élevée que cette dernière. On note d'autre part que la prévision obtenue en s'appuyant sur le scénario [Duval-Destin \(2010\)](#) se situe plus d'un point derrière le déploiement associé à la diésélisation du parc en 1980 estimée à 3,9%. La faible proportion de véhicules hybrides, s'explique par des prévisions de mise sur le marché de véhicules à moteur thermiques à faible niveaux de consommation dont le coût restera attractif face à la nouvelle concurrence hybride, tout-électrique ou PAC. Les constructeurs prévoient en effet la mise en service des moteurs HCCI diesel et CAI pour l'essence à haut rendement énergétique.

En outre un développement marqué des biocarburants pourrait concurrencer les véhicules tout-électriques et PAC. Ce scénario est d'ailleurs défendu par l'ACEA pour une échéance fixée à 2020.

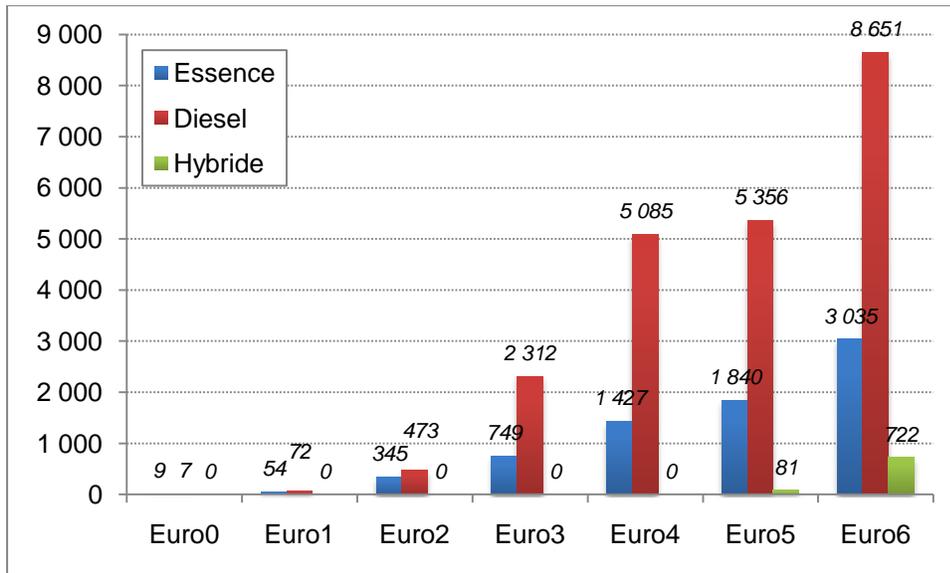


Figure 5- 16 Projection de la structure du parc en milliers de véhicules par type de motorisation et par catégories Euros à l'horizon 2020. Basé sur l'hypothèse de déploiement Duval-Destin modifiée.
Hybrides : y compris véhicules tout-électriques et PAC

La figure 5-16 illustre la composition du parc par catégorie de normes Euros et par type de motorisation. Les véhicules labellisés Euros 6 sont majoritaires avec près de 12,4 millions d'unités, ce qui représente 41% du parc estimé en 2020. Concernant la ventilation par type de motorisation à l'intérieur de la catégorie de véhicule Euro 6, on note près de 0,69 million (5,8%) de véhicules hybrides et électriques, 8,2 millions (69,7%) de véhicules à moteur diesel et 2,9 millions (24,5%) de véhicules à moteur essence. Une comparaison de cette structure du parc avec celle issue des hypothèses [Depoorter et Assimon \(2011\)](#) montre que le nombre de véhicules hybrides et électriques labellisés Euro 6 est plus de trois fois moins élevé. En outre, quel que soit le scénario de référence, l'hybridation et l'électrification du parc ne prennent leur essor qu'après 2015, retardant donc la croissance de leurs parts de marché respectives.

6. Inventaires d'émissions du parc automobile à l'horizon 2020

Le parc détaillé par type d'énergie dont nous disposons n'est pas suffisamment désagrégé pour permettre la réalisation d'un inventaire national d'émissions. Cet inventaire, est réalisé à l'aide du logiciel COPERT IV⁶⁹ (COmputer Programm to calculate Emissions from Road Transport) développé par le Laboratoire de Thermodynamique Appliqué (LAT) de l'Université Aristotle (Thessalonique). Ce logiciel est fondé sur le modèle [MEET \(1999\)](#) développé dans le cadre de

⁶⁹ Version V8 mise à jour en octobre 2010.

travaux européens. Le logiciel COPERT requiert l'entrée d'un nombre important de données afin de pouvoir estimer les émissions de polluants sur la base d'une structure de parc projetée à l'horizon 2020 qui différencie les véhicules par catégorie de cylindrées (<1,4L ; 1,4-2,0L ; >2,0L), d'énergie (diesel, essence et hybrides) et de normes Euros. Nous ferons ainsi l'hypothèse que toutes nos catégories de véhicules hybrides ne contiennent aucun véhicule tout électrique ou PAC. Nous devons aussi, émettre des hypothèses sur l'usage annuel (kilométrage annuel) des véhicules pour chaque couple énergie-catégorie de cylindrées et de répartition par voirie. Les réglementations futures considérées sont les normes Euro 5 et Euro 6 qui prennent respectivement effet dès 2011 et 2015. Les facteurs d'émissions associés aux normes Euros 5 et 6 sont obtenus en appliquant un coefficient de réduction sur les facteurs datant de 1996 [MEET, 1999 ; Hugrel et Joumard, 2004].

6.1 Structure du parc automobile par énergie et catégorie de cylindrées à l'horizon 2020

Pour estimer une structure du parc par sous-catégories de cylindrées pour chaque catégorie de motorisation, nous disposons de statistiques issues du FCA concernant la ventilation des ventes par couples d'énergie et catégories de cylindrées pour les années 2003 à 2007. A partir de ces répartitions, obtenues sur 5 années nous extrapolons les distributions passées et futures des différents groupes de cylindrées (<1,4L ; 1,4-2,0L ; >2,0L) pour les motorisations essence et diesel en effectuant des régressions linéaires. Les équations de ces régressions sont fournies dans les différentes figures (5-17 pour les véhicules à moteur essence et 5-18 pour les véhicules roulant au gazole). Pour ce qui est des véhicules hybrides et électriques aux vu de la grande volatilité des répartitions sur la période 2003 à 2007, nous avons décidé d'attribuer la valeur moyenne de la période. Nous supposerons par ailleurs que cette dernière est constante dans le temps.

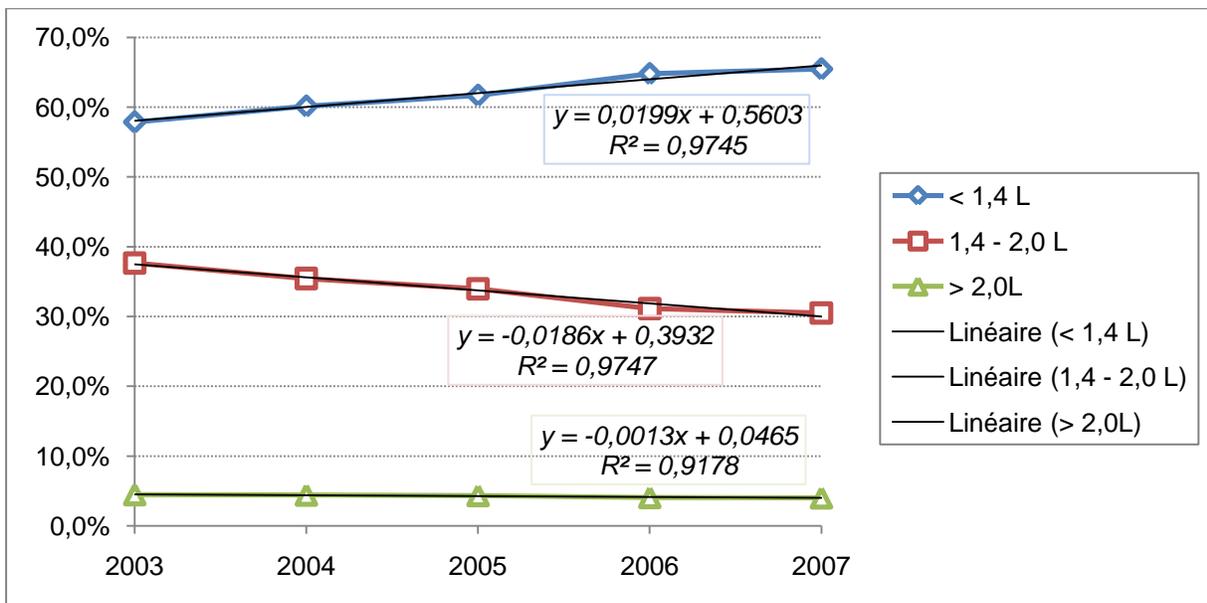


Figure 5- 17 Ventilation de la structure des ventes de véhicules à moteur essence par catégories de cylindrée entre 2003 et 2007. Source : FCA, SOeS.

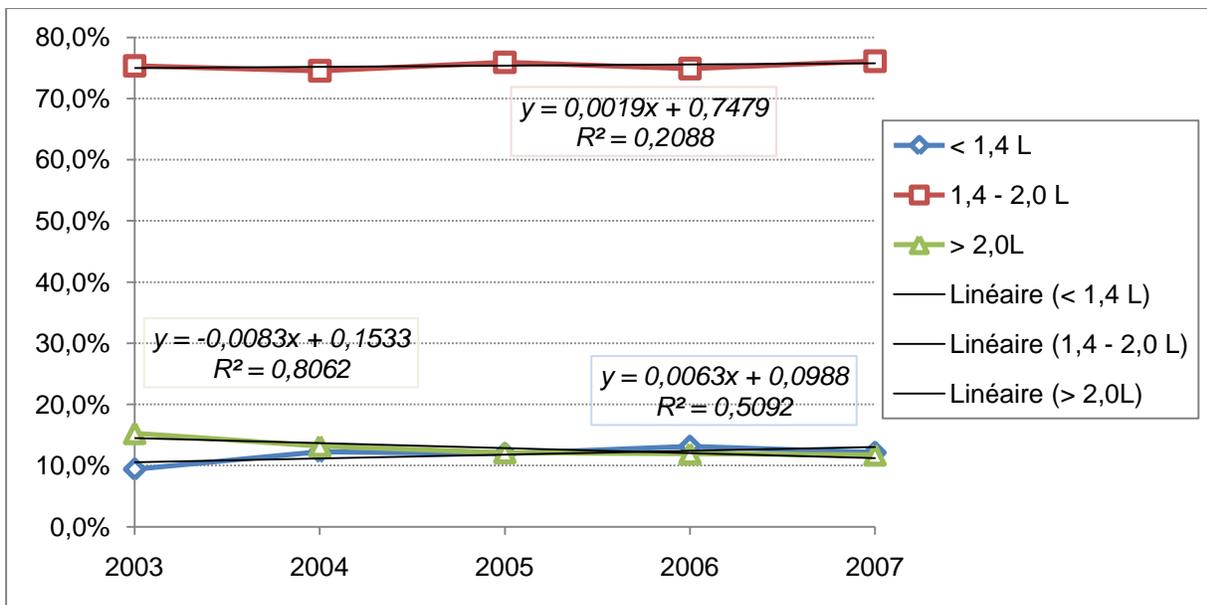


Figure 5- 18 Ventilation de la structure des ventes de véhicules à moteur diesel par catégories de cylindrée entre 2003 et 2007. Source : FCA, SOeS.

| Catégories COPERT | | 1990 | 2000 | 2010 | 2020 |
|-------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|
| E1 | Essence <1,4 | 32,2% | 52,1% | 72,0% | 91,9% |
| E2 | Essence 1,4-2,0L | 61,6% | 43,0% | 24,4% | 5,8% |
| E3 | Essence >2,0L | 6,2% | 4,9% | 3,6% | 2,3% |
| D1 | Diesel <1,4 | 2,3% | 8,6% | 14,9% | 21,2% |
| D2 | Diesel 1,4-2,0L | 72,5% | 74,4% | 76,3% | 78,2% |
| D3 | Diesel >2,0L | 25,2% | 17,0% | 8,8% | 0,6% |
| H1 | Hybrides<1,4 | // | // | 6,8% | 6,8% |
| H2 | Hybrides 1,4-2,0L | // | // | 59,9% | 59,9% |
| H3 | Hybrides >2,0L | // | // | 33,4% | 33,4% |

Tableau 5- 10 Parts de marché des véhicules pour chaque motorisation par année de construction et par groupes de cylindrées.

Les parts de marché annuelles estimées pour la période 1990 à 2020 (voir tableau 5-10 pour les années remarquables 1990, 2000, 2010 et 2020), nous permettent de modéliser les structures annuelles de parc basées sur nos deux scénarios retenus (selon les hypothèses hautes d'immatriculations annuelles). Nous émettons ainsi l'hypothèse simplificatrice d'une loi de survie identique pour chaque sous-catégorie de cylindrée à l'intérieur de chaque catégorie d'énergie⁷⁰.

6.1.1 Structure du parc automobile par énergie et catégorie de cylindrée à l'horizon 2020 basée sur le scénario de déploiement Depoorter et Assimon

La répartition du parc envisagée à l'horizon 2020 reposant sur le rythme de déploiement par catégories COPERT (E1, E2, E3 ; D1, D2, D3 ; H1, H2, H3) est fournie dans le tableau 5-11. La ventilation estimée pour 2020 laisse transparaître une présence majoritaire de véhicules à moteur diesel de cylindrée comprise entre 1400 et 2000 cm³. D'après les projections, la proportion de véhicules diesel de la catégorie D2 représentera plus de 54% du volume parc. Les petites cylindrées essence et diesels devraient représenter à l'horizon 2020 respectivement 16,6% et 11,4% du parc automobile.

D'autre part, selon nos hypothèses, les véhicules essence de grosse cylindrée sont, pour le même horizon, en très large minorité dans le parc (0,8%). Les véhicules hybrides de cylindrée moyenne seront en pleine phase d'ascension avec près de 4% du volume total du parc. Nous pouvons aussi observer que les véhicules à moteur hybride à grosse cylindrée sont près de cinq fois plus nombreux que leurs homologues de faible cylindrée. On peut en effet conjecturer un report substantiel des grosses cylindrées à moteur essence et diesel vers des motorisations hybrides à mêmes caractéristiques intrinsèques et donc à puissance et cylindrée équivalentes.

⁷⁰ Rappelons tout de même que Bourdeau (1998), Lacour et Joumard (2002) puis Hugrel et Joumard (2004) avaient utilisé des lois de survie différenciées par gammes de véhicules en assumant l'hypothèse d'une analogie entre les catégories de cylindrées et les gammes de véhicules (basse, moyenne et haute). Les paramètres de ces lois par types de gammes avaient été estimés par Gallez (1994a).

| Catégories COPERT | Caractéristiques | Répartition du parc en 2020 |
|-------------------|-------------------|-----------------------------|
| E1 | Essence <1,4 | 16,6% |
| E2 | Essence 1,4-2,0L | 4,8% |
| E3 | Essence >2,0L | 0,8% |
| D1 | Diesel <1,4 | 11,4% |
| D2 | Diesel 1,4-2,0L | 54,2% |
| D3 | Diesel >2,0L | 5,1% |
| H1 | Hybrides<1,4 | 0,5% |
| H2 | Hybrides 1,4-2,0L | 4,2% |
| H3 | Hybrides >2,0L | 2,4% |

Tableau 5- 11 Répartition du parc automobile selon l'énergie et la cylindrée à l'horizon 2020. Basé sur les hypothèses de déploiement Depoorter et Assimon.

Les figures 5-19, 5-20 et 5-21 nous permettent d'illustrer les répartitions en volumes de véhicules suivant les années de construction pour chaque catégorie COPERT (E1 à H3) à l'horizon 2020. Nos projections sous hypothèses de déploiement de [Depoorter et Assimon \(2011\)](#) montrent que la répartition par année modèle du volume des véhicules à moteur essence de petites cylindrées est amenée à décroître dès 2015. Cette dernière passant ainsi de 402 000 unités en 2015 à 235 000 unités en 2020. Le volume de véhicules des groupes E2 et E3 (essence de moyennes et grandes cylindrées) présents dans le parc diminuent progressivement avec les années modèles dès 2010-2015 (voir figure 5-19).

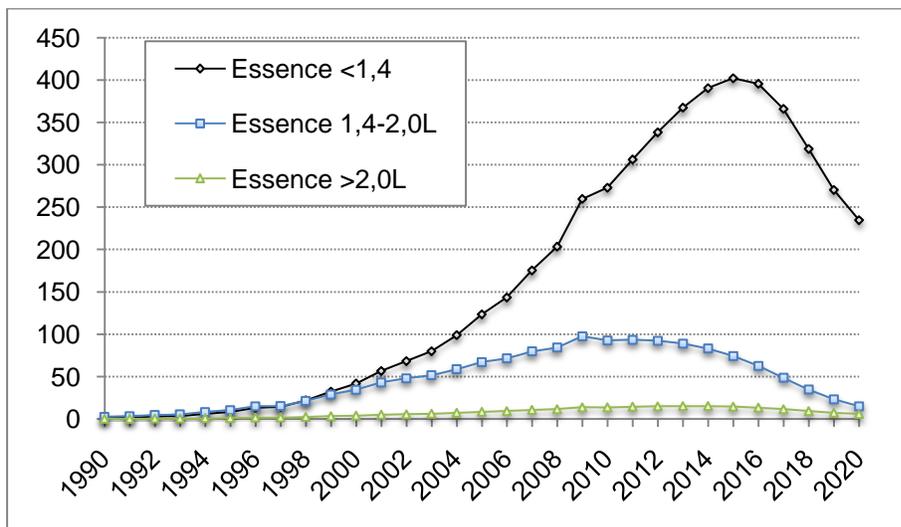


Figure 5- 19 Répartition du volume du parc de véhicules à moteur essence par année de construction selon 3 catégories de cylindrées à l'horizon 2020. Basé sur les hypothèses de déploiement Depoorter et Assimon.

La figure 5-20 nous permet d'illustrer la baisse du volume en fonction des années modèles des véhicules appartenant aux groupes D2 et D3 (diesel de cylindrées intermédiaires et supérieures). Ces baisses interviennent respectivement en 2015 pour le groupe D2 et dès 2010 pour le groupe D3. Enfin, pour la catégorie de cylindrée inférieure on observe une stabilité des

proportions par année de construction s'établissant autour de 260 000 véhicules entre 2014 et 2020.

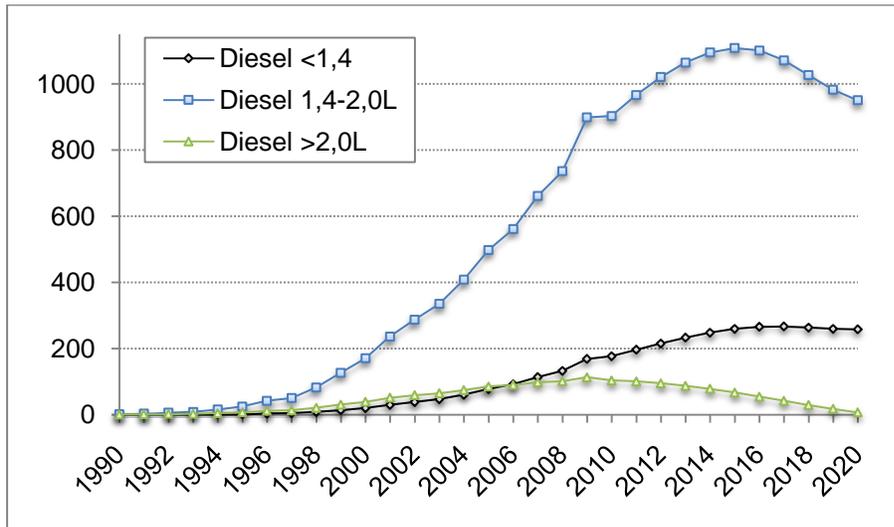


Figure 5- 20 Répartition du volume du parc de véhicules à moteur essence par année de construction selon 3 catégories de cylindrées à l'horizon 2020. Basé sur les hypothèses de déploiement Depoorter et Assimon.

On observe une hausse du volume de véhicules hybride par année de construction pour toutes les catégories de cylindrées. Cette hausse est plus marquée pour les véhicules hybrides de cylindrée intermédiaire.

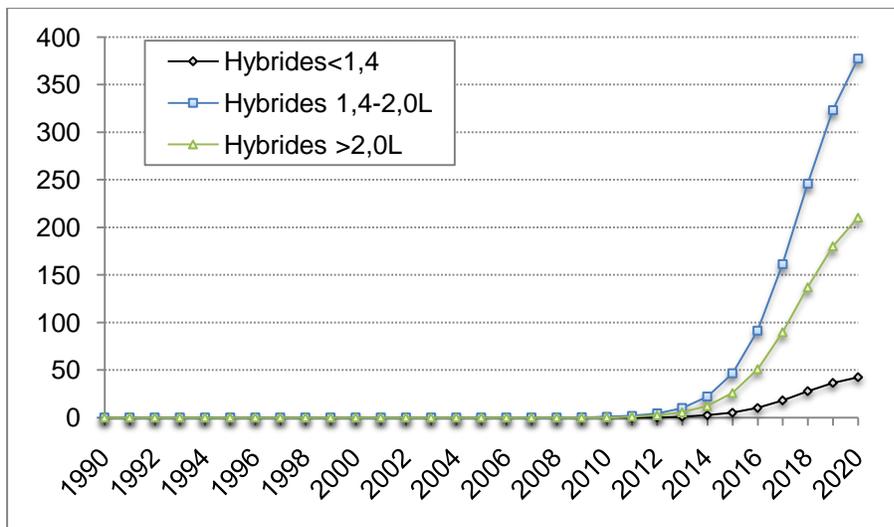


Figure 5- 21 Répartition du volume du parc de véhicules à moteur hybrides par année de construction selon 3 catégories de cylindrées à l'horizon 2020. Basé sur les hypothèses de déploiement Depoorter et Assimon.

6.1.2 Structure du parc automobile par énergie et catégorie de cylindrée à l'horizon 2020 basée sur le scénario de déploiement Duval-Destin

Les résultats des projections de la structure de parc sont globalement similaires à ceux estimés en s'appuyant sur les hypothèses de déploiement technologique formulées par Depoorter et

Chapitre 5 Renouvellement, projection et impact environnemental du parc automobile

Assimon (2011). Certaines différences sont à noter telles que les proportions de véhicules essence de petite cylindrée, ici, supérieures d'environ 2 points ou encore la catégorie des véhicules diesel de cylindrée intermédiaire qui gagne près de 1,5 point.

D'autre part les proportions de véhicules hybrides projetées à l'horizon 2020 à partir des hypothèses (modifiées) de Duval-Destin (2010) sont, pour chaque catégorie COPERT, plus de 2,5 fois inférieures aux prévisions fondées sur les hypothèses de Depoorter et Assimon (2011).

| Catégories COPERT | Caractéristiques | Répartition du parc en 2020 |
|-------------------|-------------------|-----------------------------|
| E1 | Essence <1,4 | 18,7% |
| E2 | Essence 1,4-2,0L | 5,1% |
| E3 | Essence >2,0L | 0,8% |
| D1 | Diesel <1,4 | 11,8% |
| D2 | Diesel 1,4-2,0L | 55,7% |
| D3 | Diesel >2,0L | 5,1% |
| H1 | Hybrides <1,4 | 0,2% |
| H2 | Hybrides 1,4-2,0L | 1,6% |
| H3 | Hybrides >2,0L | 0,9% |

Tableau 5- 12 Répartition du parc automobile selon l'énergie et la cylindrée à l'horizon 2020. Basé sur les hypothèses de déploiement Duval-Destin.

Ici encore, les figures 5-22, 5-23 et 5-24 illustrent les prévisions d'évolution de la structure du parc à l'horizon 2020 par années de construction et selon les différentes catégories COPERT. Nos projections fondées sur les hypothèses de déploiement de Duval-Destin (2010) montrent que la répartition en volume des véhicules essence de petites cylindrées par année de construction est amenée à décroître dès 2018 en passant de 449 000 à 436 000 unités en 2020. Nos projections de la répartition par année de construction du volume des véhicules essence de grande cylindrée subsistant dans le parc en 2020 atteint son apogée pour les véhicules construits en 2009 qui seront près de 98 0000 véhicules dans le parc en 2020 contre seulement 11 000 unités immatriculées en 2020 (voir figure 5-22).

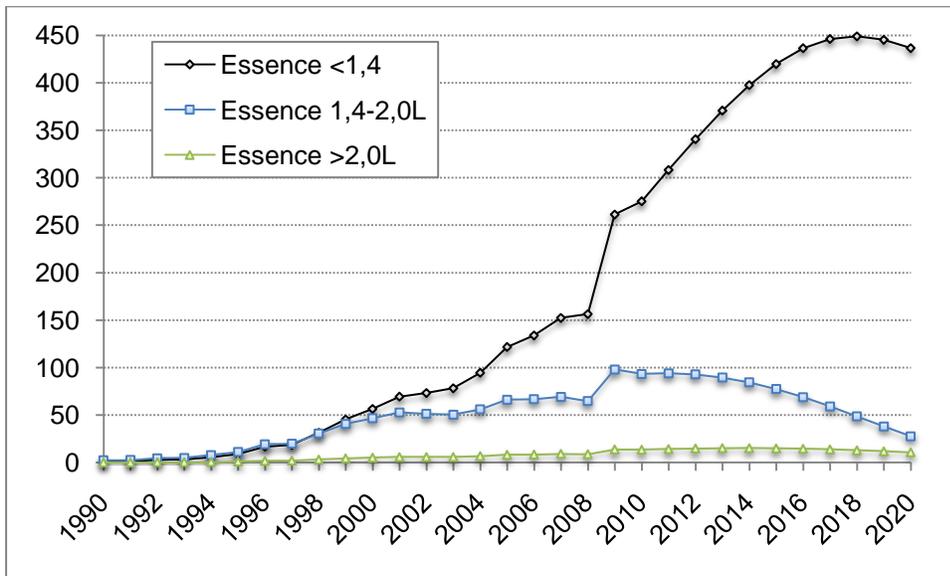


Figure 5- 22 Répartition du volume du parc de véhicules à moteur essence par année de construction selon 3 catégories de cylindrées à l'horizon 2020. Basé sur les hypothèses de déploiement Duval-Destin.

La figure 5-23 nous permet d'illustrer la trajectoire des courbes de répartition par année de construction du volume des véhicules diesel par catégories de cylindrées. Les profils sont différents pour chaque catégorie de cylindrée. Pour la catégorie D1, la courbe ne cesse de croître. Nos projections estiment qu'en 2020 il subsistera 260 000 véhicules de la catégorie D1 construits en 2015, pour la même catégorie, ce volume est estimé à 300 500 véhicules en 2020. La catégorie D2 qui représente une écrasante majorité du parc diesel (et même du parc total) semble atteindre un plateau autour de 2 millions de véhicules dès 2015. Enfin, on observe pour la catégorie D3 une baisse continue des volumes de véhicules par année de construction. Pour finir, les projections estiment que les volumes de véhicules de la catégorie D3 seront non seulement minoritaires mais aussi en proportion décroissante avec le temps. Ceci s'explique par la forte baisse des parts de marché des gros diesels à l'horizon 2020 favorisant les plus petits diesels (D2 ou D1) ou encore les véhicules hybrides (essence ou diesels).

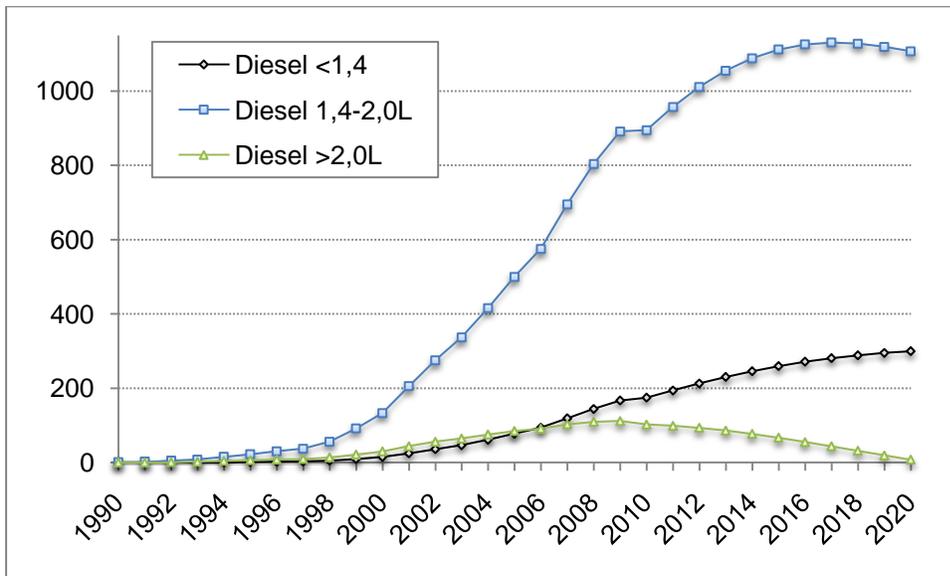


Figure 5- 23 Répartition du volume du parc de véhicules à moteur diesel par année de construction selon 3 catégories de cylindrées à l'horizon 2020. Basé sur les hypothèses de déploiement Duval-Destin.

Les prévisions menées sur la composition du parc de véhicules hybrides par année de construction prédisent, de manière logique, une croissance beaucoup moins marquée avec les hypothèses [Duval-Destin \(2010\)](#) qu'avec les projections effectuées à partir des hypothèses de [Depoorter et Assimon \(2011\)](#). D'autre part, tout comme dans nos projections sous les hypothèses de diffusion de [Depoorter et Assimon \(2011\)](#), on retrouve, dans l'ordre croissant des volumes de déploiement, le trio H1, H3, H2. Le développement est plus marqué pour les véhicules hybrides de cylindrée intermédiaire (H2) que pour les catégories H1 et H3.

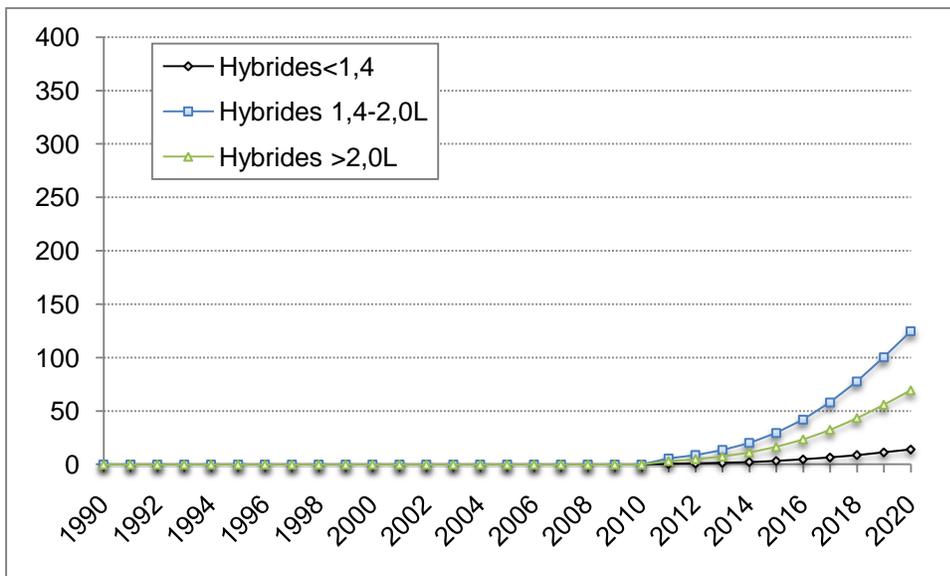


Figure 5- 24 Répartition du volume du parc de véhicules à motorisation hybride par année de construction selon 3 catégories de cylindrées à l'horizon 2020. Basé sur les hypothèses de déploiement de Duval-Destin.

6.2 Autres données et hypothèses pour l'utilisation de COPERT IV

Outre la structure du parc automobile ventilée par catégories de véhicules, le logiciel d'inventaires d'émissions dues à l'échappement (et à l'abrasion) COPERT requiert en « input » un certain nombre de données supplémentaires. Nous devons renseigner certaines caractéristiques d'usage des véhicules comme leur kilométrage annuel et leur kilométrage au compteur donnant une indication sur l'indice de dégradation des coefficients d'émissions. Nous devons aussi fournir des informations concernant la répartition des kilométrages parcourus ainsi que les vitesses moyennes sur chaque type de réseau (urbain, route, autoroute) afin que le logiciel puisse estimer une consommation moyenne et donc des émissions différenciées par réseau. Finalement afin de tenir compte des émissions dues à l'évaporation, des valeurs de températures moyennes et de pressions doivent être intégrées dans le calcul.

6.2.1 Usage annuel des véhicules particuliers et kilométrage total.

Le kilométrage annuel moyen et le kilométrage au compteur moyen peuvent être estimés à partir du panel Parc Auto. La vague 2010 du panel Parc Auto nous permet d'estimer l'usage annuel (et le kilométrage total) des véhicules en fonction de leur âge. Nous supposons que cette structure reste constante à l'horizon 2020 de telle sorte que les résultats obtenus puissent être utilisés pour nos projections d'émissions.

Rappelons pourtant que le panel, ne décrit pas la cylindrée des véhicules. Pour permettre l'estimation la plus proche, nous utiliserons comme proxy les classes de gammes (basse, moyenne ou haute) pour représenter les classes de cylindrées. Cette hypothèse est issue du constat selon lequel les véhicules bas de gamme sont de manière générale des véhicules de petite cylindrée et que leurs homologues haut de gamme sont eux plutôt des véhicules de grosse cylindrée.

D'autre part les véhicules électriques et hybrides sont très largement minoritaires dans le panel, ce qui conduit inévitablement à émettre une hypothèse simplificatrice sur leur usage et leur kilométrage au compteur. Dans nos projections, la demande de véhicules hybrides serait le fait d'un report à parts égales de celle en véhicules à moteur diesel et essence. C'est la raison pour laquelle les kilométrages (annuels et au compteur) des véhicules hybrides seront estimés par les moyennes pondérées des kilométrages obtenus pour les véhicules à moteur essence et diesel.

Les kilométrages moyens annuels et au compteur par groupes d'années, d'énergies (E : essence ; D : diesel) et de gamme (B : basse, M : moyenne, H : haute) sont fournis dans le tableau 1 en annexe 5-1. Le tableau 2 de la même annexe résume les résultats pour la population de véhicules hybrides.

6.2.2 Répartition du kilométrage des voitures par réseau et vitesses moyennes par réseau

Pour calculer les niveaux d'émissions, le logiciel COPERT requiert des données de répartition des distances parcourues selon des trois types de réseau : urbain, route, autoroute. Bourdeau (1998) a effectué des prospectives à 2020 des coefficients de partage entre la zone urbaine, les routes et les autoroutes. Elle estime que la part de trafics sur zone urbaine passera à 33% en 2020. Elle estime la répartition kilométrique entre l'autoroute et les autres réseaux (routier et urbain) en supposant un taux de croissance de la circulation sur autoroute équivalent au taux de croissance du réseau autoroutier depuis les années 70.

Nous utiliserons les valeurs obtenues pour l'année 2010 à partir du panel Parc Auto qui nous donnent une répartition de 35%, 45% et 20% pour la ville, la route et l'autoroute. Soulignons tout de même que ces valeurs ne sont guères éloignées de celles qui ont été estimée par André (1999) qui donnaient respectivement 32%, 46% et 22% pour la ville, la route et l'autoroute.

Hugrel et Joumard (2004) avaient estimés ces répartitions en les désagrégeant par sous-catégories de véhicules (soit le triplet « norme Euro », « énergie » et « catégorie de cylindrée ») en utilisant des régressions linéaires avec des coefficients contraints par les seuils maximaux des coefficients d'utilisation par réseau. Ces désagrégeations sont justifiées par une hypothèse de différenciation de l'usage pour chaque catégorie, les plus grosses cylindrées étant supposées rouler plus sur autoroute que les petites. Elles s'expliquent aussi par le besoin de comparaison temporelle des résultats d'émissions par tranches de 5 années entre 1970 et 2025 qui nécessite de prendre en compte les variations de répartitions de réseau. Nous décidons de nous astreindre de cette procédure de désagrégeation, notre démarche étant de comparer les émissions selon deux scénarios pour la même temporalité.

Concernant les vitesses moyennes par type de réseau, nous utiliserons celles estimées par André (1999) à partir de données de trafic. Ces vitesses s'élèvent respectivement à 23km/h, 56km/h et 108 km/h en moyenne pour l'aire urbaine, les routes et les autoroutes. On note que ces valeurs sont bien en-dessous des valeurs limites réglementaires (resp. 50, 70-90 ou 110 et 130 km/h) en raison de la signalisation et des congestions ponctuelles sur chacun des réseaux⁷¹.

6.2.3 Température et pression ambiante

Les données de température et de pression ambiantes, interviennent dans le calcul des phénomènes d'évaporation de carburant par le logiciel COPERT. Les données de pressions utilisées sont celles qui sont définies par défaut par le logiciel qui ne sont guères éloignées des valeurs nationales. Concernant les températures, le logiciel requiert l'entrée de valeurs

⁷¹ Notons que ces vitesses pourraient aussi être différenciées par catégories de véhicules si les données le permettaient.

moyennes maximales et minimales parc chacun des 12 mois de l'année et à l'échelle nationale. Les températures utilisées sont les valeurs mensuelles nationales moyennes normales issues de Météo-France. Ces températures correspondent aux moyennes calculées sur la période 1971-2000 pour chaque station de la métropole (y compris la Corse et sont fournies en annexe 5-2.

6.3 Résultats et bilan des inventaires d'émissions

Cette section est destinée à présenter les résultats des inventaires d'émissions à l'horizon 2020 réalisés à partir du logiciel COPERT IV. Sur la base de nos projections de la structure du parc à l'horizon 2020⁷², nous y présentons puis comparons les résultats des inventaires d'émissions en utilisant le logiciel COPERT IV. Cette comparaison des structures de parc est menée toutes choses égales par ailleurs sachant que l'ensemble des hypothèses et des données utilisées (hors composition de parc) sont similaires.

| | Composé | DA* | DD** | Ecart Relatif (DA-DD)/DA | |
|--------------------------------------|---|-------------------|---------|--------------------------|--------|
| | Dioxyde de carbone (milliers de tonnes) | CO ₂ | 63 800 | 64 247 | 0,70% |
| Emissions de Polluants Locaux | Gaz nocifs (tonnes) | CO | 89 962 | 95 891 | 6,59% |
| | | COV | 12 564 | 13 199 | 5,06% |
| | | CH ₄ | 1 097 | 1 213 | 10,55% |
| | | NO _x | 116 546 | 117 889 | 1,15% |
| | Particules fines (tonnes) | PM _{2,5} | 7 197 | 7 115 | -1,13% |
| | | PM ₁₀ | 9 979 | 9 848 | -1,31% |
| | Métaux lourds (kg) | Plomb | 8 050 | 7 907 | -1,77% |
| | | Cadmium | 241 | 242 | 0,30% |
| | | Cuivre | 99 657 | 98 738 | -0,92% |
| | | Nickel | 1 897 | 1 898 | 0,07% |
| Zinc | | 46 322 | 45 999 | -0,70% | |

Tableau 5- 13 Bilan national des émissions à l'horizon 2020 selon les scénarios de déploiement de Depoorter et Assimon* (DA) et Duval-Destin* (DD).

Le tableau 5-13 résume les résultats d'inventaires d'émissions menés à l'échelle nationale selon nos deux hypothèses de déploiement. A première vue, le bilan environnemental semble globalement à l'avantage du parc simulé selon l'hypothèse de diffusion volontariste de Depoorter et Assimon (2011). Pour mieux trancher, plusieurs niveaux de lectures sont nécessaires. Nous comparerons tout d'abord les émissions de CO₂ puis les émissions de gaz

⁷² Rappelons que nos prévisions de parc suivant l'hypothèse de Depoorter et Assimon (2011) estiment un volume de véhicules hybrides de près de 2,15 millions pour l'année 2020. La quantité de véhicules hybrides est quant à elles estimée à 803 000 véhicules hybrides en partant de l'hypothèse minimaliste (modifiée) de Duval-Destin (2010).

nocifs (CO, COV, NO_x). Pour terminer nous comparerons les inventaires d'émissions de particules fines et de métaux lourds.

Selon le scénario de parc obtenu en appliquant les hypothèses de diffusion des véhicules hybrides de [Depoorter et Assimon \(2011\)](#), la projection des inventaires d'émissions permet d'estimer une économie de 447 000 tonnes de CO₂ sur le scénario de déploiement alternatif. Cette économie peut sembler élevée mais elle ne représente que 0,7% du volume des émissions. Trois facteurs essentiels peuvent expliquer cette proximité dans les niveaux d'émissions de CO₂. Le premier facteur concerne la diffusion massive des nouvelles technologies Euro 5 et 6 qui concurrenceront les véhicules hybrides au niveau de la consommation de carburant et des émissions. Soulignons d'autre part que la version actuelle du logiciel COPERT IV (V8) n'intègre pas, pour le moment, les véhicules hybrides de norme Euro supérieure à 4 ; en conséquence l'estimation d'éventuelles économies supplémentaires qui proviendraient de l'amélioration du moteur hybride, poussées par les normes Euro 5 et 6, ne sont pas rendues possibles. Pour finir, soulignons que techniquement les véhicules hybrides n'apportent pas de gain sur cycle autoroutier qui représente dans notre cas par hypothèse près de 20% des kilomètres parcourus pour tous types de véhicules. Lors d'une comparaison de consommation par cycle d'usage [Montaru \(2009\)](#) montre que la consommation unitaire en cycle autoroutier d'une Toyota Prius Hybride estimée à 5,49l/100 km est supérieure à celle d'une Laguna 1,9L dci qui est estimée à 5,15l/100km. De manière générale, en se basant principalement sur les deux premiers facteurs, les émissions de CO₂ associées au scénario volontariste d'accompagnement des nouvelles technologies peuvent être légèrement surestimées et dans le même temps le gain espéré amoindri.

Concernant les émissions de gaz nocifs, le bilan est sans équivoque, puisque le scénario prévoyant le déploiement massif de véhicules hybrides permet un gain respectif de plus de 6% sur les émissions de monoxyde de carbone, de 5% sur les émissions de composés organiques volatils, de plus de 10% sur les émissions méthaniques et de 1% sur les émissions de d'oxydes d'azotes. Les véhicules à moteur hybrides permettent de réduire efficacement les problèmes de rejets à froid puisque leur motricité à faible vitesse est assurée par de l'énergie d'origine électrique. Ces rejets sont d'autant plus réduits par l'usage des véhicules hybrides qu'ils sont effectués en cycle urbain et à faible vitesse. Rappelons que dans notre hypothèse de répartition des kilométrages sur le réseau nous fixons une part de 35% de parcours urbains pour une vitesse moyenne de 23 km/h.

Le bilan des émissions de particules fines est nettement à l'avantage du parc simulé suivant les hypothèses de déploiement de [Duval-Destin \(2010\)](#). Il est de l'ordre de 1% pour les particules PM_{2,5} et PM₁₀. Rappelons tout d'abord que ce sont principalement les véhicules à moteur diesel qui émettent des particules fines. Cela étant, les véhicules diesel répondant aux

normes Euro 5 et 6 sont dotés de filtres à particules qui réduisent fortement les émissions associées à ces véhicules.

Ainsi, les différences observées dans les valeurs d'émissions de particules ne sont pas expliquées par la différence dans les hypothèses de déploiement. En examinant plus finement les résultats des émissions de particules par catégories de véhicules on remarque que cette différence dans les valeurs d'émissions de particules fines se situe dans la répartition des motorisations pour les normes antérieures à la norme Euro 4, et particulièrement celle de la norme Euro 2. La répartition par motorisation des véhicules labellisés Euro 2 subsistant dans le parc à l'horizon 2020, est assez inégale selon le scénario de déploiement de référence. En effet, le parc de véhicules diesel estimé à 635 milliers d'unités dans le cadre du scénario volontariste de [Depoorter et Assimon \(2011\)](#) est largement supérieur à celui de [Duval-Destin \(2010\)](#) estimé à 473 milliers d'unités, ce qui au vu des forts coefficients d'émissions de particules associés véhicules diesels très majoritairement non dotés de filtres à particules, pèse fortement sur le bilan des émissions de particules PM_{2,5} et PM₁₀ du scénario volontariste.

Pour ce qui est des métaux lourds, les différences de résultats de nos deux scénarios sont mitigées. Le scénario de parc estimé à partir des hypothèses de diffusion de [Depoorter et Assimon \(2011\)](#) promet toutefois plus d'émissions en plomb, cuivre et zinc et un niveau équivalent en cadmium et nickel. On peut estimer de manière globale que les niveaux d'émissions associés aux métaux lourds sont assez équivalents selon les deux hypothèses de diffusion. Le déploiement des véhicules hybrides ne pouvant prétendre à apporter des gains en la matière.

En définitive, bien que la structure de parc fondée sur les hypothèses de déploiement de [Depoorter et Assimon \(2011\)](#) semble apporter une certaine économie dans les émissions par rapport au scénario [Duval-Destin \(2010\)](#), il reste assez difficile de trancher de manière globale. En effet, les résultats tirés de la comparaison de l'inventaire d'émissions à partir des structures de parcs simulés à l'horizon 2020 fondés sur les hypothèses de [Depoorter et Assimon \(2011\)](#) et [Duval-Destin \(2010\)](#) ne sont pas homogènes et même assez différenciés pour chacun des 4 secteurs énoncés : CO₂, gaz nocifs, particules fines et métaux lourds. Le bilan des émissions de CO₂ obtenu à partir du scénario volontariste est peu marqué en raison de l'introduction de véhicules essence et diesel à haut rendement énergétique qui concurrenceront les véhicules hybrides, mais aussi en raison de l'impossibilité de pouvoir tenir compte dans le logiciel de calcul des véhicules hybrides de normes supérieure à Euro 4 ainsi que des véhicules tout électriques.

CONCLUSION

Ce chapitre nous a permis de mobiliser un modèle de renouvellement du parc à partir des lois de survie par type de motorisation estimées au chapitre 4 pour construire trois scénarios de structures de parc automobiles à l'horizon 2020.

Deux scénarios de structures de parc à l'horizon 2020 ont été estimés en recourant à deux projections de parts de marché contrastées :

- D'une part le scénario de déploiement de [Duval-Destin \(2010\)](#) prévoyant un part de marché modeste de 10% de véhicules propres (hybrides, tout électriques et PAC) en 2020
- D'autre part le scénario volontaire associé au plan gouvernemental de développement des véhicules hybrides et électriques intitulé « plan véhicules décarbonés » de [Depoorter et Assimon \(2011\)](#).

Nos parcs projetés affichent une structure largement dominée par les véhicules à moteur diesel. Selon l'hypothèse de diffusion choisie, [Depoorter et Assimon \(2011\)](#) ou [Duval-Destin \(2010\)](#)⁷³ les véhicules à moteur diesel représenteront respectivement près de 70,8% et 72,6% du parc en 2020. D'autre part, les deux scénarios de parcs placent les véhicules à moteur essence en seconde position en termes de proportion. Celle-ci est estimée à 22,1% selon le scénario [Depoorter et Assimon \(2011\)](#) et à 24,7% selon le scénario alternatif.

En raison des divergences observées dans les hypothèses de déploiement, les proportions de véhicules hybrides estimées dans le parc à l'horizon 2020 sont assez différentes. Nos projections de parc permettent d'estimer une part de véhicules hybrides dans le parc égale à 7,1% correspondant à 2,08 millions de véhicules selon le scénario haut⁷⁴ volontariste, elle n'est que de 2,7% soit 803 000 véhicules en s'appuyant sur scénario haut conservateur de [Duval-Destin \(2010\)](#).

Un affinage de la structure de parc par catégories de cylindrées, nous a permis d'effectuer un inventaire des émissions à l'échelle nationale pour chaque scénario de parc en recourant au logiciel COPERT IV, l'objectif étant de comparer les deux bilans environnementaux. Les résultats de cette comparaison des inventaires n'est pas nettement à l'avantage du scénario de parc simulé par les hypothèses volontariste de diffusion [Depoorter et Assimon \(2011\)](#) qui estime une différence assez modeste de 447 000 tonnes de CO₂ (représentant 0,7%) avec le scénario de déploiement alternatif. Nous expliquons cet écart peu important dans les émissions de CO₂ par la diffusion massive de véhicules thermiques à faible niveau de consommation qui resteront

⁷³ Hypothèse modifiée pour les besoins d'une modélisation des parts de marché par une loi logistique

⁷⁴ Rappelons que le scénario haut est fondé sur un volume annuel d'immatriculations de véhicules neufs constant et égal à 2,1 millions de véhicules par an. Le scénario bas envisage une hypothèse de 2,0 millions de véhicules neufs immatriculés tous les ans.

concurrentiels face aux véhicules hybrides. Nous avons aussi fait remarquer que la version actuelle du logiciel COPERT IV (V8) n'intègre pas, pour le moment, les véhicules hybrides de norme Euro supérieure à 4 ; en conséquence les émissions de CO₂ associées au scénario volontariste d'accompagnement des nouvelles technologies peuvent être légèrement surestimées.

Concernant les polluants locaux le scénario volontaire permet des gains compris entre 1% et 10% pour les principaux gaz nocifs alors qu'il dégrade légèrement (~ -1%) les émissions en particules fines et reste sans grand impact sur les émissions de métaux lourds. Les résultats des inventaires concernant les polluants locaux sont peu marqués principalement en raison de l'introduction de véhicules essence et diesel à haut rendement énergétique qui concurrenceront les véhicules hybrides. Ces résultats sont aussi dus à l'impossibilité de tenir compte dans le logiciel COPERT IV, des véhicules hybrides de normes supérieures à Euro 4 et des véhicules tout-électriques.

Les résultats issus de la comparaison des inventaires d'émissions, nous interrogent sur la pertinence d'un déploiement exclusif de véhicules hybrides, ce que certes aucun scénario de déploiement ne soutient. La réduction des émissions de GES et de polluants locaux dus à l'échappement et à l'abrasion passeront ainsi immanquablement par des mesures politiques visant à accompagner prioritairement le développement des véhicules tout électriques. Au préalable, les objectifs de baisse des émissions moyennes devront être respectés par les constructeurs : 120 gCO₂/km pour 65% des véhicules neufs en 2012, 75% en 2013, 80% en 2014 et 100% en 2015.

Conclusion Générale

Le fil conducteur de cette thèse repose sur un constat simple selon lequel une estimation de l'impact environnemental en termes d'émissions dues à la combustion (gaz d'échappement) et à l'abrasion (particules émises par usure des freins, des pneus, de la chaussée, etc.) du parc automobile nécessite non seulement une bonne estimation de son volume mais aussi de sa structure (âge, motorisation, cylindrée etc.) et de son usage. Tout au long de cette thèse nous avons pu montrer que les trois fondamentaux du parc automobile précités (volume, structure et usage) sont en mouvement perpétuel. Ainsi, après nous être penchés sur la question de l'estimation du volume du parc automobile dans le second chapitre, nous avons rapidement décidé de soulever la question du vieillissement de ce parc, question qui allait nous ouvrir des portes vers une meilleure compréhension de l'évolution démographique, préalable essentiel et concret à l'établissement (et à la projection) des structures de circulation en niveau actuel puis en projection.

En conséquence, notre recherche fait une place importante à l'analyse du vieillissement du parc automobile en tant que diagnostic permettant de détecter les mouvements démographiques, en particulier les tendances associées à l'évolution du solde naturel estimé comme la différence entre les immatriculations de véhicules neufs et le déclassement de véhicules obsolètes. Le chapitre 3, chapitre médian et central de cette thèse dresse le constat d'un vieillissement structurel du parc automobile qui nous permet par la suite de confirmer la baisse de la vitesse de déclassement des véhicules particuliers, qui est l'objet du chapitre 4.

Principaux résultats

Application du modèle agrégé pour la projection des taux de motorisation

La disparition de la « vignette », supprimée en août 2000 par Laurent Fabius alors Ministre de l'Économie des Finances et de l'Industrie, fait perdre du même coup une source statistique qui permettait jusqu'alors une estimation fiable du volume du parc automobile. Après avoir listé différentes méthodes d'évaluation statistique du volume du parc automobile, nous développons un modèle agrégé appliqué à la motorisation des ménages et des individus ayant pour finalité d'apporter quelques éclairages sur la croissance des niveaux de motorisation en France. Les modèles agrégés sont destinés à projeter les niveaux de motorisation en se référant à la démarche de [Tanner \(1978\)](#) ainsi qu'aux hypothèses de saturation de [Marchetti \(1986\)](#) qui stipule que la croissance démographique du parc automobile se heurte, comme celle de toute population humaine ou animale, à l'émergence de forces qui induisent des phénomènes de saturation. Nous effectuons ainsi des

CONCLUSION GENERALE

ajustements des séries de taux de motorisation en recourant à quatre lois de croissance agrégées :

- logistique [Verhulst, 1838, 1845, 1846, 1847]
- Gompertz [Gompertz, 1825]
- Tanner avec coefficient d'asymétrie [Tanner, 1978]
- Von Bertalanffy [Von Bertalanffy, 1938]

Toutes les lois énoncées sont issues du domaine de la démographie et correspondent pour la plupart à des modèles de croissance de la population humaine et animale, à la seule exception de la loi de Tanner (1978) qui a été formulée pour l'estimation du volume parc automobile Britannique. Bien qu'elles soient toutes dotées d'un seuil de saturation et d'un point d'inflexion, leur principale différence se situe dans la façon de positionner le point d'inflexion, ce qui donne plus ou moins de flexibilité à la forme paramétrique de chacune des lois théoriques.

Les quatre lois paramétriques énoncées sont ensuite mises en concurrence selon le critère de la qualité des ajustements mesuré à partir de la statistique de Fisher. Nous isolons la loi de Tanner avec coefficient d'asymétrie [Tanner, 1978] comme étant la forme fonctionnelle la plus adéquate (selon le critère de Fisher) principalement en raison de sa flexibilité accrue. Nous montrons, en revanche que la spécification de Verhulst est moins adaptée puisque son point d'inflexion théorique se situe à mi-chemin entre les deux asymptotes.

Ayant sélectionné la forme théorique la plus adaptée, c'est à dire en recourant à la loi de Tanner (1978), nous procédons à des exercices de projection de taux de motorisation. Ces projections fournissent des seuils de saturation de la motorisation s'élevant à 1,23 [1,20 ; 1,25] véhicule par ménage et à 0,75 [0,73 ; 0,78] véhicule par individu de 19 ans et plus. Concernant les prévisions à moyen terme, le modèle de Tanner prévoit 1,18 véhicule par ménage et 0,68 véhicule par individu en âge de conduire à l'horizon 2020.

Toutefois, des observations récentes amènent à s'interroger sur le caractère monotone croissant des courbes retraçant la motorisation. En effet, l'équipement des ménages diminue parmi les habitants de la ville de Paris (comme du reste au cœur de Londres) et on note également une désaffection pour le permis de conduire chez les jeunes adultes (qui n'est peut-être qu'un retard par rapport à la trajectoire des générations précédentes). Mais, dans un contexte de fort renchérissement des prix des carburants, on ne peut pas exclure l'hypothèse d'un retournement global de la tendance à des taux de motorisation toujours croissants, suivant en cela l'exemple des populations les plus urbanisées et les plus aisées, voire les plus conscientes des enjeux environnementaux, ainsi que d'une nouvelle génération moins centrée sur l'automobile car plus "multimodale" [Goodwin ; 2010a, 2010b, 2010c, 2010d, 2011].

CONCLUSION GENERALE

L'intérêt d'une application des modèles de croissance agrégés pour modéliser la motorisation des ménages et des individus en âge de conduire réside dans la possibilité offerte d'identifier les différentes phases de croissance (démarrage, diffusion, saturation) et pour la prévision de l'évolution à long terme de la motorisation des ménages. Malgré leurs apports certains, l'une des principales faiblesses des modèles agrégés réside dans leur incapacité à restituer une quelconque information sur la structure du parc automobile ainsi que sur ses mouvements démographiques naturels⁷⁵ (en faisant correspondre les immatriculations de véhicules neufs à des naissances et les véhicules déclassés à des décès). Pourtant le constat d'une hausse continue de l'âge moyen du parc automobile depuis les années 80 [Dumont et Ledet, 1985 ; Amatousse et Madre, 1986 ; Lambert et Madre, 1989], est un facteur révélateur de mouvements démographiques qui nous a incité à étudier plus en détail l'évolution de la structure du parc (pyramide des âges, répartition par type de carburant (ou de motorisation), etc.).

L'examen du vieillissement du parc automobile, préambule à une explication de son évolution démographique

Les interrogations concernant la compréhension de la dynamique démographique de la « population » des véhicules particuliers ainsi que les premières réponses apportées au sujet de l'évolution de la durée de vie des véhicules naissent principalement du débat suscité par l'accroissement de l'âge moyen du parc automobile. Même s'il faut souligner que les premières études consacrées à la durée de vie des voitures particulières [Thomas, 1970 ; Moutardier et Glaude, 1978] sont essentiellement destinées à la prévision de la demande automobile, elles trouvent leur justification première dans l'observation d'un léger accroissement de la durée de vie des véhicules. Le vieillissement du parc automobile est constaté puis démontré de manière précise depuis au moins vingt-cinq années [Dumont et Ledet, 1985 ; Amatousse et Madre, 1986 ; Lambert et Madre, 1989 ; Robin, 2010].

Nous montrons, sur la base d'exploitations faites à partir de l'enquête Parc Auto, que le parc automobile vieillit de près de 2 ans entre 1990 et 2008 (à ce jour dernière année disponible de l'enquête Parc Auto) en passant de 5,9 à 8,2 ans d'âge moyen. A ce constat s'ajoute celui d'un parc automobile dont le kilométrage moyen affiché au compteur ne cesse de grimper entre 1990 et 2008 en passant de près de 70 000 à 104 000 km. L'introduction de cette variable du kilométrage compteur comme dimension de mesure de la longévité (kilométrique) en complément de la dimension du temps calendaire à travers la variable

⁷⁵ Les mouvements migratoires ne sont pas traités faute de statistiques fiables concernant en particulier les exportations de véhicules.

CONCLUSION GENERALE

d'âge des véhicules nous permet d'appréhender de manière globale la compréhension du phénomène de vieillissement.

Nous montrons ainsi qu'en 1985, 99,5% du parc a conjointement moins de 269 mois (22,4 ans) et moins de 207 000 kilomètres au compteur. En 2005, 99,5% du parc est désormais âgé de moins de 288 mois (24 ans) et affiche conjointement moins de 318 015 kilomètres. Ainsi en vingt années, les 0,5% des véhicules les plus vieux gagnent près de 1,6 an et 111 000 kilomètres montrant une forte stagnation de ces véhicules dans le parc. D'autre part, les véhicules situés sous le 5^e centile d'âge et de kilométrage voient leur âge moyen augmenter avec les années. En 1985, le 5^e centile a conjointement moins 6 mois et moins 5 600 kilomètres au compteur. En 2008 cette même catégorie de véhicules en dessous du 5^e centile a conjointement moins de 14 mois et moins de 13 400 kilomètres ; c'est dire que ce seuil du 5^e centile gagne, entre 1985 et 2008, près de 8 mois et 7 800 kilomètres. L'observation d'un accroissement continu de l'âge moyen du parc automobile depuis vingt-cinq années nous amène à faire le constat d'un vieillissement structurel et continu du parc que ce soit selon la dimension classique de l'âge, indicateur de la durée de vie, ou de celle du kilométrage au compteur, indicateur de l'intensité d'usage.

Après avoir souligné le vieillissement du parc entre 1984 et 2008, il nous paraît essentiel de déterminer les facteurs y contribuant. Nous montrons en premier lieu qu'il ne semble pas y avoir de corrélation entre la diésélisation et le vieillissement du parc. Nous montrons que l'âge moyen des véhicules à moteur essence est supérieur de 3 années en 2008 à celui de leurs homologues diesel. On estime en 2008 à 9,9 ans l'âge des véhicules à moteur essence contre 6,9 ans pour les véhicules diesel. D'autre part l'écart d'âge moyen entre véhicules à moteur essence et diesel est croissant avec le temps puisqu'il passe de 2,1 ans en 1984 à 3 ans en 2008. Nous isolons la relative inertie des immatriculations de véhicules neufs comme un facteur ralentissant le renouveau démographique. Par ailleurs, nous retenons des facteurs liés à l'usage et plus généralement aux aspects socio-économiques comme le multi-équipement et la diffusion sociale de l'équipement (ou démocratisation de la voiture particulière) pour expliquer le vieillissement du parc. Tous les facteurs énumérés sont résumés ci-après selon le plan suivant :

1. L'impact du multi-équipement sur le vieillissement du parc automobile:
 - a/ Le développement de la motorisation des femmes
 - b/ L'étalement urbain
2. La relative inertie des immatriculations de véhicules neufs, flux d'entrée dans le parc assimilable à des naissances.

CONCLUSION GENERALE

3. La démocratisation de la voiture particulière qui s'explique en partie par le développement du marché de l'occasion, la baisse du coût d'acquisition facilitant l'accès à la motorisation des ménages les plus modestes

1- L'impact du multi-équipement sur le vieillissement du parc automobile

Nous avons montré que les véhicules secondaires étaient plus âgés en moyenne que les véhicules uniques ou même principaux. Les véhicules secondaires ont en 2008 un âge moyen estimé à 13,4 ans contre 10,4 ans pour le véhicule principal et 7,1 ans lorsque le véhicule est le seul du ménage. Nous démontrons aussi que l'âge moyen des véhicules secondaires subit une hausse de près de 5,4 ans en passant de 8 à 13,4 ans durant la période 1984 à 2008. Dans le même temps, l'âge moyen des véhicules uniques augmente à la marge de 1,7 an, passant de 5,4 à 7,1 ans. Nous dénombrons alors deux causes majeures au multi-équipement : d'une part le développement de l'activité des femmes après 1970 et d'autre part l'étalement urbain.

a- Développement de la motorisation des femmes

Robin (2010) montre à partir des enquêtes nationales transport (ENTD) que 76% des femmes de plus de 55 ans possèdent le permis en 2008 contre 64% en 1994 et 47% en 1982. Elle montre en outre que le phénomène de rattrapage se manifeste également dans la fréquence de conduite puisque les femmes disposant du permis sont 80% à conduire régulièrement (toutes les semaines) en 2008 contre 77% en 1994 (+3 points).

b- Etalement urbain

Il repose sur une logique de localisation résidentielle consistant à s'éloigner du centre ville pour s'installer dans des zones périphériques moins denses (où l'offre de transport en commun sera d'évidence moins rentable ou pertinente), afin, pour certains, de parvenir à diminuer ou de stabiliser le coût résidentiel (excentration par contrainte) ou au contraire, pour d'autres, à opter pour un cadre de vie plus « vert » (excentration par choix). Les lieux d'emplois quant à eux restent souvent concentrés en centre ville, ou ne s'excentrent ni aux mêmes endroits ni aux mêmes rythmes. Cela débouche sur une augmentation sensible des distances parcourues, la plupart du temps par obligation en voiture, d'où un phénomène de dépendance à l'automobile [Dupuy, 2006 ; Collet, 2007 ; Hivert, 2010]. Cette dépendance a également pour effet de pousser au développement extensif du système de mobilité recourant à l'automobile et donc au multi-équipement.

2- La relative stabilité du volume des immatriculations de véhicules neufs

La relative inertie des ventes de véhicules neufs joue aussi un rôle dans le vieillissement du parc automobile. Le flux de nouveaux entrants, est alors insuffisant pour permettre de contrebalancer le vieillissement du parc provoqué par la baisse des déclassements. En effet,

CONCLUSION GENERALE

les immatriculations de véhicules neufs stagnent après 1990 années fastes pour le marché automobile (environ 2,3 millions de véhicules immatriculés). Le vieillissement s'explique alors par une stabilisation du flux des nouveaux entrants, qui à taux de déclassement décroissant, est de nature à accroître l'âge moyen du parc automobile français.

3- Démocratisation et diffusion sociale de l'équipement

Concernant la question de la démocratisation de la voiture particulière, on a schématiquement remarqué depuis la fin des années 1990, que 80% des ménages étaient équipés tandis que 20% ne l'étaient pas [Hivert, 2010]. En 1960, seuls 3 foyers sur 10 étaient équipés, l'équipement automobile avait pourtant beaucoup bénéficié de la diffusion sociale de l'automobile, diffusion conduisant à la réduction des inégalités en matière d'équipement depuis les années 70. Dès cette période de nombreux ménages modestes ont pu acquérir une 'première' voiture [Hivert, 2010]. L'essor du marché du véhicule d'occasion et l'apparition de véhicules de niveaux de gamme inférieurs ont participé à la baisse du prix moyen d'acquisition des véhicules et à leur démocratisation. L'évolution de la taille du marché de l'occasion en témoigne puisque le ratio « ventes de véhicules d'occasion sur ventes de véhicules neufs » augmente progressivement depuis 1980, passant de 2,4 en 1980 à des valeurs stables situées autour de 2,6 à 2,7 depuis 2003.

Après l'examen de l'évolution de l'âge moyen des véhicules, nous montrons que la question concernant le signe du solde naturel du parc automobile et de son évolution temporelle n'a pas de réponse concrète. La stagnation du flux des entrées de véhicules neufs, comparable à des naissances en démographie, ne saurait être un argument suffisant pour expliquer le vieillissement, s'il n'est pas couplé à une hausse de l'espérance de vie et donc de la durée de vie des véhicules particuliers. L'observation du vieillissement selon les dimensions de l'âge et du kilométrage total au compteur nous pousse à nous interroger sur la question cruciale (au moins pour les préoccupations environnementales, puisque les normes d'émissions sont de moins en moins sévères quand on remonte le temps) de la stabilité temporelle des lois de survie et de manière plus générale sur l'interaction entre vieillissement et durée de vie, questions auxquelles nous décidons de répondre en focalisant notre recherche sur l'estimation et le sens de l'évolution, à la hausse ou à la baisse, de la durée de vie des voitures particulières.

Durée de vie des véhicules particuliers

Pour répondre aux interrogations suscitées par le diagnostic du parc à partir de l'évolution observée de son âge moyen, nous examinons la durée de vie des véhicules en exploitant le panel Parc Auto de TNS-Sofres. Ce panel nous permet de comparer la durée de vie d'automobiles construites à des périodes différentes en recourant à une approche

CONCLUSION GENERALE

longitudinale basée sur le suivi de cohortes, issue des travaux de [Moutardier et Glaude \(1978\)](#). Ce panel nous permet aussi d'estimer la distribution par âge du parc à des dates différentes, en référence aux travaux de [Moutardier et Glaude \(1978\)](#), donnant le taux de survie de toutes les générations de véhicules en présence dans le parc pour une même année : c'est l'approche transversale.

Les taux de survie estimés mettent en lumière des accroissements temporels des durées de vie selon les optiques transversales et longitudinales des véhicules à disposition des ménages. Les résultats empiriques d'ajustements par moindres carrés non linéaires contrôlés suivant un critère de Fisher nous conduisent à opter en faveur d'une loi de survie de Weibull [[Weibull, 1951](#)] plutôt que pour les spécifications log-logistiques ou encore log-normales [[Gallez, 1994a](#)] pour la caractérisation de la durée de vie des véhicules particuliers.

Les ajustements effectués à partir de la loi de Weibull fournissent des lois de survie paramétriques qui nous permettent de nous abstraire des problèmes de fluctuations d'échantillonnage. Ils nous permettent en outre de mesurer explicitement, à l'aide de deux paramètres, l'allongement de la durée de vie des véhicules suivant deux dimensions :

- La durée de vie médiane estimée par ajustement d'une loi de Weibull sur des taux de survie transversaux ; elle gagne près de 4,6 années en passant de 8,62 ans pour la période 1984-1987 à 13,23 ans pour la période 2004-2008.
- Les ajustements effectués à partir de la loi de Weibull sur des taux de survie longitudinaux montrent que la durée de vie médiane du parc automobile augmente moins fortement en passant de 9,97 ans pour les véhicules construits entre 1984 et 1987 à 11,57 ans pour ceux construits entre 2000 et 2003. Rappelons que selon [Moutardier et Glaude \(1978\)](#), la durée de vie longitudinale est un bon indicateur pour comparer la durée de vie physique.

Nous en concluons que l'augmentation de la durée de vie des véhicules particuliers est certes affectée par leur plus grande robustesse mais est principalement expliquée par la conjonction de facteurs socio-économiques qui ont entraîné d'une part la forte croissance de la diésélisation du parc et d'autre part le multi-équipement des ménages.

Les résultats issus de l'ajustement de la loi de Weibull sur des taux de survie transversaux moyens calculés sur la large période 2000-2008 par type de motorisation montrent que ce sont les véhicules diesel qui ont la durée de vie médiane la plus importante estimée à 13,1 ans. La durée de vie médiane des véhicules à motorisation essence étant estimée à 11,1 ans sur la même période (2000-2008), la longévité accrue des véhicules diesel étant la principale explication à l'avantage de ces derniers en matière de survie observés dans le parc par rapport aux véhicules essence. Ces résultats éclairent les conclusions concernant l'impact de la diésélisation sur le vieillissement du parc. En effet, ils permettent d'apporter des nuances à notre conclusion précédemment formulée, les

CONCLUSION GENERALE

véhicules diesel étant plus jeunes en moyenne que les véhicules essence en raison de leur part de marché et de leur déploiement plus récent (71% des immatriculations neuves en 2010, 70% en 2009, en léger recul par rapport à 2008 avec plus de 77% [Hivert, 2011])

Au final, la population de véhicules diesel qui vieillit légèrement moins vite que la population de véhicules essence pèse moins fort sur le vieillissement du parc. Mais cette dynamique démographique pourrait être modifiée à l'avenir, et la population de véhicules diesel pourrait vraisemblablement favoriser le vieillissement du parc (comparativement aux véhicules à moteur essence) si leur solde naturel descend durablement en dessous de celui des véhicules à moteur essence.

Dans ce contexte, à la relative stabilité des immatriculations de véhicules neufs observée depuis deux décennies, vient s'ajouter l'allongement de la durée de vie du parc automobile causant un ralentissement global du rythme de son renouvellement expliquant le vieillissement observé. La diésélisation ainsi que le multi-équipement jouent également un rôle sur le vieillissement à travers l'allongement de la durée de vie des véhicules. Soulignons toutefois que l'effet global de la diésélisation ne va pas dans le sens de d'un vieillissement accru tant que le solde naturel des véhicules diesel reste supérieur à celui des véhicules à moteur essence.

Quid du lien entre durée de vie et longévité

Une régression de Poisson appliquée à des données issues des vagues 1990 à 2008 du panel Parc Auto donnant le kilométrage moyen au compteur et l'effectif pondéré par année d'observation par type d'usage (bas ou haut), d'âge de génération et de motorisation nous permet de mieux comprendre le lien entre la longévité et la durée de vie. Les véhicules diesel ont un taux de sortie du parc nettement inférieur à celui des véhicules essence, à kilométrage au compteur fixé (TIR=0,25). Cela confirme nos observations faites à partir des lois de survie du parc.

A partir de données d'effectifs pondérés différenciés par type de motorisation (diesel/essence) puis selon que les kilométrages au compteur et annuel selon qu'ils se situent au dessous, en dessous ou entre le 1er et 3ème quartile, nous menons une seconde régression. Celle-ci intègre l'effectif retardé comme variable d'exposition dans un modèle, nous confirmons que les véhicules à moteur diesel ont un taux de sortie beaucoup moins élevé que les véhicules à moteur essence (TIR=0,50). La différence entre les deux motorisations est beaucoup moins marquée que dans le modèle précédent (TIR=0,25) montrant que l'avantage lié à la robustesse des véhicules à moteur diesel perd de son effet en raison d'un usage annuel plus important.

Projection et impact environnemental

La projection de la structure du parc automobile par année-modèle (et donc aussi par norme Euro) est rendue possible à partir de nos estimations de lois de survie de Weibull différenciées par type de motorisation. Nous avons pu projeter la structure du parc automobile à l'horizon 2020 selon deux hypothèses contrastées de déploiement de véhicules hybrides et tout électriques. Le premier, un scénario volontariste qui est émis par [Depoorter et Assimon \(2011\)](#) est fondé sur les objectifs du Ministère de l'écologie (MEEDDM) du « *plan véhicule décarboné* » visant 2 millions de véhicules électriques et hybrides pour 2020, le second plus conservateur est émis par [Duval-Destin \(2010\)](#) de la société des ingénieurs automobiles et vise 10% de part de marché pour les véhicules électriques, hybrides et PAC en 2020. Chaque scénario étant décliné sous une forme haute ou basse selon que le volume annuel des immatriculations, supposé constant entre 2010 et 2020, soit égal à 2,1 ou à 2,0 millions de véhicules.

Quelles que soient les hypothèses de diffusion choisies, les estimations donnent plus de 70% de véhicules à moteur diesel dans le parc en 2020. D'autre part, les deux scénarios de parc placent, sans réelle surprise, les véhicules à moteur essence en seconde position persistante en termes de proportion. Cette dernière est estimée à 22,1% selon le scénario [Depoorter et Assimon \(2011\)](#) et à 24,7% selon le scénario alternatif.

La part de véhicules hybrides et électriques dans le parc égale à 7,1% correspondant à 2,08 millions de véhicules selon le scénario haut⁷⁶ volontariste, elle n'est que de 2,7% soit 803 000 véhicules en s'appuyant sur scénario haut conservateur de [Duval-Destin \(2010\)](#).

La déclinaison de la structure de parc par catégories de cylindrées, nous a finalement permis d'effectuer un exercice sommaire d'inventaire des émissions (de CO₂ et de polluants nocifs) à l'échelle nationale pour chaque scénario de parc en recourant au logiciel et modèle de facteurs d'émissions COPERT IV. Les résultats issus de la comparaison des inventaires d'émissions ne sont pas nettement à l'avantage du scénario volontaire et remettent en question un développement exclusivement axé sur les véhicules hybrides, ce que certes aucune hypothèse de déploiement ne soutient. En définitive, la réduction des émissions de CO₂ devra passer par la mise en conformité des constructeurs aux objectifs fixés par l'Union Européenne de 120 gCO₂/km pour 65% des véhicules neufs en 2012, 75% en 2013, 80% en 2014 et 100% en 2015. Ils passeront aussi par un accompagnement qui devrait être principalement orienté en faveur de véhicules tout électrique sans que cela ne modifie brusquement l'équilibre du mix énergétique.

⁷⁶ Rappelons que le scénario haut est fondé sur un volume annuel d'immatriculations de véhicules neufs constant et égal à 2,1 millions de véhicules par an. Le scénario bas envisage une hypothèse de 2,0 millions de véhicules neufs immatriculés tous les ans.

Extensions et pistes de recherche

Mise en relation des facteurs démographiques : impact des taux de sortie sur les immatriculations de véhicules neufs

Il semble difficile d'isoler l'impact du rallongement de la durée de vie des véhicules particuliers sur la stagnation du marché de la demande de véhicules neufs. On n'observe, en effet, aucune compensation entre le flux des immatriculations de véhicules neufs et le flux de véhicules sortants. Il est effectivement assez complexe de lier la mise au rebut d'un véhicule à l'immatriculation d'un véhicule neuf, la demande étant elle-même scindée en deux composantes difficilement dissociables, d'une part la demande de remplacement et d'autre part la demande additionnelle de véhicules neufs (qu'il s'agisse de primo-accédants ou de multi-équipement) qui est difficile à prévoir car dépendant principalement de la conjoncture économique. Une étude économétrique focalisée sur la demande de véhicules neufs en période de prime à la casse, en prenant le soin de dissocier les effets d'aubaines nous apporterait un éclairage significatif sur la demande de remplacement.

L'estimation des lois de survie

Concernant l'estimation de la survie des véhicules, cette thèse ouvre quelques terrains de recherche qu'il serait intéressant d'investir, tels que la relation entre la longévité (kilométrique) et la durée de vie des véhicules. La mise en perspective de ces deux dimensions a été abordée par un modèle de régression de Poisson. Elle peut être approfondie par une modélisation spécifique à partir d'un ensemble d'informations sur les caractéristiques des véhicules déclassés telles que la date de sortie, le kilométrage au compteur, la cylindrée, la puissance, etc. Toutes les données existantes traitent du parc et non des sorties ; elles sont donc censurées à droite, en effet, l'absence d'informations sur la date et le kilométrage au compteur des véhicules mis au rebut nous prive à la fois d'une analyse non-paramétrique [Kaplan et Meier, 1958] et d'une analyse semi-paramétrique [Cox, 1975] de la survie des véhicules. Aucune base ou source de données existante ne nous permet de faire de telles estimations, une piste intéressante concerne les données relevées par les services des casses automobiles en relation avec les préfectures. De telles données permettraient en outre de créer des lois de survie différenciées par type de territoire (région, département, etc.) ou par type de zones (urbanisées denses, périurbains, rurales, etc.) afin de projeter et estimer des impacts environnementaux différenciés géographiquement.

Finalement, nous devons souligner le manque d'information concernant le solde migratoire hors de nos frontières qui ne peut être intégré dans notre analyse, faute de données suffisantes : bien que les statistiques associées aux importations de véhicules

CONCLUSION GENERALE

soient connues (à partir des statistiques d'immatriculations de véhicules neufs), à l'inverse, aucun comptage des véhicules exportés n'est en effet disponible.

La projection des émissions

La projection des émissions est permise à partir d'une estimation préalable de la structure du parc. Il aurait été intéressant de tester la sensibilité des résultats d'émissions à l'horizon 2020 à une modification des paramètres des lois de survie utilisées, notamment à une hypothèse de hausse de la durée de vie des véhicules particuliers entre 2008 et 2020.

Nos résultats d'émissions ont été estimés à partir du logiciel COPERT IV. Ce dernier ne permet pas d'intégrer les véhicules électriques et les véhicules alimentés par pile à hydrogène, ni d'ailleurs les véhicules alimentés par les agro-carburants. La prise en compte de ces technologies serait pourtant la bienvenue pour une prospective à moyen (2020 à 2030) ou long terme (à 2050).

Les impacts environnementaux du cycle de vie des véhicules

Nous ne pouvons achever notre recherche sans souligner la question des émissions du « puits à la roue » (« *tank to wheel* » en anglais) depuis le processus de lancement de recherche et développement des véhicules en passant par l'extraction des matières premières, leur transformation en matériau intermédiaire puis finalement leur assemblage en produit fini, sans oublier l'aspect logistique associé à chaque phase de la conception.

Notre recherche permet de tenir compte des émissions des gaz d'échappement et de l'abrasion (freins, route, pneus, etc.). De manière plus générale, la prise en compte des émissions de CO₂ issues de toutes les étapes de la conception à la destruction (en y intégrant le recyclage des matériaux) nécessitent une Analyse du Cycle de Vie (ACV ou LCA : *life cycle assessment* en anglais).

Nemry *et al.* (2008) du *Joint Research Center*, centre de recherches de la Commission européenne, ont effectué une ACV montrant que le processus de fabrication (hors usage), d'un véhicule à moteur essence émet en moyenne 4,3 tonnes de CO₂, cette valeur passe à 4,7 tonnes pour les véhicules à moteur diesel. Ces émissions représentent pour un véhicule émettant 150 gCO₂/km (en 2007 en Europe la moyenne des émissions de CO₂ des véhicules neufs stagnait à 149 g/km), l'équivalent d'environ 28 700 km roulés pour les véhicules à moteur essence et de 31 300 km pour les véhicules alimentés au gazole. Ce constat implique de fait un renouvellement plafond au delà duquel on ne peut aller sous peine de voir les bénéfices environnementaux issus des véhicules peu émetteurs annulés par les émissions issues de la phase de production.

Bibliographie par chapitres

Bibliographie de l'introduction générale

- ADEME (2010) Magazine Ademe & Vous N°39 - Octobre 2010, Réf. 6788 - ISSN 1957-1992
- Andan, O. (1994) Mobilité résidentielle et transports en milieux périurbains. In Duhem B. et al., Villes et transports, Actes de séminaire, Tome 2, Plan urbain.
- Armoogum, J. Hubert, J.-P. Roux, S. Le Jeannic T. (2010) Plus de voyages, plus de kilomètres quotidiens : une tendance à l'homogénéisation des comportements de mobilité des Français, sauf entre ville et campagne. Collection « La Revue » du Service de l'Observation et des Statistiques (SOeS) du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD)
- Bardou, J.-P. Chanaron, J.-J. Fridenson, P. et Laux, J. M. (1977). La révolution automobile. Albin Michel, Paris.
- Beaucire, F. (1996) Les transports publics et la ville. Ed. Milan.
- Berri, A. (2005) Dynamiques de la Motorisation et des Dépenses de Transport des Ménages- Analyse sur données individuelles et semi-agrégées, thèse de Doctorat en Sciences Economiques, Université Paris 1, 254 p.
- Bourdeau, B. (1998) Evolution du parc automobile français entre 1970 et 2020, thèse de Doctorat, Université de Chambéry, 513 p.
- CCFA (2010) L'industrie automobile Française. CCFA, Paris.
- Chen, C. Niemeier, D. (2004) A mass point vehicle scrappage model, Transportation Research Part B, 39: 402-414
- CITEPA (2011) Inventaire émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France séries sectorielles et analyses étendues. Rapport National d'Inventaires. Avril 2011.
- Collet, R. (2007) Dynamique de la Motorisation et Usage de l'Automobile en France. Thèse de Doctorat en Sciences Economiques, Université Paris 1, 280 p.
- De Dion, A. (1999) L'automobile, reine du monde. *Reproduit dans* Futuribles. N° 238, janvier 1999, pp. 57-66.
- Dumont, Y. Leddet, J. (1985) La vignette : l'image d'un parc automobile qui vieillit. Economie et statistique, n°173, pp. 49-53.
- Dupuy, G. (1995) Les territoires de l'automobile. Collection Villes. Economica.
- Dupuy, G. (1999) La dépendance automobile. Symptômes, analyses, diagnostic, traitements. Anthropos-Economica.
- Dupuy, G. (2006) La dépendance à l'égard de l'automobile. Collection « Le point sur », PREDIT, La Documentation Française.
- Flink, JJ (1990) The Automobile Age. Cambridge, Massassuchetts MIT Press
- Gallez, C. (1994) Modèles de projection à long terme de la structure du parc et du marché de l'automobile, Thèse de doctorat en sciences économiques, Université de Paris1.
- Gardon, S. (2009) Gouverner la circulation urbaine : des villes françaises face à l'automobile (années 1910 – années 1960). Thèse de doctorat de science politique de l'Université Lumière Lyon 2
- Greenspan, A. Cohen, D. (1996) Motor Vehicle Stocks, Scrappage, and Sales, Finance and Economics Discussion Series, 40, Federal Reserve Board
- Juillard, M. (2007) Le budget automobile des ménages s'adapte au prix des carburants. Insee Première. N°1159. Octobre 2007
- Moutardier, M. Glaude, M. (1978) Projection de la demande d'automobiles pour 1980 et 1985. Série les collections de l'Insee ménages n°64. N°266 des collections de l'Insee juillet 1978.

- Robin, M., (2010) La motorisation des ménages continue de s'accroître au prix d'un vieillissement du parc automobile. CGDD, SOeS.
- Sauvy, A. (1968) Les Quatre roues de la fortune, essai sur l'automobile. Flammarion, 251 p.
- Smeed, R. J. (1951) Likely Increases of Road Traffic in Great Britain. Note de Recherche, Harmondsworth: Road Research Laboratory, RN/1518.
- Tanner, J.C. (1958) An Analysis of Increases in Motor Vehicles in Great Britain, Research Note RN/1631, Road Research Laboratory, Harmondsworth
- Zachariadis, T. Samaras, Z. Zierock, K-H (1995) Dynamic Modeling of Vehicle Populations: An Engineering Approach for Emissions Calculations, Technological Forecasting and Social Change 50, 135-149

Bibliographie du chapitre 1

- ADEME (2010) Magazine Ademe & Vous N°39 - Octobre 2010, Réf. 6788 - ISSN 1957-1992
- Armoogum, J. Hubert, J-P. Roux, S. Le Jeannic T. (2010) Plus de voyages, plus de kilomètres quotidiens : une tendance à l'homogénéisation des comportements de mobilité des Français, sauf entre ville et campagne. Collection « La Revue » du Service de l'Observation et des Statistiques (SOeS) du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD)
- Barbusse, S. Gagnepain, L. (2003) La climatisation automobile, Impact énergétique et environnemental, ADEME Département Technologies des Transports, Mai 2003.
- Berri, A. (2005) Dynamiques de la Motorisation et des Dépenses de Transport des Ménages- Analyse sur données individuelles et semi-agrégées, thèse de Doctorat en Sciences Economiques, Université Paris 1, 254 p.
- Berri, A. Madre, J.-L. (2000) Long term projections of car fleets in 5 EC, Japan and USA: a demographic approach, contribution au rapport D5 de SCENES: External Scenarios Development.
- Bourdeau, B. (1998) Evolution du parc automobile français entre 1970 et 2020, Thèse de Doctorat, Université de Chambéry, France, 513 p.
- Brundtland, G. H. (1987), Our Common Future. ONU, Rapport A/42/427 (texte complet en français: http://www.wikilivres.info/wiki/Rapport_Brundtland)
- Carballes S. (2008) Les véhicules particuliers en France, données et références. Département Transports et Mobilité, ADEME, Avril 2008.
- Collet, R. (2007) Dynamique de la Motorisation et Usage de l'Automobile en France thèse de Doctorat en Sciences Economiques, Université Paris 1, 280 p.
- Collet, R. Boucq, E. Madre, J.L. Hivert, L. (2010) Chapitre « Dynamique à long terme des inégalités entre les ménages concernant l'automobile en France », 14 pages, Ouvrage collectif « Pétrole Mobilité CO2 » coordonné par Y. Crozet, LET, pour PREDIT-DRI, juin 2010.
- CCFA (2010) L'industrie automobile française. Analyse et Statistiques 2010. CCFA, Paris.
- CCTN (2010) Annexes C du bilan de la circulation 2010. MEEDDM
- CITEPA (2011) Inventaire émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France séries sectorielles et analyses étendues. Rapport National d'Inventaires. Avril 2011.
- Chen, C. Niemeier, D. (2004) A mass point vehicle scrappage model, Transportation Research Part B, 39: 402-414.
- Cuenot, F. Papon, F. (2007) Is The Automotive Industry Able To Reach 120gCO₂/Km On Average On New Car Sold By 2012 With No Regulation From The EU? Tank-To-Wheel Analysis of the West and East European production from 1995 to 2005 and prospective to 2012, European Transport Conference, Noordwijkerhout, October 17-19, 15 p.

- Cuenot, F. (2009) CO₂ emissions from new cars and vehicle weight in Europe; How the EU regulation could have been avoided and how to reach it? *Energy Policy* 37, 3832-3842.
- Dargay, J. Gately, D. (1999) Income's effect on car and vehicle ownership, worldwide: 1960–2015, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 33(2). pp. 101–138.
- Dargay, J. Madre, J.-L. Berri, A. (2000) Car ownership dynamics seen through the follow-up of cohorts: a comparison of France and the UK. *Transportation Research Record* n° 1733, pp. 31-38.
- Deaton, A. (1985) Panel data from time series of cross-sections. *Journal of Econometrics*, Vol. 30, N°3, pp. 312-326.
- François, D. (2010) Se rendre au travail : distances et temps de transport s'allongent. Collection « La Revue » du Service de l'Observation et des Statistiques (SOeS) du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD)
- Gallez, C. (1994a) Modèles de projection à long terme de la structure du parc et du marché de l'automobile. Thèse de Doctorat, Université de Paris-I, Paris, France, 351 p.
- Gallez, C. (1994b) Identifying the Long Term Dynamics of Car Ownership: a Demographic Approach, *Transport Reviews*, Vol. 14, pp83-102
- Greenspan, A. Cohen, D. (1996), Motor Vehicle Stocks, Scrappage, and Sales, Finance and Economics Discussion Series, 40 (Washington, D.C.: Federal Reserve Board).
- Hirota, K., (2007) Passenger Car Ownership Estimation toward 2030 in Japan -BAU Scenario with Socio-Economic Factors-Studies in Regional Science, Vol.37, No.1, 2007, 25-39. Japan Society of Regional Science.
- Hugrel, C. Joumard, R. (2004) Transport routier - Parc, usage et émissions des véhicules en France de 1970 à 2025, Référence ADEME 01-03-035, Référence INRETS C02-02
- Hugrel, C. Joumard, R. (2006) Directives et facteurs agrégés d'émission des véhicules routiers en France de 1970 à 2025, Rapport LTE n° 0611, Juin 2006
- Ingram, G. K. Liu, Z. (1997) Motorization and the Provision of Roads in Countries and Cities. Policy Research Working Paper 1842 (Washington, DC: World Bank).
- INSEE (2008) Transport intérieur de voyageurs selon le mode de transport utilisé, Tableaux de l'Economie Française, (www.insee.fr)
- Krakutovski, Z. (2004) Améliorations de l'approche démographique pour la prévision à long terme de la mobilité urbaine. Thèse de Doctorat, université Paris 12.
- Lacour, S. Joumard, R. (2002) Parc, usage et émissions des véhicules routiers en France de 1970 à 2020. Bron : INRETS, 2002, 89 p.
- Madre, J-L. Gallez, C. (1993) Équipement automobile des ménages et cycle de vie. *Sociétés contemporaines* N°14-15, Juin / Septembre. pp. 59-78.
- Madre, J-L. Armoogum, J. Bussière Y. (1996) Vers la saturation? Une approche démographique de l'équipement des ménages en automobile dans trois régions urbaines. *Population*, 51e année, n°4-5, pp. 955-977
- Métaphis, A. Curtet, R. (2006): Bilan final des appariements entre le fichier central des automobiles (FCA) et les fichiers des contrôles techniques (UTAC) d'octobre 2003 à décembre 2005 et estimation du parc des voitures particulières (VP) au 1er janvier 2006. Note interne. Référence : EI/SESP/ST1/0610003
- Moutardier, M. Glaude, M. (1978) Projection de la demande d'automobiles pour 1980 et 1985. Série les collections de l'Insee ménages n°64. N°266 des collections de l'Insee juillet 1978.
- Smeed, R. J. (1951) Likely Increases of Road Traffic in Great Britain, Note de Recherche, Harmondsworth: Road Research Laboratory, RN/1518.
- Tanner, J.C. (1958), An Analysis of Increases in Motor Vehicles in Great Britain, Research Note RN/1631, Road Research Laboratory, Harmondsworth

- Tanner, J.C. (1978), Long Term Forecasting of Vehicle Ownership and Road Traffic (with discussion), *Journal of the Royal Statistical Society, Series A, Volume 14*, pp14-63
- Whelan, G. (2007) Modelling car ownership in Great Britain, *Transportation Research Part A* 41, pp. 205-219
- Zachariadis, T. Samaras, Z. Zierock, K.H. (1995) Dynamic Modeling of Vehicle Populations: An Engineering Approach for Emissions Calculations. *Technological Forecasting and Social Change*, N°50, pp.135-149.

Bibliographie du chapitre 2

- Akaike, H. (1973) Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. In B. N. Petrov & F. Csaki (Eds.), *2nd International Symposium on Information Theory* (pp. 267-281).
- Bozdogan, H. (2000) Akaike's Information Criterion and recent developments in information complexity. *Journal of Mathematical Psychology*, 44, 69-91.
- Button, K.J. Pearman, A.D. and Fowkes, A.S. (1982) *Car Ownership Modelling and Forecasting*, Aldershot:Gower.
- Dargay, J. and Gately, D. (1999) Income's effect on car and vehicle ownership, worldwide: 1960–2015, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 33(2). pp. 101–138.
- Drollas, L. (1984), The Demand for Gasoline: Future Evidence, *Energy Economics*, Vol.6, pp.71-82.
- Espey, M. (1998) Gasoline Demand Revised: an International Meta-Analysis of Elasticities, *Energy Economics*, Vol.20, pp.273-295.
- Franses, P. H. (1994), Gompertz Curves with seasonality. *Technological Forecasting and Social Change* n°45, Ed. Elsevier Science Inc, New York, USA, pp.287-297.
- Gakenheimer, R. (1999) Urban mobility in the developing world, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 33(2), pp. 671–689.
- Goodwin, Ph. (2010a) 'What about "peak car" – heresy or revelation?' *Local Transport Today*, 25 June 2010.
- Goodwin, Ph. (2010b) 'Peak Car –The Nature of the Research Problem' *Local Transport Today*, 2 July 2010.
- Goodwin, Ph. (2010c) 'Peak Car –The Evidence' *Local Transport Today*, August 2010.
- Goodwin, Ph. (2010d) 'Peak Car –The Policy Implications' *Local Transport Today*, 4 September 2010.
- Goodwin, Ph. (2011) 'Peak Car? The International Dimension' *Local Transport Today*, 5 June 2011.
- Gompertz, B. (1825) On the Nature of the Function Expressive of the Law of Human Mortality, and on a New Mode of Determining the Value of Life Contingencies, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Volume 115, p. 513-583
- Grünwald, P. (2001) Model selection based on minimum description length. *Journal of Mathematical Psychology*, 44, 133-152.
- Hautzinger, H. Kessel, P. Baur, R. (1980): Mobilitätschancen unterschiedlicher evölkerungsgruppen im Personenverkehr. In: *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Heft 310.
- Hirota, K., Poot. J. (2005), Taxes and the Environmental Impact of Private Car Use: Evidence from 68 Cities, In: A. Reggiani and L. Schintler (Eds.), *Methods and Models in Transport and Telecommunications: Cross-Atlantic Perspectives*, Berlin: Springer Verlag, pp.299-317,
- Hirota, K., (2007) Passenger Car Ownership Estimation toward 2030 in Japan -BAU Scenario with Socio-Economic Factors-Studies in *Regional Science*, Vol.37, No.1, 2007, 25-39. Japan Society of Regional Science.

- Ingram, G. K. Liu, Z. (1997), Motorization and the Provision of Roads in Countries and Cities. Policy Research Working Paper 1842 (Washington, DC: World Bank).
- Johansson, O. Schipper, L. (1997) Measuring the Long-run Fuel Demand of Cars: Separate Estimations of Vehicle Stock, Mean Fuel Intensity, and Mean Annual Driving Distance, *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol.31, pp.277–292.
- Judge, G. Hill, R. Griffiths, W. Lee, T. (1985), *The Theory and Practice of Econometrics*, 2nd edition, John Wiley and Sons, New York.
- Kwiatkowski, D. Phillips, P. C. B. Schmidt, P. and Y. Shin (1992). Testing the Null Hypothesis of Stationarity Against the Alternative of a Unit Root. How sure are we that economic time series have a unit root?. *Journal of Econometrics*, Elsevier, 54(1-3), pp. 159-178.
- Marchetti, C. (1986) L'automobile en danger de mort lente. *Futuribles*
- Marquardt, D. (1963) An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*. 11, p. 431-441.
- Myung, J. (2000) The importance of complexity in model selection. *Journal of Mathematical Psychology*, 44(1), 190-204.
- Roberts, S. Pashler, H. (2000). How persuasive is a good fit? A comment on theory testing. *Psychological Review*, 107(2), 358-367
- Rudd, E. (1951) The Relationship between the National Income and Vehicle Registrations. Note de recherche, Harmondsworth: Road Research Laboratory, RN/1631.
- Ruud, P. (2000). *An Introduction to Classical Econometric Theory*, Oxford University Press, New York.
- Schunn, C. D. Wallach, D. (2005) Evaluating goodness-of-fit in comparison of models to data. *Psychologie der Kognition: Reden and Vorträge anlässlich der Emeritierung von Werner Tack Germany: University of Saarland Press*.
- Schwarz, G. (1978). Estimating the dimension of a model. *The Annals of Statistics*, 6, 461-464.
- Sharp, C. H. (1973) *Living with the Lorry, A Report*, UK: University of Leicester, 1973.
- Smeed, R. J. (1951) Likely Increases of Road Traffic in Great Britain, Note de Recherche, Harmondsworth: Road Research Laboratory, RN/1518.
- Tanner, J.C. (1958), *An Analysis of Increases in Motor Vehicles in Great Britain*, Research Note RN/1631, Road Research Laboratory, Harmondsworth
- Tanner, J.C. (1978), Long Term Forecasting of Vehicle Ownership and Road Traffic (with discussion), *Journal of the Royal Statistical Society, Series A, Volume 14*, pp14-63
- Train, K. (2002): *Discrete Choice Methods with Simulation*, Cambridge University Press
- Verhulst, P-F (1838) Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement, *Correspondance mathématique et physique* 108, tome X – ou tome II de la 3e série – p. 113-121
- Verhulst, P-F (1845) Recherches mathématiques sur la loi d'accroissement de la population (1^{er} Mémoire), *Nouveaux mémoires de l'Académie Royale des Sciences et Belles-Lettres de Bruxelles*, tome XVIII
- Verhulst, P-F (1846) Note sur la loi d'accroissement de la population, *Bulletins de l'Académie Royale des Sciences et Belles-Lettres de Bruxelles*, tome XIII, n° 4, 3 pages
- Verhulst, P-F (1847) Deuxième mémoire sur la loi d'accroissement de la population, *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences des Lettres et des Beaux-Arts de Belgique* 109, tome XX p.1-32
- Von Bertalanffy, L. (1938). A quantitative theory of organic growth, *Hum. Biol.*, 10, 2, pp. 181-213.
- Wasserman, L. (2000). Bayesian model selection and model averaging. *Journal of Mathematical Psychology*, 44, 92-107.

- Wheelan, G. (2007): Modelling car ownership in Great Britain, *Transportation Research Part A* 41, pp. 205-219
- Zachariadis, T. Samaras, Z. Zierock, K.H. (1995) Dynamic Modeling of Vehicle Populations: An Engineering Approach for Emissions Calculations, Technological Forecasting and Social Change 50, 135-149.
- Zahavi, Y. Ryan, J.M. (1980) Stability of travel components over time, *Transportation Research Record*, n°750, pp. 19-26.

Bibliographie du chapitre 3

- Amatousse, T. Madre, J.-L. (1986) L'automobile en période de crise : le parc et ses utilisations. Rapport CREDOC n° 4 953.
- Andan, O. (1994) Mobilité résidentielle et transports en milieux périurbains. In Duhem B. et al., *Villes et transports, Actes de séminaire, Tome 2, Plan urbain*.
- Beaucire, F. (1996) *Les transports publics et la ville*. Ed. Milan.
- Cauret, L., Crozet, Y., Darbera, R., Faudry, D., Golovtchenko, N., Mirabel, F., Nicolas, J.P., Simon, B. et Zelem M.C. (2001) Parc automobile et effet de serre, agir sur le parc automobile pour réduire l'effet de serre, *Les Cahiers du CLIP N°12*, mars 2001.
- CCTN, (2010) Les comptes des transports en 2009. 47^e rapport à la commission des comptes des transports de la nation, Tome 1. Commissariat général au développement durable. Juin 2010. (Consultable : <http://www.developpementdurable.gouv.fr/IMG/pdf/RefCNTT1.pdf>)
- CEMT, (1999) Assainir le parc automobile. Programmes de renouvellement et de mise à la casse. Conférence Européenne des Ministres des Transports. ISBN 92-821-2251-4
- Collet, R. (2007) *Dynamique de la Motorisation et Usage de l'Automobile en France*. Thèse de doctorat en sciences économiques, Université Paris 1, 280 p.
- Dumont, Y. Leddet, J. (1985) La vignette : l'image d'un parc automobile qui vieillit. *Economie et statistique*, n°173, pp. 49-53.
- Dupuy, G. (1995) *Les territoires de l'automobile*. Collection VILLES. Economica.
- Dupuy, G. (1999) *La dépendance automobile. Symptômes, analyses, diagnostic, traitements*. Anthropos-Economica .
- Dupuy, G. (2006) *La dépendance à l'égard de l'automobile*. Collection « Le point sur », PREDIT, La Documentation Française.
- Gallez, C. (1994a) *Modèles de projection à long terme de la structure du parc et du marché de l'automobile*, Thèse de doctorat en sciences économiques, Université de Paris1.
- Gallez, C. Couturier, N. (2000) *Renouvellement du parc automobile et prospective transport-environnement*. Rapport sur convention ADEME-INRETS n°690-9931-D33. Août.
- Hivert, L. (1996) *Diésélisation et nouveaux diésélistes : les évolutions récentes*, Actes N°59, INRETS, pp. 83-95.
- Hivert, L. (2001) *Le parc automobile des ménages, étude en fin d'année 1999 à partir de la source "Parc Auto" SOFRES*, Rapport de Convention ADEME-INRETS, 180 pages, Août, Arcueil.
- Hivert, L. (2010) *Automobile et automobilité: quelles évolutions de comportements face aux variations du prix des carburants de 2000 à 2008? Pétrole, Mobilité, CO2*, 71 pages.
- Kostopoulou, M. (1997) *Changement technique et politiques publiques : leçon de l'histoire récente de l'énergie*, Thèse de doctorat en sciences économiques, EHESS.
- Lambert, T. Madre, J.-L. (1989) *Le vieillissement du parc automobile se ralentit depuis deux ans*. *Economie et Statistique* n°225, p 39-46

- Prieto, M. (2004) Diésélisation du parc automobile français : essai de modélisation du choix de motorisation en présence d'incertitude et d'effet d'offre. Centre d'Analyse et de Recherche en Economie. Séminaire Doctorant.
- Robin, M. (2010) La motorisation des ménages continue de s'accroître au prix d'un vieillissement du parc automobile. CGDD, SOeS.
- Sauvant, A. (2002) Volume et partage modal du transport de marchandises en France de 1845 à nos jours, notes de synthèse du SES.

Bibliographie du chapitre 4

- Allain, E. Brenac, T. (2001) Modèles linéaires généralisés appliqués à l'étude des nombres d'accidents sur des sites routiers : le modèle de Poisson et ses extensions. Recherche Transports Sécurité n° 72, pages 3 à 18.
- Bourdeau, B. (1998) Evolution du parc automobile français entre 1970 et 2020, Thèse de Doctorat, Université de Chambéry, France, 513 p.
- Cauret, L., Crozet, Y., Darbera, R., Faudry, D., Golovtchenko, N., Mirabel, F., Nicolas, J.P., Simon, B. et Zelem M.C. (2001) Parc automobile et effet de serre, agir sur le parc automobile pour réduire l'effet de serre, Les Cahiers du CLIP N°12, mars 2001.
- Cox, D.R. (1975) Partial Likelihood. Biometrika. Volume n 62, pages 269 à 276.
- Domecq, S. Kret, M. Minodier, C. Michel, P. (2012) Enquêtes nationales sur les événements indésirables graves en 2004 et 2009 : comparaison de taux d'incidence par des modèles de régression dérivés de Poisson. Acte des Journées de Méthodologie Statistique.
- Gallez C. (1994a) Modèles de projection à long terme de la structure du parc et du marché de l'automobile. Thèse de Doctorat, Université de Paris-I, Paris, France, 351 p.
- Gallez, C. Couturier, N. (2001) Renouvellement du parc automobile et prospective transport-environnement, Rapport Ademe-Inrets.
- Hugrel, C. Joumard, R. (2004) Transport routier-Parc, usage et émissions des véhicules en France de 1970 à 2025, rapport Ademe-Inrets (2004), réf Ademe 01-03-035, réf Inrets CO2-02.
- Hugrel, C. Joumard, R. (2006) Directives et facteurs agrégés d'émission des véhicules routiers en France de 1970 à 2025, Rapport LTE n° 0611, Juin 2006
- Jaeger, L. (1999) L'évaluation du risque dans le système des transports routiers par le développement du modèle TAG. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France, 365p.
- Jeger, F. (2001) Une estimation du parc automobile à l'aide des durées de vie des véhicules. Note de synthèses du SES.
- Kaplan, E. L. Meier, P. (1958) Nonparametric estimation from incomplete observations. Journal of American Statistical Association. Volume n° 53, pages 457 à 481.
- Kiefer, N.M. (1988) Economic duration data and hazard functions. Journal of Economic Literature vol. XXVI (juin), pp. 646-679.
- Lacour, S. Joumard, R. (2002) Parc, usage et émissions des véhicules routiers en France de 1970 à 2020. Bron : INRETS, 2002, 89 p.
- Lambert, T. Madre, J.-L. (1989) Le vieillissement du parc automobile se ralentit depuis deux ans. Economie et Statistique n°225, p 39-46
- Moutardier, M. Glaude, M. (1978) Projection de la demande d'automobiles pour 1980 et 1985. Série les collections de l'Insee ménages n°64. N°266 des collections de l'Insee juillet 1978.

- Ntziachristos, L. Mellios, G. Kouridis, C. Papageorgiou, T. Theodosopoulou, M. Samaras, Z. Zierock, K-H. Kouvaritakis., N. Panos, E. Karkatsoulis, P. Schilling, S. Merétei, T. Aladár Bodor, P. Damjanovic, S. Petit, J. (2008). European Database of Vehicle Stock for the Calculation and Forecast of Pollutant and Greenhouse Gases Emissions with REMOVE and COPERT.
- Thomas, C. (1970) 15 millions d'automobiles en 1975. *Économie et Statistiques (INSEE)* n° 16, pp.48-53.
- Zachariadis, T. Samaras, Z. Zierock, K.H. (1995) Dynamic Modeling of Vehicle Populations: An Engineering Approach for Emissions Calculations, Technological Forecasting and Social Change 50, 135-149.

Bibliographie du chapitre 5

- André, M. (1999) Pollution de l'air due aux transports – Statistiques de parc des véhicules et d'activité de transports pour la France. Bron : INRETS, 1999.
- Badin, F. Desbois-Renaudin, M. Trigui, R. Jeanneret, B. Malaquin, B. (2004) Véhicules hybrides, quels choix pour quels gains d'émission de gaz à effet de serre. Congrès Alternatives énergétiques dans l'automobile, Poitiers, 7 et 8 avril 2004.
- Boston Consulting Group (2010) Le coût des batteries pourrait limiter la généralisation des voitures électriques dans la prochaine décennie. (<http://www.bcg.fr/documents/file37609.pdf>)
- Bourdeau, B. (1998) Evolution du parc automobile français entre 1970 et 2020, Thèse de Doctorat, Université de Chambéry, France, 513 p.
- CEMT, (1999) Assainir le parc automobile. Programmes de renouvellement et de mise à la casse. Conférence Européenne des Ministres des Transports. ISBN 92-821-2251-4
- CCFA (2010) L'industrie automobile française. Analyse et Statistiques 2010. CCFA, Paris.
- CCTN, (2010) Les comptes des transports en 2009. 47^e rapport à la commission des comptes des transports de la nation, Tome 1. Commissariat général au développement durable. Juin 2010. (<http://www.developpementdurable.gouv.fr/IMG/pdf/RefCNTT1.pdf>)
- Christidis, P. Hidalgo, I. Soria, A. (2003) Trends in vehicle and fuel technologies: Scenarios for Future Trends. IPTS Technical Report Series, EUR 20748 EN
- Crozet, Y. Lopez-Ruiz, H-G Château, B. Bagard, V. (2008) Programme de recherche consacré à la construction de scénarios de mobilité durable : comment satisfaire les objectifs internationaux de la France en termes d'émissions de gaz à effet de serre et de pollution transfrontière ? Rapport Prédit Enerdata-Let. Convention n°05 03C 0038
- Depoorter, S. Assimon, P-M. (2011) Les véhicules électriques en perspective. Analyse coûts-avantages et demande potentielle. Collection « Études et documents » du Service de l'Économie, de l'Évaluation et de l'Intégration du Développement Durable (SEEIDD) du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD).
- Duval-Destin, M. (2010) Vers un avenir automobile pluriel ? Edito de la Société des Ingénieurs de l'Automobile. Newsletter n°18 déc. 2009 (<http://www.sia.fr/newsletter18/newsletter18.html>)
- Gallez, C. (1994a) Modèles de projection à long terme de la structure du parc et du marché de l'automobile, Thèse de doctorat en sciences économiques, Université de Paris1.

- Hacquemand, S. Chagny, O. Piquard, F. Loire, P. (2010) L'industrie Automobile. Centre Etudes et Prospectives. Groupe Alpha.
- Hugrel, C. Joumard, R. (2004) Transport routier - Parc, usage et émissions des véhicules en France de 1970 à 2025, Référence ADEME 01-03-035, Référence INRETS C02-02
- INPI (2009) Classement des principaux déposants de demande de brevets publiés par la voie nationale pour l'année 2009 consolidés.
- Jeger, F., (2001) Une estimation du parc automobile à l'aide des durées de vie des véhicules. Notes de synthèse du SES.
- Jeuland, N. Montagne, X. (2006) New HCCI/CAI Combustion Process Development: Methodology for Determination of Relevant Fuel Parameters. Oil & Gas Science and Technology - Rev. IFP Volume 61, Numéro 1, Janvier-Février 2006 Dossier: Development and Control of Combustion Systems. Page(s) 85 - 94 DOI (<http://dx.doi.org/10.2516/ogst:2006006x>)
- Lacour, S. Joumard, R. (2002) Parc, usage et émissions des véhicules routiers en France de 1970 à 2020. Bron : INRETS, 2002, 89 p.
- MEET (1999) Methodolgy for calculating transport Emissions and Energy Consumption. Luxembourg : European Comission – DG Transport, ISBN 92-828-6785-4, 360 p.
- Montaru, M. (2009) Contribution à l'évaluation du vieillissement des batteries de puissance utilisées dans les véhicules hybrides selon leurs usages. Thèse de Doctorat en Electrochimie de l'Université de l'Institut Polytechnique de Grenoble. Juillet 2009.
- Nogues, P. (2007) Modèle Transports. EDF pôle Recherche et Développement
- Renault (2011) Fiches techniques environnementales (http://www.renault.com/fr/innovation/eco-technologies/documents_without_moderation/integrale%20environnement.pdf)
- Sauvant, A., (2002) Volume et partage modal du transport de marchandises en France de 1845 à nos jours, notes de synthèse du SES.
- Wirmark, G. Ahmed, A. Hass, H. (2006) Road map with main technology trends and share of engines in Europe. R&D for Europe. EUCAR (European Council for Automotive R&D)

Bibliographie de la conclusion générale

- Amatousse, T. Madre, J.-L. (1986) L'automobile en période de crise : le parc et ses utilisations. Rapport CREDOC n° 4 953.
- Collet, R. (2007) Dynamique de la Motorisation et Usage de l'Automobile en France. Thèse de doctorat en sciences économiques, Université Paris 1, 280 p.
- Cox, D.R. (1975) *Partial Likelihood*. Biometrika. Volume 62, pages 269 à 276.
- Dumont, Y. Leddet, J. (1985) La vignette : l'image d'un parc automobile qui vieillit. Economie et Statistique, n°173, pages 49-53.
- Dupuy, G. (2006). La dépendance à l'égard de l'automobile. Collection « Le point sur », PREDIT, La Documentation Française.
- Gallez, C. (1994a) Modèles de projection à long terme de la structure du parc et du marché de l'automobile, Thèse de doctorat en sciences économiques, Université de Paris1.
- Goodwin, Ph. (2010a) 'What about "peak car" – heresy or revelation?' Local Transport Today , 25 June 2010.
- Goodwin, Ph. (2010b) 'Peak Car –The Nature of the Research Problem' Local Transport Today, 2 July 2010.
- Goodwin, Ph. (2010c) 'Peak Car –The Evidence' Local Transport Today, August 2010.

- Goodwin, Ph. (2010d) 'Peak Car –The Policy Implications' Local Transport Today, 4 September 2010.
- Goodwin, Ph. (2011) 'Peak Car? The International Dimension' Local Transport Today, 5 June 2011.
- Gompertz, B. (1825) On the Nature of the Function Expressive of the Law of Human Mortality, and on a New Mode of Determining the Value of Life Contingencies, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Volume 115, p. 513-583
- Hivert, L. (2010). Automobile et automobilité: quelles évolutions de comportements face aux variations du prix des carburants de 2000 à 2008 ?, « Pétrole, Mobilité, CO2 », 71 p.
- Hivert, L. (2011) Short-term break in the French love for diesel?, Energy Policy, disponible en ligne Nov 2011, à paraître dans le n° spécial « Special Issue : Decades of Diesel » (2012).
- Kaplan, E. L. Meier, P. (1958) Non-parametric estimation from incomplete observations. Journal of American Statistical Association. Volume n° 53, pages 457 à 481.
- Lambert, T. Madre, J.-L. (1989) Le vieillissement du parc automobile se ralentit depuis deux ans. Economie et Statistique n°225, p 39-46
- Marchetti, C. (1986) L'automobile en danger de mort lente. Futuribles
- Moutardier, M. Glaude, M. (1978) Projection de la demande d'automobiles pour 1980 et 1985. Série les collections de l'Insee ménages n°64. N°266 des collections de l'Insee juillet 1978.
- Nemry, F. Leduc, G. Mongelli, I. Uihlein, A. (2008) Environmental Improvement of Passenger Cars (IMPRO-car). EUR 23038 EN – 2008.
- Robin, M. (2010) La motorisation des ménages continue de s'accroître au prix d'un vieillissement du parc automobile. CGDD, SOeS.
- Tanner, J.C. (1978), Long Term Forecasting of Vehicle Ownership and Road Traffic (with discussion), Journal of the Royal Statistical Society, Series A, Volume 14, pp14-63.
- Thomas, C. (1970) 15 millions d'automobiles en 1975. Économie et Statistiques n° 16, pages 48 à 53.
- Verhulst, P-F (1838) Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement, Correspondance mathématique et physique 108, tome X – ou tome II de la 3e série – pages 113 à 121
- Verhulst, P-F (1845) Recherches mathématiques sur la loi d'accroissement de la population (1^{er} Mémoire), Nouveaux mémoires de l'Académie Royale des Sciences et Belles-Lettres de Bruxelles, tome XVIII
- Verhulst, P-F (1846) Note sur la loi d'accroissement de la population, Bulletins de l'Académie Royale des Sciences et Belles-Lettres de Bruxelles, tome XIII, n° 4, 3 pages
- Verhulst, P-F (1847) Deuxième mémoire sur la loi d'accroissement de la population, Mémoires de l'Académie Royale des Sciences des Lettres et des Beaux-Arts de Belgique 109, tome XX p.1-32
- Von Bertalanffy, L. (1938). A quantitative theory of organic growth, Hum. Biol., 10, 2, pp. 181-213.

Table des figures par chapitre

Figures du chapitre 1

| | |
|--|----|
| FIGURE 1- 1 CIRCULATION DES VEHICULES PARTICULIERS EN FRANCE DE 1990 A 2010 EN MILLIARDS DE VEHICULES- KILOMETRES. SOURCE : CCTN (2010)..... | 27 |
| FIGURE 1- 2 PARCOURS ANNUELS MOYENS DES VEHICULES IMMATICULES EN FRANCE POUR LA PERIODE 1990 A 2010. SOURCE : CCTN (2010) | 27 |
| FIGURE 1- 3 PARCS ANNUELS MOYENS DES VEHICULES IMMATICULES EN FRANCE POUR LA PERIODE 1990 A 2010. SOURCE : CCTN (2010)..... | 28 |
| FIGURE 1- 4 EVOLUTION DE LA MASSE MOYENNE DES VEHICULES PARTICULIERS ENTRE 1984 A 2007 PAR TYPE DE MOTORISATION. SOURCE : ADEME..... | 29 |
| FIGURE 1- 5 EVOLUTION DE LA PUISSANCE MASSIQUE MOYENNE (PUISSANCE MOYENNE PAR TONNE) DES VEHICULES PARTICULIERS ENTRE 1984 A 2007 PAR TYPE DE MOTORISATION. SOURCE : ADEME. | 30 |
| FIGURE 1- 6 TAILLE DU FICHIER MENAGE PAR VAGUE DE PANEL PARC AUTO..... | 41 |
| FIGURE 1- 7 TAILLE DU FICHIER VEHICULE PAR VAGUE DE PANEL PARC AUTO..... | 42 |

Figures du chapitre 2

| | |
|---|----|
| FIGURE 2- 1 SCHEMA LOGISTIQUE DE DIFFUSION DE L'EQUIPEMENT DES MENAGES EN AUTOMOBILE AVEC SEUIL DE SATURATION DE L'EQUIPEMENT.... | 51 |
| FIGURE 2- 2 TAUX DE MOTORISATION PAR INDIVIDU DE 19 ANS ET PLUS DU 1ER JANVIER 1956 AU 1ER JANVIER 2010. SOURCES : CCFA, INSEE | 54 |
| FIGURE 2- 3 TAUX DE MOTORISATION PAR MENAGE DU 1ER JANVIER 1960 AU 1ER JANVIER 2010. SOURCES : CCFA, INSEE | 54 |
| FIGURE 2- 4 (A) ET (B) : LA DIRECTION DES PAS SUIV LA TANGENTE..... | 60 |
| FIGURE 2- 5 (A) ET (B) : LA LONGUEUR DES PAS EST INVERSEMENT PROPORTIONNELLE A LA COURBURE..... | 61 |
| FIGURE 2- 6 EXEMPLE DE FONCTION SCR ADMETTANT UN MINIMUM LOCAL..... | 62 |
| FIGURE 2- 7 AJUSTEMENT DU TAUX DE MOTORISATION PAR MENAGE PAR UNE LOI LOGISTIQUE | 70 |
| FIGURE 2- 8 AJUSTEMENT DU TAUX DE MOTORISATION PAR MENAGE PAR UNE LOI DE GOMPERTZ..... | 70 |
| FIGURE 2- 9 AJUSTEMENT DU TAUX DE MOTORISATION PAR MENAGE PAR UNE LOI DE TANNER..... | 71 |
| FIGURE 2- 10 AJUSTEMENT DU TAUX DE MOTORISATION PAR MENAGE PAR UNE LOI DE VON BERTALANFFY | 72 |
| FIGURE 2- 11 AJUSTEMENTS DES TAUX DE MOTORISATION PAR MENAGE ET PROJECTION A 2050..... | 73 |
| FIGURE 2- 12 AJUSTEMENT DES TAUX DE MOTORISATION PAR INDIVIDU DE 19 ANS ET PLUS EN FRANCE PAR UNE LOI LOGISTIQUE | 74 |
| FIGURE 2- 13 AJUSTEMENT DES TAUX DE MOTORISATION PAR INDIVIDU DE 19 ANS ET PLUS EN FRANCE PAR UNE LOI DE GOMPERTZ | 74 |
| FIGURE 2- 14 AJUSTEMENT DES TAUX DE MOTORISATION PAR INDIVIDU DE 19 ANS ET PLUS EN FRANCE PAR UNE LOI DE TANNER | 76 |
| FIGURE 2- 15 AJUSTEMENT DES TAUX DE MOTORISATION PAR INDIVIDU DE 19 ANS ET PLUS EN FRANCE PAR UNE LOI DE VON BERTALANFFY | 76 |
| FIGURE 2- 16 PREVISIONS DES NIVEAUX DE MOTORISATION PAR INDIVIDUS ET PROJECTION A 2050 | 77 |
| FIGURE 2- 17 AJUSTEMENT DES TAUX DE MOTORISATION PAR INDIVIDU DE 19 ANS ET PLUS EN FRANCE PAR UNE LOI DE TANNER INCLUANT L'INDICE D'EVOLUTION DU SALAIRE MOYEN, LE TAUX DE VARIATION DU PIB ET LE TAUX DE VARIATION DES DEPENSES DE CONSOMMATION FINALE | 84 |

Figures du chapitre 3

| | |
|---|-----|
| FIGURE 3- 1 EVOLUTION DE L'AGE MOYEN DU PARC AUTOMOBILE ENTRE 1984 ET 2008. SOURCE : PANEL PARC-AUTO-SOFRES | 93 |
| FIGURE 3- 2 MOYENNE PAR ANNEE DU KILOMETRAGE AFFICHE AU COMPTEUR. SOURCE : VAGUES ANNUELLES « PARC AUTO » | 94 |
| FIGURE 3- 3 MOYENNES ANNUELLES DU COUPLE DE POINTS : AGE EN MOIS (ABSCISSES), KILOMETRAGE AU COMPTEUR (ORDONNEE). SOURCE : VAGUES ANNUELLES « PARC AUTO » | 95 |
| FIGURE 3- 4 PROPORTION DES VEHICULES PAR TRANCHE D'AGE (EN MOIS). SOURCE : VAGUES ANNUELLES « PARC AUTO »..... | 96 |
| FIGURE 3- 5 PROPORTION DES VEHICULES PAR TRANCHES DE KILOMETRAGE COMPTEUR. SOURCE : VAGUES ANNUELLES « PARC AUTO » | 96 |
| FIGURE 3- 6 PROPORTION DES VEHICULES A MOTORISATION DIESEL DANS LE PARC FRANÇAIS. SOURCE : « PARC-AUTO » | 100 |
| FIGURE 3- 7 AGE DES VEHICULES PAR TYPE DE MOTORISATION (DIESEL/ESSENCE) DANS LE PARC FRANÇAIS. SOURCE : « PARC AUTO »..... | 102 |
| FIGURE 3- 8 AJUSTEMENT DES TAUX DE DIESELISATION DU PARC AUTOMOBILE PAR UNE LOI LOGISTIQUE | 104 |
| FIGURE 3- 9 AJUSTEMENT DES TAUX DE DIESELISATION DU PARC AUTOMOBILE PAR UNE LOI DE GOMPERTZ..... | 105 |
| FIGURE 3- 10 MODELE THEORIQUE DE PREVISION DE LA DIESELISATION DU PARC AUTOMOBILE PAR UNE LOI LOGISTIQUE..... | 105 |
| FIGURE 3- 11 DIFFUSION DES VEHICULES DIESEL DANS LE PARC AUTOMOBILE (PROPORTION D'IMMATICULATIONS DE VEHICULES DIESEL DANS LES IMMATICULATIONS TOTALES) | 107 |
| FIGURE 3- 12 AGE MOYEN DES VEHICULES EN FONCTION DU STATUT DANS LE MENAGE (UNIQUE, PRINCIPAL OU SECONDAIRE).SOURCE : « PARC AUTO » | 108 |
| FIGURE 3- 13 IMMATICULATIONS DE VEHICULES PARTICULIERS NEUFS AU 31 DECEMBRE EN FRANCE ENTRE 1956 ET 2009. SOURCE : CCFA | 112 |
| FIGURE 3- 14 COUPLES DE POINTS AGE KILOMETRAGE CALCULES POUR CHAQUE VEHICULE ET POUR CHAQUE ANNEE DU PANEL PARC AUTO | 115 |

| | |
|--|-----|
| FIGURE 3- 15 COUPLES DE POINTS AGE KILOMETRAGE CALCULES POUR CHAQUE VEHICULE DE L'ANNEE 2008 DU PANEL PARC AUTO (DERNIERE VAGUE DU PANEL POUR LE MOMENT) | 116 |
| FIGURE 3- 16 HISTOGRAMME BIVARIE CALCULE POUR LA VAGUE 2008 DU PANEL « PARC AUTO » | 117 |
| FIGURE 3- 17 (A) ET (B) – DENSITES BIVARIEES (VU FACE (A), VUE DESSUS (B)) CALCULEES POUR LA VAGUE 2008 DU PANEL « PARC AUTO » | 118 |
| FIGURE 3- 18 DISTRIBUTION BIVARIEE REPRESENTEE A L'AIDE DE COURBES DE NIVEAUX POUR LA VAGUE 2008 | 118 |
| FIGURE 3- 19 DISTRIBUTIONS BIVARIEES REPRESENTEES A L'AIDES DE COURBES DE NIVEAUX POUR LES VAGUES 1985 A 2005 DU PANEL « PARC AUTO » | 119 |
| FIGURE 3- 20 CENTILES DU COUPLE AGE-KILOMETRAGE PAR PERIODES DE 5 ANNEES DEPUIS 1985. | 122 |
| FIGURE 3- 21 POPULATION DE VEHICULES DE PLUS DE 20 ANS (ESSENCE : CERCLES BLEUS ET DIESEL : CROIX ROUGES) POUR LA VAGUE 2000 | 123 |
| FIGURE 3- 22 POPULATION DE VEHICULES DE PLUS DE 20 ANS (ESSENCE : CERCLES BLEUS ET DIESEL : CROIX ROUGES) POUR LA VAGUE 2001 | 124 |
| FIGURE 3- 23 POPULATION DE VEHICULES DE PLUS DE 20 ANS (ESSENCE : CERCLES BLEUS ET DIESEL : CROIX ROUGES) POUR LA VAGUE 2002 | 124 |
| FIGURE 3- 24 POPULATION DE VEHICULES DE PLUS DE 20 ANS (ESSENCE : CERCLES BLEUS ET DIESEL : CROIX ROUGES) POUR LA VAGUE 2003 | 125 |
| FIGURE 3- 25 POPULATION DE VEHICULES DE PLUS DE 20 ANS (ESSENCE : CERCLES BLEUS ET DIESEL : CROIX ROUGES) POUR LA VAGUE 2004 | 125 |
| FIGURE 3- 26 POPULATION DE VEHICULES DE PLUS DE 20 ANS (ESSENCE : CERCLES BLEUS ET DIESEL : CROIX ROUGES) POUR LA VAGUE 2005 | 126 |
| FIGURE 3- 27 POPULATION DE VEHICULES DE PLUS DE 20 ANS (ESSENCE : CERCLES BLEUS ET DIESEL : CROIX ROUGES) POUR LA VAGUE 2006 | 126 |
| FIGURE 3- 28 POPULATION DE VEHICULES DE PLUS DE 20 ANS (ESSENCE : CERCLES BLEUS ET DIESEL : CROIX ROUGES) POUR LA VAGUE 2007 | 127 |
| FIGURE 3- 29 POPULATION DE VEHICULES DE PLUS DE 20 ANS (ESSENCE : CERCLES BLEUS ET DIESEL : CROIX ROUGES) POUR LA VAGUE 2008 | 127 |
| FIGURE 3- 30 KILOMETRAGE AU COMPTEUR MOYEN PAR CATEGORIE DE MOTORISATION (ESSENCE, DIESEL) ENTRE 1984 ET 2008. SOURCE : PARC AUTO..... | 129 |
| FIGURE 3- 31 DISTRIBUTIONS BIVARIEES REPRESENTEES A L'AIDE DE COURBES DE NIVEAUX POUR LES VAGUES 1985 A 1995 DU PANEL « PARC AUTO » | 130 |
| FIGURE 3- 32 DISTRIBUTIONS BIVARIEES REPRESENTEES A L'AIDE DE COURBES DE NIVEAUX POUR LES VAGUES 2002 A 2007 DU PANEL « PARC AUTO » | 131 |
| FIGURE 3- 33 VALEURS MEDIANES DES PROBABILITES JOINTES PAR TYPE DE MOTORISATION ET POUR LES ANNEES 1985, 1995, 2005 ET 2008..... | 133 |
| FIGURE 3- 34 LES DETERMINANTS ASSOCIES AU VIEILLISSEMENT DU PARC AUTOMOBILE FRANÇAIS..... | 134 |

Figures du chapitre 4

| | |
|---|-----|
| FIGURE 4- 1 TAUX DE SURVIE LONGITUDINAUX ANNUELS POUR LES GENERATIONS 1984, 1985, 1986 ET 1987. SOURCE « PARC AUTO » | 144 |
| FIGURE 4- 2 TAUX DE SURVIE LONGITUDINAUX ANNUELS POUR LES GENERATIONS 1988, 1989, 1990 ET 1991. SOURCE « PARC AUTO » | 145 |
| FIGURE 4- 3 TAUX DE SURVIE LONGITUDINAUX ANNUELS POUR LES GENERATIONS 1992, 1993, 1994 ET 1995. SOURCE « PARC AUTO » | 145 |
| FIGURE 4- 4 TAUX DE SURVIE LONGITUDINAUX ANNUELS POUR LES GENERATIONS 1996, 1997, 1998 ET 1999. SOURCE « PARC AUTO » | 146 |
| FIGURE 4- 5 MOYENNE DE TAUX DE SURVIE LONGITUDINAUX ANNUELS PAR CATEGORIES DE GENERATIONS. SOURCE « PARC AUTO » | 146 |
| FIGURE 4- 6 TAUX DE SURVIE TRANSVERSAUX POUR LES ANNEES 1984, 1985, 1986 ET 1987. SOURCE « PARC AUTO »..... | 149 |
| FIGURE 4- 7 TAUX DE SURVIE TRANSVERSAUX POUR LES ANNEES 1988, 1989, 1990 ET 1991. SOURCE « PARC AUTO »..... | 149 |
| FIGURE 4- 8 TAUX DE SURVIE TRANSVERSAUX POUR LES ANNEES 1992, 1993, 1994 ET 1995. SOURCE « PARC AUTO »..... | 150 |
| FIGURE 4- 9 TAUX DE SURVIE TRANSVERSAUX POUR LES ANNEES 1996, 1997, 1998 ET 1999. SOURCE « PARC AUTO »..... | 150 |
| FIGURE 4- 10 TAUX DE SURVIE TRANSVERSAUX POUR LES ANNEES 2000, 2001, 2002 ET 2003. SOURCE « PARC AUTO »..... | 151 |
| FIGURE 4- 11 TAUX DE SURVIE TRANSVERSAUX POUR LES ANNEES 2004, 2005, 2006, 2007 ET 2008. SOURCE « PARC AUTO »..... | 151 |
| FIGURE 4- 12 MOYENNES DE TAUX DE SURVIE TRANSVERSAUX PAR CATEGORIES D'ANNEES. SOURCE « PARC AUTO »..... | 152 |
| FIGURE 4- 13 AJUSTEMENTS DES TAUX DE SURVIE TRANSVERSAUX POUR L'ANNEE 2008 (GAUCHE) ET MOYENNE TOTALE (1984 A 2008) A UNE LOI DE SURVIE LOG-NORMALE..... | 157 |
| FIGURE 4- 14 AJUSTEMENTS DES TAUX DE SURVIE TRANSVERSAUX MOYENS DES ANNEES 1984 A 1987 (GAUCHE) ET 1988 A 1991 (DROITE) A UNE LOI DE SURVIE LOG-NORMALE | 157 |
| FIGURE 4- 15 AJUSTEMENTS DES TAUX DE SURVIE TRANSVERSAUX MOYENS DES ANNEES 1992 A 1995 (GAUCHE) ET 1996 A 1999 (DROITE) A UNE LOI DE SURVIE LOG-NORMALE | 157 |
| FIGURE 4- 16 AJUSTEMENTS DES TAUX DE SURVIE TRANSVERSAUX MOYENS DES ANNEES 2000 A 2003 (GAUCHE) ET 2004 A 2008 (DROITE) A UNE LOI DE SURVIE LOG-NORMALE | 158 |
| FIGURE 4- 17 AJUSTEMENTS DES TAUX DE SURVIE TRANSVERSAUX POUR L'ANNEE 2008 (DROITE) ET MOYENNE 1984 A 2008 A UNE LOI DE SURVIE LOG-LOGISTIQUE | 159 |
| FIGURE 4- 18 AJUSTEMENTS DES TAUX DE SURVIE TRANSVERSAUX MOYENS DES ANNEES 1984 A 1987(GAUCHE) ET 1988 A 1991 (DROITE) A UNE LOI DE SURVIE LOG-LOGISTIQUE | 159 |
| FIGURE 4- 19 AJUSTEMENTS DES TAUX DE SURVIE TRANSVERSAUX MOYENS DES ANNEES 1992 A 1995(GAUCHE) ET 1996 A 1999 (DROITE) A UNE LOI DE SURVIE LOG-LOGISTIQUE | 160 |
| FIGURE 4- 20 AJUSTEMENTS DES TAUX DE SURVIE TRANSVERSAUX MOYENS DES ANNEES 2000 A 2003(GAUCHE) ET 2004 A 2008 (DROITE) A UNE LOI DE SURVIE LOG-LOGISTIQUE | 160 |

| | |
|--|-----|
| FIGURE 4- 21 EVOLUTION DU PARAMETRE ALPHA ESTIME A PARTIR DE MOYENNES DE TAUX DE SURVIE TRANSVERSAUX PAR CATEGORIES D'ANNEES. SOURCE « PARC AUTO » | 161 |
| FIGURE 4- 22 EVOLUTION DU PARAMETRE BETA ET DE LA DUREE DE VIE MEDIANE ESTIMEE SUR DES MOYENNES DE TAUX DE SURVIE TRANSVERSAUX PAR CATEGORIES D'ANNEES. SOURCE « PARC AUTO » | 162 |
| FIGURE 4- 23 AJUSTEMENTS DES TAUX DE SURVIE TRANSVERSAUX MOYENS DES ANNEES 1984 A 1987(GAUCHE) ET 1988 A 1991 (DROITE) A UNE LOI DE SURVIE DE WEIBULL..... | 163 |
| FIGURE 4- 24: AJUSTEMENTS DES TAUX DE SURVIE TRANSVERSAUX MOYENS DES ANNEES 1992 A 1995 (GAUCHE) ET 1996 A 1999 (DROITE) A UNE LOI DE SURVIE DE WEIBULL..... | 163 |
| FIGURE 4- 25 AJUSTEMENTS DES TAUX DE SURVIE TRANSVERSAUX MOYENS DES ANNEES 2000 A 2003 (GAUCHE) ET 2003 A 2008 (DROITE) A UNE LOI DE SURVIE DE WEIBULL..... | 163 |
| FIGURE 4- 26 AJUSTEMENTS DES TAUX DE SURVIE TRANSVERSAUX MOYENS DES ANNEES 1984 A 2008 (GAUCHE) ET POUR 2008 (DROITE) A UNE LOI DE SURVIE DE WEIBULL..... | 164 |
| FIGURE 4- 27 EVOLUTION TEMPORELLE DES LOIS DE SURVIE TRANSVERSALES PAR PERIODES DE 5 ANNEES DEPUIS 1985..... | 164 |
| FIGURE 4- 28 AJUSTEMENTS DES TAUX DE SURVIE LONGITUDINAUX MOYENS DES ANNEES 1984 A 1987(GAUCHE) ET 1988 A 1991 (DROITE) A UNE LOI DE SURVIE DE WEIBULL..... | 166 |
| FIGURE 4- 29 AJUSTEMENTS DES TAUX DE SURVIE LONGITUDINAUX MOYENS DES ANNEES 1992 A 1995 (GAUCHE) ET 1996 A 1999 (DROITE) A UNE LOI DE SURVIE DE WEIBULL..... | 167 |
| FIGURE 4- 30 AJUSTEMENTS DES TAUX DE SURVIE LONGITUDINAUX MOYENS DES ANNEES 2000 A 2003 (GAUCHE) ET 1984 A 2008 (DROITE) A UNE LOI DE SURVIE DE WEIBULL..... | 167 |
| FIGURE 4- 31 AJUSTEMENTS EFFECTUES AVEC TROIS FORMES DE LOIS DE SURVIE SUR LA MOYENNE DES TAUX DE SURVIE TRANSVERSAUX ENTRE 1984 ET 2008..... | 168 |
| FIGURE 4- 32 COEFFICIENTS DE DETERMINATION POUR LES TAUX DE SURVIE TRANSVERSAUX AJUSTES PAR LES TROIS MODELES PARAMETRIQUES | 170 |
| FIGURE 4- 33 STATISTIQUES DE FISHER POUR LES TAUX DE SURVIE TRANSVERSAUX AJUSTES PAR LES TROIS MODELES PARAMETRIQUES | 170 |
| FIGURE 4- 34 TAUX DE SURVIE TRANSVERSAUX DES VEHICULES ESSENCE ET DIESELS POUR LES ANNEES 2001 ET 2002 | 172 |
| FIGURE 4- 35 TAUX DE SURVIE TRANSVERSAUX DES VEHICULES ESSENCE ET DIESELS POUR LES ANNEES 2007 ET 2008 | 172 |
| FIGURE 4- 36 MOYENNE DES TAUX DE SURVIE TRANSVERSAUX DES VEHICULES ESSENCE ET DIESELS POUR LES ANNEES 2000 A 2008 | 173 |
| FIGURE 4- 37 TAUX DE SURVIE TRANSVERSAUX MOYENS DES VEHICULES ESSENCE PAR PERIODES DE 3 ANNEES ENTRE 2000 ET 2008 | 174 |
| FIGURE 4- 38 TAUX DE SURVIE TRANSVERSAUX MOYENS DES VEHICULES DIESEL PAR PERIODES DE 3 ANNEES ENTRE 2000 ET 2008..... | 174 |
| FIGURE 4- 39 LOI DE WEIBULL AJUSTEE SUR DES TAUX DE SURVIE TRANSVERSAUX MOYENS POUR LES ANNEES 2000 A 2008 PAR TYPE D'ENERGIES (DIESEL ET ESSENCE)..... | 176 |
| FIGURE 4- 40 EVOLUTION DE LA DUREE DE VIE MEDIANE PAR CATEGORIES DE MOTORISATION ESTIMEE SUR DES MOYENNES DE TAUX DE SURVIE TRANSVERSAUX PAR CATEGORIES D'ANNEES. SOURCE « PARC AUTO »..... | 177 |
| FIGURE 4- 41 EVOLUTION TEMPORELLE DE LOIS DE SURVIE POUR LES VEHICULES DIESEL | 178 |
| FIGURE 4- 42 EVOLUTION TEMPORELLE DE LOIS DE SURVIE POUR LES VEHICULES ESSENCE..... | 179 |
| FIGURE 4- 43 COMPARAISON DE LA DUREE DE VIE DES VEHICULES PAR TYPE DE MOTORISATION SUR LA PERIODE 2000 A 2002 | 180 |
| FIGURE 4- 44 COMPARAISON DE LA DUREE DE VIE DES VEHICULES PAR TYPE DE MOTORISATION SUR LA PERIODE 2003 A 2005 | 180 |
| FIGURE 4- 45 COMPARAISON DE LA DUREE DE VIE DES VEHICULES PAR TYPE DE MOTORISATION SUR LA PERIODE 2006 A 2008 | 181 |
| FIGURE 4- 46 LOIS DE SURVIES CALEES SUR LE PARC NATIONAL PAR PERIODES DE 5 ANNEES DEPUIS 1985. | 184 |
| FIGURE 4- 47 EVOLUTION TEMPORELLE DU PARAMETRE BETA, DE LA DUREE DE VIE MOYENNE ET MEDIANE DE 1984 A 2008 PAR CALAGE DES IMMATRICULATIONS ET DU VOLUME DU PARC PAR UNE LOI DE SURVIE WEIBULL | 185 |
| FIGURE 4- 48 COMPARAISON DES LOIS DE SURVIE ESSENCE ET DIESEL OBTENUS PAR CALAGE DES IMMATRICULATIONS SUR LE VOLUME DU PARC AUTOMOBILE PAR UNE LOI DE WEIBULL POUR L'ANNEE 2008 | 188 |
| FIGURE 4- 49 DETERMINANTS DE L'ALLONGEMENT DE LA DUREE DE VIE ET DE L'ACCENTUATION DU VIEILLISSEMENT DU PARC. EN ENCADRE ROUGE LES FACTEURS DEMOGRAPHIQUES DONNANT LE SOLDE NATUREL DU PARC. NB : CETTE FIGURE N'INDIQUE NI L'INTENSITE DE CHACUN DES FACTEURS NI LES EVENTUELLES BOUCLES DE RETROACTION. | 197 |

Figures du chapitre 5

| | |
|--|-----|
| FIGURE 5- 1 MODELE LOGISTIQUE DE PROJECTION DE LA PART DE MARCHÉ (POURCENTAGE DES IMMATRICULATIONS TOTALES) DES VEHICULES A MOTEUR DIESEL..... | 204 |
| FIGURE 5- 2 MODELE THEORIQUE DE PROJECTION DE LA PART DE MARCHÉ DES VEHICULES ESSENCE (Y COMPRIS GPL) | 205 |
| FIGURE 5- 3 MODELE DE PROJECTION DE LA STRUCTURE ANNUELLE DU PARC PAR TYPE DE MOTORISATION ET PAR ANNEE DE CONSTRUCTION A L'HORIZON 2020. SCENARIO « SANS RUPTURE »..... | 207 |
| FIGURE 5- 4 POSSIBILITES TECHNOLOGIQUES ALTERNATIVES AUX ENERGIES FOSSILES. SOURCE : BIPE | 209 |
| FIGURE 5- 5 PREVISIONS DES PARTS DE MARCHES PAR CATEGORIE TECHNOLOGIQUES POUR LES VEHICULES PARTICULIERS ET UTILITAIRES EN EUROPE. SCENARIO WIMARK ET AL. (2006) POUR EUCAR | 216 |

| | |
|---|-----|
| FIGURE 5- 6 MODELE LOGISTIQUE DE PROJECTION DE LA PART DE MARCHÉ (POURCENTAGE DES IMMATRICULATIONS TOTALES) DES VEHICULES A MOTEURS HYBRIDES ET ELECTRIQUES. BASE SUR LES HYPOTHESES DE DEPOORTER ET ASSIMON | 221 |
| FIGURE 5- 7 PROJECTION DES PARTS DE MARCHES DES VEHICULES A MOTEURS HYBRIDES ET ELECTRIQUES | 221 |
| FIGURE 5- 8 LOIS DE SURVIES UTILISEES POUR LES VEHICULES DIESEL ESSENCE ET HYBRIDE (+ TOUT-ELECTRIQUE)..... | 222 |
| FIGURE 5- 9 MODELE DE PROJECTION DE LA STRUCTURE ANNUELLE DU PARC PAR TYPE DE MOTORISATION ET PAR ANNEE DE CONSTRUCTION A L'HORIZON 2020. BASE SUR L'HYPOTHESE DE DEPLOIEMENT DEPOORTER ET ASSIMON | 223 |
| FIGURE 5- 10 MODELE LOGISTIQUE DE PROJECTION DE LA PART DE MARCHÉ (POURCENTAGE DES IMMATRICULATIONS TOTALES) DES VEHICULES A MOTEURS HYBRIDES ET ELECTRIQUES. BASE SUR LES VALEURS DUVAL-DESTIN..... | 225 |
| FIGURE 5- 11 PROJECTION DES PARTS DE MARCHES DES VEHICULES A MOTEURS THERMIQUES ET HYBRIDES (Y COMPRIS TOUT-ELECTRIQUES ET PAC). | 225 |
| FIGURE 5- 12 MODELE DE PROJECTION DE LA STRUCTURE ANNUELLE DU PARC EN MILLIERS DE VEHICULES PAR TYPE DE MOTORISATION ET PAR ANNEE DE CONSTRUCTION A L'HORIZON 2020. SELON L'HYPOTHESE DE DEPLOIEMENT DEPOORTER ET ASSIMON | 226 |
| FIGURE 5- 13 PROJECTION DE LA DISTRIBUTION ANNUELLE DU PARC PAR TYPE DE MOTORISATION A L'HORIZON 2020. BASE SUR L'HYPOTHESE DE DEPLOIEMENT DEPOORTER ET ASSIMON | 228 |
| FIGURE 5- 14 PROJECTION DE LA STRUCTURE DU PARC EN MILLIERS DE VEHICULES PAR TYPE DE MOTORISATION ET PAR CATEGORIES EURO A L'HORIZON 2020. SELON L'HYPOTHESE DE DEPLOIEMENT DEPOORTER ET ASSIMON. | 228 |
| FIGURE 5- 15 PROJECTION DE LA DISTRIBUTION ANNUELLE DU PARC PAR TYPE DE MOTORISATION A L'HORIZON 2020. SELON L'HYPOTHESE DE DEPLOIEMENT DUVAL-DESTIN MODIFIEE. | 229 |
| FIGURE 5- 16 PROJECTION DE LA STRUCTURE DU PARC EN MILLIERS DE VEHICULES PAR TYPE DE MOTORISATION ET PAR CATEGORIES EUROS A L'HORIZON 2020. BASE SUR L'HYPOTHESE DE DEPLOIEMENT DUVAL-DESTIN MODIFIEE. | 230 |
| FIGURE 5- 17 VENTILATION DE LA STRUCTURE DES VENTES DE VEHICULES A MOTEUR ESSENCE PAR CATEGORIES DE CYLINDREE ENTRE 2003 ET 2007. SOURCE : FCA, SOES. | 232 |
| FIGURE 5- 18 VENTILATION DE LA STRUCTURE DES VENTES DE VEHICULES A MOTEUR DIESEL PAR CATEGORIES DE CYLINDREE ENTRE 2003 ET 2007. SOURCE : FCA, SOES. | 232 |
| FIGURE 5- 19 REPARTITION DU VOLUME DU PARC DE VEHICULES A MOTEUR ESSENCE PAR ANNEE DE CONSTRUCTION SELON 3 CATEGORIES DE CYLINDREES A L'HORIZON 2020. BASE SUR LES HYPOTHESES DE DEPLOIEMENT DEPOORTER ET ASSIMON. | 234 |
| FIGURE 5- 20 REPARTITION DU VOLUME DU PARC DE VEHICULES A MOTEUR ESSENCE PAR ANNEE DE CONSTRUCTION SELON 3 CATEGORIES DE CYLINDREES A L'HORIZON 2020. BASE SUR LES HYPOTHESES DE DEPLOIEMENT DEPOORTER ET ASSIMON. | 235 |
| FIGURE 5- 21 REPARTITION DU VOLUME DU PARC DE VEHICULES A MOTEUR HYBRIDES PAR ANNEE DE CONSTRUCTION SELON 3 CATEGORIES DE CYLINDREES A L'HORIZON 2020. BASE SUR LES HYPOTHESES DE DEPLOIEMENT DEPOORTER ET ASSIMON. | 235 |
| FIGURE 5- 22 REPARTITION DU VOLUME DU PARC DE VEHICULES A MOTEUR ESSENCE PAR ANNEE DE CONSTRUCTION SELON 3 CATEGORIES DE CYLINDREES A L'HORIZON 2020. BASE SUR LES HYPOTHESES DE DEPLOIEMENT DUVAL-DESTIN. | 237 |
| FIGURE 5- 23 REPARTITION DU VOLUME DU PARC DE VEHICULES A MOTEUR DIESEL PAR ANNEE DE CONSTRUCTION SELON 3 CATEGORIES DE CYLINDREES A L'HORIZON 2020. BASE SUR LES HYPOTHESES DE DEPLOIEMENT DUVAL-DESTIN..... | 238 |
| FIGURE 5- 24 REPARTITION DU VOLUME DU PARC DE VEHICULES A MOTORISATION HYBRIDE PAR ANNEE DE CONSTRUCTION SELON 3 CATEGORIES DE CYLINDREES A L'HORIZON 2020. BASE SUR LES HYPOTHESES DE DEPLOIEMENT DE DUVAL-DESTIN. | 238 |

Tableaux par chapitres

Tableaux du chapitre 1

| | |
|--|----|
| TABLEAU 1- 1 LIMITES D'ÉMISSIONS UE POUR LES VEHICULES PARTICULIERS. SOURCE : ADEME..... | 31 |
| TABLEAU 1- 2 PARC AUTOMOBILE DES VEHICULES PARTICULIERS EN MILLIERS D'UNITES AU 1 ^{ER} JANVIER POUR LA PERIODE 2000 A 2010. SOURCE CCFA, SOeS FICHIER CENTRAL DES AUTOMOBILES..... | 35 |
| TABLEAU 1- 3 FOURCHETTE DANS LAQUELLE LES COEFFICIENTS MULTIPLICATEURS (CALCULES PAR RAPPORT AU TARIF DE BASE APPLICABLE AUX VEHICULES DE 1 A 4 CV) PEUVENT ETRE MODULES (ARTICLE 1599 G DU CODE GENERAL DES IMPOTS) | 36 |

Tableaux du chapitre 2

| | |
|--|----|
| TABLEAU 2- 1 EXPRESSION MATHÉMATIQUE DES MODELES RETENUS..... | 56 |
| TABLEAU 2- 2 RESULTATS DES AJUSTEMENTS POUR LES TAUX DE MOTORISATION PAR MENAGE..... | 68 |
| TABLEAU 2- 3 RESULTATS DES AJUSTEMENTS POUR LES TAUX DE MOTORISATION PAR INDIVIDUS DE 19 ANS ET PLUS..... | 69 |
| TABLEAU 2- 4 PROJECTIONS A MOYEN ET LONG TERME DES TAUX DE MOTORISATION PAR MENAGE | 73 |
| TABLEAU 2- 5 PROJECTIONS A MOYEN ET LONG TERME DES TAUX DE MOTORISATION PAR INDIVIDUS | 77 |
| TABLEAU 2- 6 PROJECTIONS A MOYEN ET LONG TERME DES TAUX DE MOTORISATION PAR INDIVIDUS | 78 |
| TABLEAU 2- 7 COMPARAISON DES ESTIMATIONS DE TAUX DE MOTORISATION PAR MENAGES DES MODELES TANNER AJUSTES SUR LES DONNEES DE PERIODES DIFFERENTES (PRE 2001 : 1956 A 2001 ET COMPLETE 1956 A 2010) | 79 |
| TABLEAU 2- 8 AJUSTEMENTS INTRODUISANT DES VARIABLES ECONOMIQUES AU MODELE MOTORISATION DES INDIVIDUS..... | 83 |

Tableaux du chapitre 3

| | |
|---|-----|
| TABLEAU 3- 1 POURCENTAGE DE VEHICULES DIESEL DANS LE PARC. SOURCES : « PARC-AUTO » ET CCFA POUR 2009 ET 2010 | 99 |
| TABLEAU 3- 2 IMMATICULATIONS DE VEHICULES DIESEL EN UNITES ET EN POURCENTAGE DES IMMATICULATIONS TOTALES. SOURCE : CCFA | 100 |
| TABLEAU 3- 3 AGE MOYEN DES VEHICULES EN FONCTION DE LA MOTORISATION (ESSENCE, DIESEL). SOURCE : « PARC AUTO » | 102 |
| TABLEAU 3- 4 POURCENTAGE DE VEHICULES DIESEL DANS LE PARC SELON LE MODELE LOGISTIQUE..... | 104 |
| TABLEAU 3- 5 RESULTATS DES AJUSTEMENTS PAR LES LOIS LOGISTIQUE ET GOMPERTZ..... | 104 |
| TABLEAU 3- 6 AGE MOYEN DES VEHICULES EN FONCTION DU STATUT DU VEHICULE DANS LE MENAGE (UNIQUE, PRINCIPAL OU SECONDAIRE). SOURCE : « PARC-AUTO » | 108 |
| TABLEAU 3- 7 IMMATICULATIONS DE VEHICULES DIESEL EN UNITES ET EN POURCENTAGE DES IMMATICULATIONS TOTALES. SOURCE : CCFA | 111 |
| TABLEAU 3- 8 CENTILES PAR VAGUES ANNUELLES DU PANEL (1984-2008). SOURCE : PARC AUTO..... | 121 |
| TABLEAU 3- 9 DUREE DE VIE ET LONGEVITE KILOMETRIQUE POUR LES VEHICULES ESSENCE ET DIESEL DE PLUS DE 20 ANS (2000-2008). SOURCE : PARC AUTO | 128 |
| TABLEAU 3- 10 CENTILES DES CATEGORIES DE VEHICULES ESSENCE ET DIESEL PAR PERIODES DE 5 ANNEES ALLANT DE 1985 A 2008. SOURCE : PARC AUTO | 132 |

Tableaux du chapitre 4

| | |
|--|-----|
| TABLEAU 4- 1 PARAMETRES D'AJUSTEMENT D'UNE LOI LOG-NORMALE A DES TAUX DE SURVIE MOYENS PAR GROUPES D'ANNEES ... | 156 |
| TABLEAU 4- 2 PARAMETRES D'AJUSTEMENT D'UNE LOI LOG-LOGISTIQUE A DES TAUX DE SURVIE MOYENS PAR CATEGORIES D'ANNEES | 159 |
| TABLEAU 4- 3 PARAMETRES D'AJUSTEMENT D'UNE LOI DE WEIBULL A DES TAUX DE SURVIE MOYENS PAR CATEGORIES D'ANNEES... .. | 161 |
| TABLEAU 4- 4 PARAMETRES D'AJUSTEMENT D'UNE LOI DE WEIBULL A DES TAUX DE SURVIE LONGITUDINAUX MOYENS PAR CATEGORIES DE GENERATION. | 165 |
| TABLEAU 4- 5 PARAMETRES OBTENUS PAR DES AJUSTEMENTS PONDERES PAR L'EXPONENTIELLE DE L'AGE SUIVANT UNE LOI DE WEIBULL APPLIQUEE A DES TAUX DE SURVIE LONGITUDINAUX MOYENS PAR CATEGORIES DE GENERATIONS. | 166 |
| TABLEAU 4- 6 PARAMETRES D'AJUSTEMENT D'UNE LOI DE WEIBULL A DES TAUX DE SURVIE TRANSVERSAUX MOYENS (PRIS ENTRE 2000 ET 2008) PAR TYPE DE MOTORISATION. | 175 |
| TABLEAU 4- 7 PARAMETRES D'AJUSTEMENT D'UNE LOI DE WEIBULL A DES TAUX DE SURVIE TRANSVERSAUX MOYENS POUR 3 GROUPES TRISANNUELS: 2000 A 2002 ; 2003 A 2005 PUIS 2006 A 2008 PAR TYPE DE MOTORISATION. | 177 |
| TABLEAU 4- 8 PARAMETRES DE CALAGE DU PARC PAR UNE LOI DE WEIBULL..... | 186 |
| TABLEAU 4- 9 PARAMETRES DE CALAGE DES PARCS ESSENCE ET DIESEL PAR UNE LOI DE WEIBULL POUR 2007 ET 2008..... | 188 |

| | |
|--|-----|
| TABLEAU 4- 10 PARAMETRES DU MODELE DE POISSON INTEGRANT LE KILOMETRAGE AU COMPTEUR COMME VARIABLE D'EXPOSITION | 192 |
| TABLEAU 4- 11 PARAMETRES DU MODELE DE POISSON INTEGRANT L'EFFECTIF RETARDE COMME VARIABLE D'EXPOSITION | 194 |

Tableaux du chapitre 5

| | |
|---|-----|
| TABLEAU 5- 1 RESULTATS DES AJUSTEMENTS PAR UNE LOI LOGISTIQUE DES PARTS DE MARCHE DES VEHICULES DIESEL | 205 |
| TABLEAU 5- 2 PARAMETRES D'AJUSTEMENT D'UNE LOI DE WEIBULL A DES TAUX DE SURVIE TRANSVERSAUX MOYENS POUR LA PERIODE 2006 A 2008 PAR TYPE DE MOTORISATION..... | 206 |
| TABLEAU 5- 3 PROJECTION DE LA STRUCTURE ANNUELLE DU PARC PAR TYPE DE MOTORISATION ET PAR ANNEE DE CONSTRUCTION (EN MILLIERS) A L'HORIZON 2020. SCENARIO « SANS RUPTURE »..... | 207 |
| TABLEAU 5- 4 RESUME DES SCENARIOS DE DEPLOIEMENT TECHNOLOGIQUE POUR LA FRANCE ET POUR L'EUROPE. | 218 |
| TABLEAU 5- 5 RESULTATS DES AJUSTEMENTS PAR UNE LOI LOGISTIQUE DES PARTS DE MARCHE DES VEHICULES HYBRIDES ET ELECTRIQUES. A PARTIR DU SCENARIO DEPOORTER ET ASSIMON (2011) | 220 |
| TABLEAU 5- 6 PARAMETRES D'AJUSTEMENT D'UNE LOI DE WEIBULL AUX TAUX DE SURVIE TRANSVERSAUX POUR L'ANNEE 2008. .. | 222 |
| TABLEAU 5- 7 PROJECTION DE LA STRUCTURE ANNUELLE DU PARC PAR TYPE DE MOTORISATION ET PAR ANNEE DE CONSTRUCTION (EN MILLIERS) A L'HORIZON 2020. CALCUL BASE SUR L'HYPOTHESE DE DEPLOIEMENT DEPOORTER ET ASSIMON (2011). | 223 |
| TABLEAU 5- 8 RESULTATS DES AJUSTEMENTS PAR UNE LOI LOGISTIQUE DES PARTS DE MARCHE DES VEHICULES HYBRIDES ET ELECTRIQUES. BASE SUR LE SCENARIO DUVAL-DESTIN (2010) MODIFIE..... | 224 |
| TABLEAU 5- 9 PROJECTION DE LA STRUCTURE ANNUELLE DU PARC PAR TYPE DE MOTORISATION ET PAR ANNEE DE CONSTRUCTION (EN MILLIERS) A L'HORIZON 2020. BASE SUR L'HYPOTHESE DE DEPLOIEMENT DUVAL-DESTIN (2010) MODIFIEE. *Y COMPRIS LES VEHICULES TOUT-ELECTRIQUES ET PAC | 226 |
| TABLEAU 5- 10 PARTS DE MARCHE DES VEHICULES POUR CHAQUE MOTORISATION PAR ANNEE DE CONSTRUCTION ET PAR GROUPES DE CYLINDREES. | 233 |
| TABLEAU 5- 11 REPARTITION DU PARC AUTOMOBILE SELON L'ENERGIE ET LA CYLINDREE A L'HORIZON 2020. BASE SUR LES HYPOTHESES DE DEPLOIEMENT DEPOORTER ET ASSIMON..... | 234 |
| TABLEAU 5- 12 REPARTITION DU PARC AUTOMOBILE SELON L'ENERGIE ET LA CYLINDREE A L'HORIZON 2020. BASE SUR LES HYPOTHESES DE DEPLOIEMENT DUVAL-DESTIN. | 236 |
| TABLEAU 5- 13 BILAN NATIONAL DES EMISSIONS A L'HORIZON 2020 SELON LES SCENARIOS DE DEPLOIEMENT DE DEPOORTER ET ASSIMON* (DA) ET DUVAL-DESTIN* (DD)..... | 241 |

Annexes

Annexe 1-1 : "Adieu à la vignette pour les particuliers" Intervention de Laurent Fabius LUNDI 20 NOVEMBRE 2000 (Ministre de l'Économie des Finances et de l'Industrie):

« Monsieur le Directeur du musée automobile de Mulhouse, Mesdames et Messieurs,

Je suis heureux que nous soyons rassemblés aujourd'hui pour ce qu'il convient d'appeler l'adieu à la vignette. Une cérémonie d'adieu qui n'a rien de triste. Le Gouvernement, à la fin de l'été, a annoncé en effet la disparition de ce qui était naguère, étymologiquement, un élément d'ornement ou de brochure pour la couverture d'un livre, mais qui, dans l'esprit de tous, était devenu au fil des années, une taxe supplémentaire qui n'avait rien de décorative. Les députés, le mois dernier, ont voté sa suppression pour les particuliers et les entrepreneurs individuels. L'espérance de vie de la chère disparue aura été ainsi 44 fois plus longue que les 12 mois prévus en 1956. Bossuet, qui a fait de l'oraison un art, avait coutume de dire qu'un hommage digne de ce nom ne peut manquer de reconnaître la bonne fortune du défunt, ni omettre de dresser l'inventaire, subtil et bref, de ses défauts ou de ses vices. Aujourd'hui c'est une oraison heureuse ! L'idée de taxer les voitures de tourisme n'est pas totalement née en 1956 avec Paul Ramadier. Une première tentative eut lieu entre 1924 et 1934. Le contexte de récession économique et de tension budgétaire motivait cette première mutation des chevaux-vapeurs en chevaux-fiscaux. A la fin des années 1940, nos voisins européens, singulièrement la Grande-Bretagne, accusèrent la France de pratiquer le dumping fiscal parce qu'elle n'obligeait pas alors ses automobilistes à acquitter un impôt sur le moteur de leur voiture. La vignette fut instituée par la loi du 30 juin 1956 ou plutôt les vignettes puisque trois taxes – sur les véhicules des particuliers, sur ceux des sociétés et une troisième dite " spéciale " sur ceux de plus de 16 CV –. Sa feuille de route, si j'ose dire, était claire : il s'agissait d'alimenter pendant un temps court le Fonds national de solidarité en faveur des personnes âgées. La vérité veut que l'on reconnaisse que ni le calendrier et ni l'intention assignés à cet impôt ne furent respectés. La taxe provisoire a connu des existences successives, d'abord remise dans les portefeuilles, ce qui en dit long sur sa cible, puis dans les boîtes à gants avec la carte grise, ce qui était plus discret, enfin sous forme d'autocollant apposé sur le pare-brise, ce qui avait le mérite de la franchise. Au fil du temps, la vignette épousa les modes, l'Etat s'efforçant de la rendre " tendance " comme on dit aujourd'hui : ronde dans les années 1970, géométrique et sévère dans les années 1990. Mais, quelle que soit sa couleur ou sa forme, la " pastille " était amère. Sa finalité évolua au fil des décennies : recette perçue au profit de l'Etat avant d'être transférée, dans le cadre de la décentralisation, aux départements et à la collectivité territoriale de Corse.

Lorsque le 31 août, dans le cadre d'un plan d'allègement et de réforme des impôts de 120 MdF sur trois ans, j'ai annoncé au nom du gouvernement la suppression de la vignette pour les particuliers, nous avons deux objectifs. Que les Français, pour lesquels la voiture est un moyen utile de se rendre au travail ou de chercher un emploi, de faire des courses ou d'aller chercher les enfants à l'école, constatent, outre un allègement général des impôts, la suppression de l'un d'entre eux. L'exonération de vignette pour les voitures particulières, les campings cars et les véhicules destinés au transport des personnes handicapées et l'extension de sa suppression, ainsi que l'a souhaité l'Assemblée nationale, aux associations, aux syndicats et aux entrepreneurs individuels, pour leurs voitures et leurs petits utilitaires, constituent une entorse au fameux principe gourmand du millefeuille fiscal : toujours empiler, ne jamais retrancher. Second objectif, le Gouvernement a voulu que le produit du prélèvement de la vignette soit compensé au franc le franc, sous forme d'une dotation, auprès des départements. L'histoire retiendra, et la présence de ce pare-brise l'y aidera, que la vignette a été supprimée en l'an 2000, année à plusieurs zéros. L'année dernière, le zéro sur la vignette c'était le millésime ; à partir de cette année, c'est la somme à payer. En participant à cette cérémonie, j'ai conscience de briser une habitude. La vignette accompagnait chaque mois de novembre l'arrivée sur les tables du Beaujolais nouveau, chacun évitant ainsi de consommer l'un pour se consoler de l'autre. Le vin et la pastille – cela ferait un bon titre de fable – semblent d'ailleurs avoir destins liés puisque je note qu'au XIIIème siècle, le mot " vignette " désignait aussi un ornement en branche de vigne. La collection dite Schlumpf mais qui est aujourd'hui celle de Mulhouse disposera donc désormais d'un joyau supplémentaire. Notre plus célèbre carré de 74 millimètres de côté trouvera ainsi sa vraie place en devenant une pièce de choix du musée établi à Mulhouse, une sorte de mosaïque sur son socle de verre, bref, pour la première fois en presque un demi-siècle, un ornement que l'on se plaît à contempler. Adieu, la vignette ! » **Source : Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie, 20/11/2000 URL:**http://www.minefi.gouv.fr/fonds_documentaire/archives/discours/lf001120.htm

Annexe 2-1 : Données

| Année | Nombre de français de 19 ans et plus | Volume du parc automobile au 1 ^{er} janvier (VP uniquement) | Véhicule par individu de 19 ans et plus | Nombre de ménages | Véhicule par ménage |
|-------|--------------------------------------|--|---|-------------------|---------------------|
| 1956 | 30 056 519 | 3 240 000 | 0,11 | | |
| 1957 | 30 232 797 | 3 610 000 | 0,12 | | |
| 1958 | 30 441 601 | 4 040 000 | 0,13 | | |
| 1959 | 30 627 987 | 4 540 000 | 0,15 | | |
| 1960 | 30 799 942 | 4 950 000 | 0,16 | 14 308 000 | 0,35 |
| 1961 | 30 912 621 | 5 430 000 | 0,18 | 14 467 000 | 0,38 |
| 1962 | 31 040 242 | 5 970 000 | 0,19 | 14 748 000 | 0,40 |
| 1963 | 31 668 989 | 6 700 000 | 0,21 | 15 007 000 | 0,45 |
| 1964 | 31 847 626 | 7 530 000 | 0,24 | 15 165 000 | 0,50 |
| 1965 | 32 050 531 | 8 320 000 | 0,26 | 15 316 000 | 0,54 |
| 1966 | 32 195 220 | 9 010 000 | 0,28 | 15 469 000 | 0,58 |
| 1967 | 32 559 673 | 9 810 000 | 0,30 | 15 643 000 | 0,63 |
| 1968 | 32 934 126 | 10 565 000 | 0,32 | 15 840 000 | 0,67 |
| 1969 | 33 350 640 | 11 210 000 | 0,34 | 16 085 000 | 0,70 |
| 1970 | 33 779 958 | 11 860 000 | 0,35 | 16 380 000 | 0,72 |
| 1971 | 34 244 287 | 12 470 000 | 0,36 | 16 695 000 | 0,75 |
| 1972 | 34 635 336 | 13 130 000 | 0,38 | 17 005 000 | 0,77 |
| 1973 | 35 014 007 | 13 920 000 | 0,40 | 17 305 000 | 0,80 |
| 1974 | 35 378 510 | 14 620 000 | 0,41 | 17 585 000 | 0,83 |
| 1975 | 35 711 935 | 15 180 000 | 0,43 | 17 849 000 | 0,85 |
| 1976 | 35 989 127 | 15 520 000 | 0,43 | 18 107 000 | 0,86 |
| 1977 | 36 315 418 | 16 230 000 | 0,45 | 18 373 000 | 0,88 |
| 1978 | 36 658 832 | 16 990 000 | 0,46 | 18 639 000 | 0,91 |
| 1979 | 36 970 150 | 17 720 000 | 0,48 | 18 906 000 | 0,94 |
| 1980 | 37 312 764 | 18 440 000 | 0,49 | 19 182 000 | 0,96 |
| 1981 | 37 648 912 | 19 130 000 | 0,51 | 19 427 000 | 0,98 |
| 1982 | 38 007 996 | 19 750 000 | 0,52 | 19 673 000 | 1,00 |
| 1983 | 38 347 244 | 20 300 000 | 0,53 | 19 941 000 | 1,02 |
| 1984 | 38 695 638 | 20 600 000 | 0,53 | 20 206 000 | 1,02 |
| 1985 | 39 065 483 | 20 800 000 | 0,53 | 20 454 000 | 1,02 |
| 1986 | 39 411 847 | 21 090 000 | 0,54 | 20 693 000 | 1,02 |
| 1987 | 39 762 146 | 21 500 000 | 0,54 | 20 929 000 | 1,03 |
| 1988 | 40 113 452 | 21 970 000 | 0,55 | 21 160 000 | 1,04 |
| 1989 | 40 476 743 | 22 520 000 | 0,56 | 21 385 000 | 1,05 |
| 1990 | 40 857 353 | 23 010 000 | 0,56 | 21 633 000 | 1,06 |
| 1991 | 41 235 206 | 23 550 000 | 0,57 | 21 895 000 | 1,08 |
| 1992 | 41 637 018 | 23 810 000 | 0,57 | 22 146 000 | 1,08 |
| 1993 | 42 038 688 | 24 020 000 | 0,57 | 22 394 000 | 1,07 |
| 1994 | 42 385 233 | 24 385 000 | 0,58 | 22 647 000 | 1,08 |
| 1995 | 42 668 174 | 24 900 000 | 0,58 | 22 906 000 | 1,09 |
| 1996 | 42 877 732 | 25 100 000 | 0,59 | 23 158 000 | 1,08 |
| 1997 | 43 060 276 | 25 499 700 | 0,59 | 23 406 000 | 1,09 |
| 1998 | 43 272 040 | 26 090 000 | 0,60 | 23 652 000 | 1,10 |
| 1999 | 43 478 705 | 26 810 000 | 0,62 | 23 925 000 | 1,12 |
| 2000 | 43 810 911 | 27 480 000 | 0,63 | 24 235 000 | 1,13 |
| 2001 | 44 198 715 | 28 060 000 | 0,63 | 24 544 000 | 1,14 |
| 2002 | 44 594 525 | 28 700 000 | 0,64 | 24 852 000 | 1,15 |
| 2003 | 44 985 267 | 29 160 000 | 0,65 | 25 171 000 | 1,16 |
| 2004 | 45 321 927 | 29 559 976 | 0,65 | 25 508 000 | 1,16 |
| 2005 | 45 720 861 | 29 899 976 | 0,65 | 25 871 000 | 1,16 |
| 2006 | 46 119 332 | 30 100 000 | 0,65 | 26 280 000 | 1,15 |
| 2007 | 46 480 144 | 30 400 000 | 0,65 | | |
| 2008 | 46 797 374 | 30 700 000 | 0,66 | | |
| 2009 | 47 129 388 | 30 850 000 | 0,65 | | |
| 2010 | 47 447 053 | 31 050 000 | 0,65 | | |

Annexe 2-2 : Test de stationnarité KPSS

Concernant le modèle retenu (modèle n°5), nous pouvons voir tableau 1 que la statistique de KPSS est en dessous des valeurs critiques à fournies pour le test (elle l'est d'ailleurs pour les 6 modèles retenus voir tableau 3). Elle s'obtient facilement à partir du code SAS suivant :

```
proc autoreg data=tauxdemotindividu plot=residuals; model vpi=pib ddcf
sm/stationarity= (kpss=(KERNEL=QS AUTO));run;
```

En conséquence, nous ne rejetons pas l'hypothèse de stationnarité $H_0: \sigma_u^2 = 0$. La figure 1, obtenue à partir de l'option *plot=residuals* nous offre quelques résultats visuels de la régression principalement sur les résidus.

| Modèles présenté | Type | Statistique |
|------------------|--------------------|-------------|
| Modèle 5 | Constante | 0,0882 |
| Modèle 5 | Constante et trend | 0,0926 |

Table 1 : Statistique de KPSS

| Niveau | 10% | 5% | 1% |
|--------------------|--------|--------|--------|
| Constante | 0,3470 | 0,4630 | 0,7390 |
| Constante et trend | 0,1190 | 0,1460 | 0,2160 |

Table 2 : Valeurs critiques pour le test KPSS

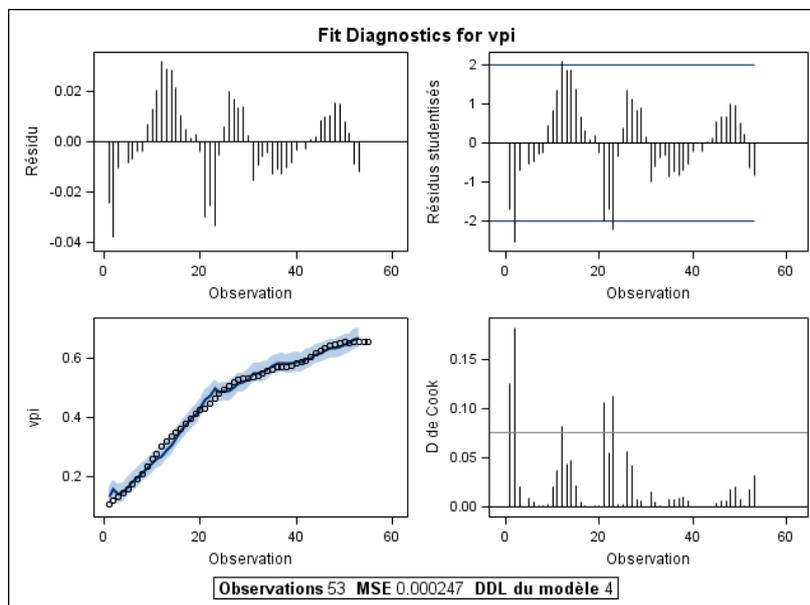


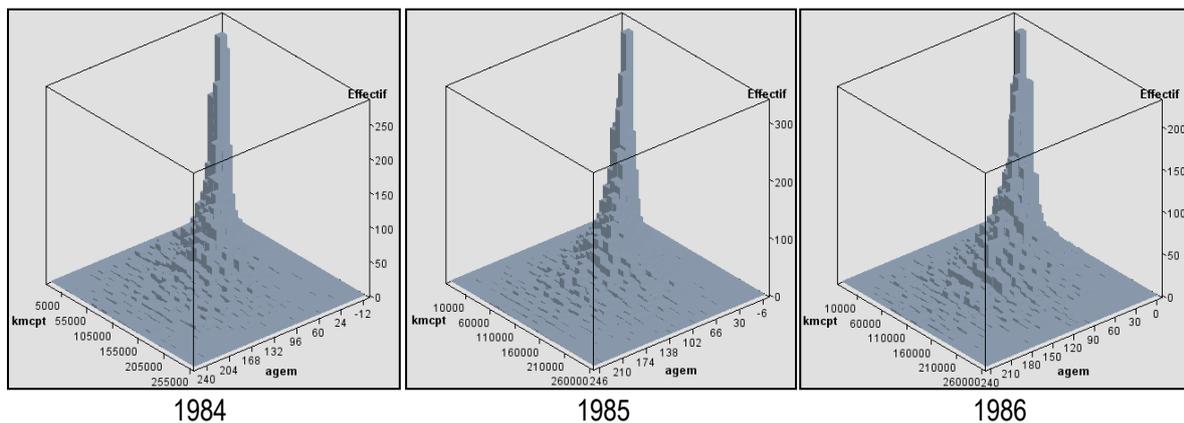
Figure1 : Résidus et qualité de l'ajustement

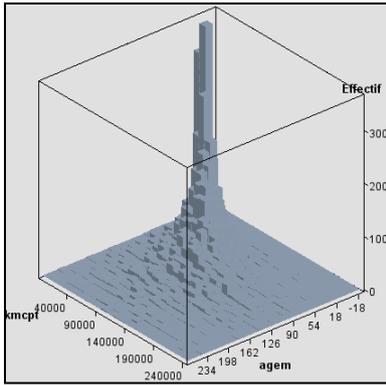
| Modèle | Type | Statistique |
|----------|---------------------------|-------------|
| Modèle 1 | <i>Constante</i> | 0,0850 |
| Modèle 1 | <i>Constante et trend</i> | 0,0875 |
| Modèle 2 | <i>Constante</i> | 0,1750 |
| Modèle 2 | <i>Constante et trend</i> | 0,1548 |
| Modèle 3 | <i>Constante</i> | 0,1555 |
| Modèle 3 | <i>Constante et trend</i> | 0,1439 |
| Modèle 4 | <i>Constante</i> | 0,1750 |
| Modèle 4 | <i>Constante et trend</i> | 0,1548 |
| Modèle 5 | <i>Constante</i> | 0,0882 |
| Modèle 5 | <i>Constante et trend</i> | 0,0926 |
| Modèle 6 | <i>Constante</i> | 0,0882 |
| Modèle 6 | <i>Constante et trend</i> | 0,0926 |

Table 3 : Statistiques de KPSS pour tous les modèles

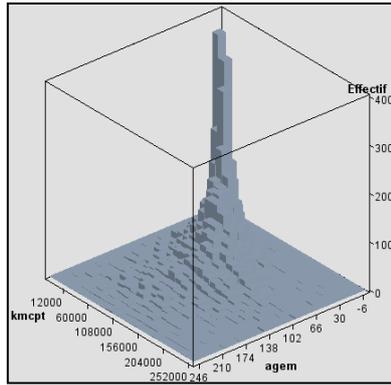
Annexe 3-1 : Histogrammes tridimensionnels (vues de face).

Ci-dessous sont décrits graphiquement l'ensemble des histogrammes tridimensionnels des vagues *Parc-Auto* entre 1984 et 2008. Elles sont construites suivant trois axes le premier (x) représente l'âge en mois, le second (y) le kilométrage affiché au compteur et le troisième (z) l'effectif cumulé (nombre de véhicules) dans chaque aire de coté 5000 kilomètres et 20 mois. Il s'agit d'une étape de passage nécessaire pour créer les distributions tridimensionnelles qui nécessitent de choisir une loi de distribution du noyau (ou kernel) (voir Annexe 3-2).

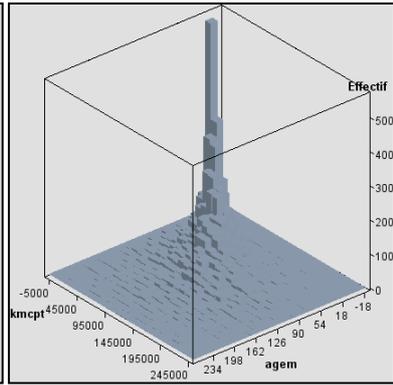




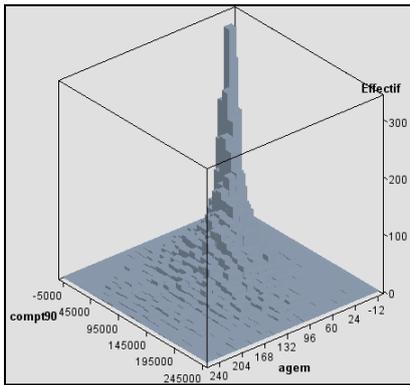
1987



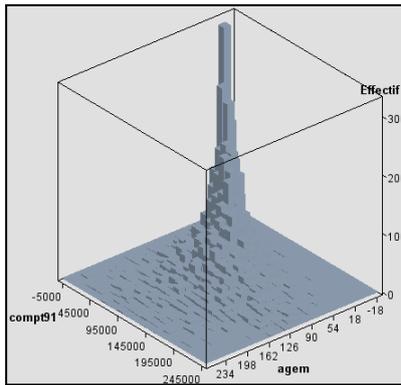
1988



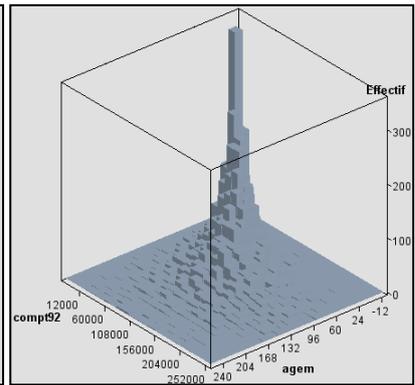
1989



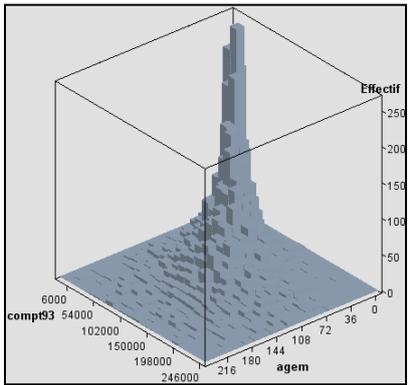
1990



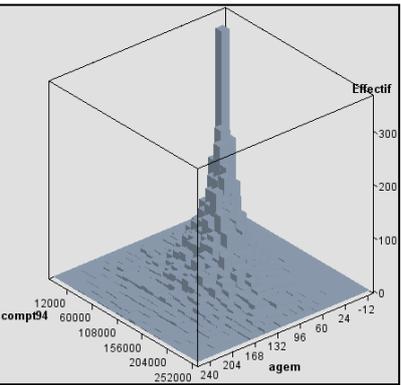
1991



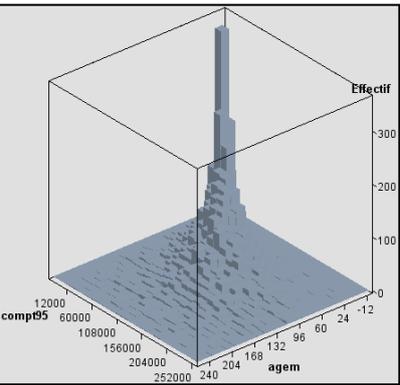
1992



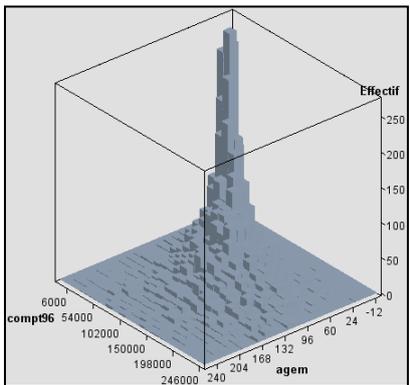
1993



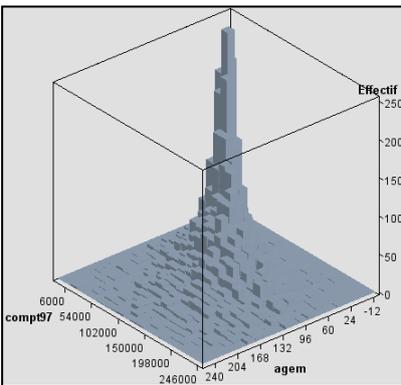
1994



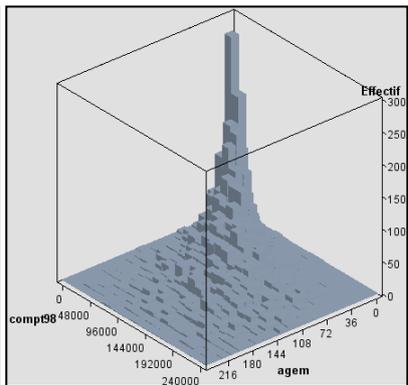
1995



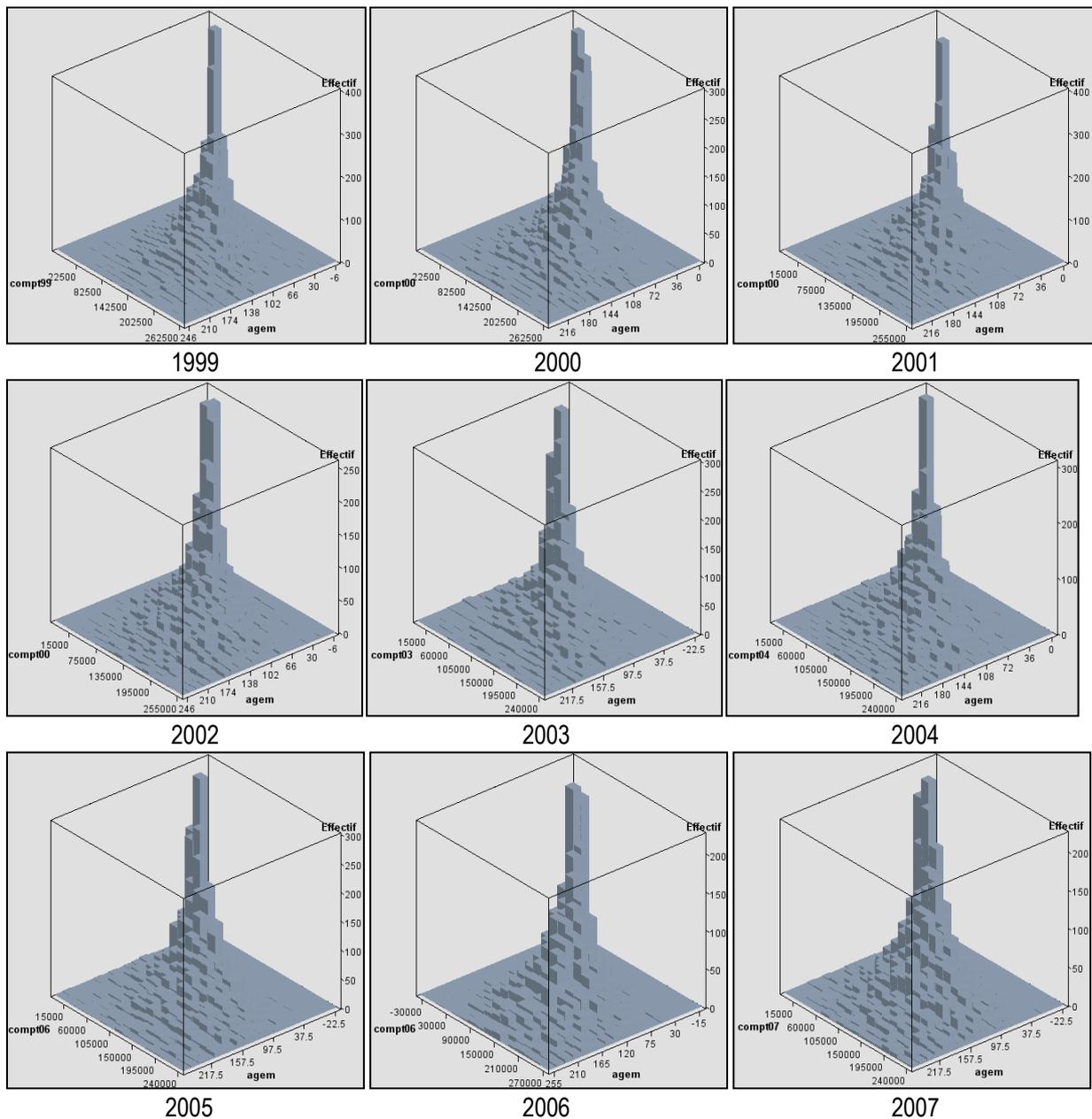
1996



1997

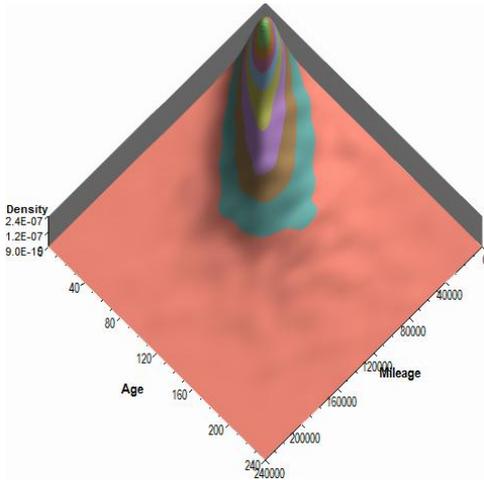


1998

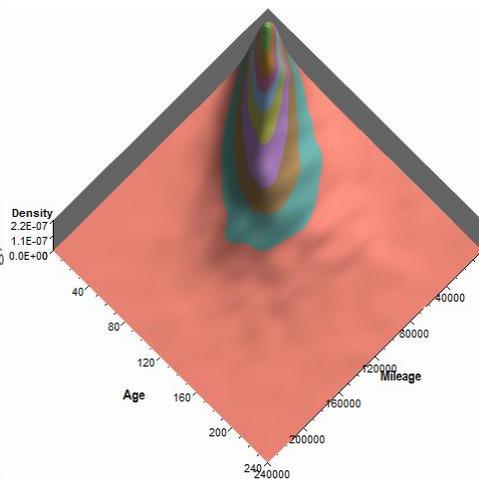


Annexe 3-2 : Distributions tridimensionnelles (vues de haut).

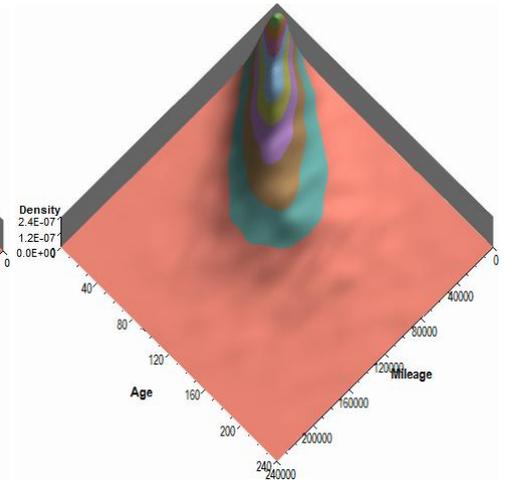
A partir des histogrammes (Annexe 3-1), en rapportant l'effectif total comptabilisé pour chaque aire (de côtés 5000x20) à l'effectif total puis en recourant au noyau d'une loi normale pour lisser l'aspect, il est possible de dessiner les distributions tridimensionnelles qui sont données ci-dessous pour les années 1984 à 2008. Ces distributions sont visualisées de haut. Leur étalement progressif retranscrit le vieillissement structurel du parc automobile qui touche l'ensemble de la population de véhicules qui composent le parc automobile au moins depuis 1984.



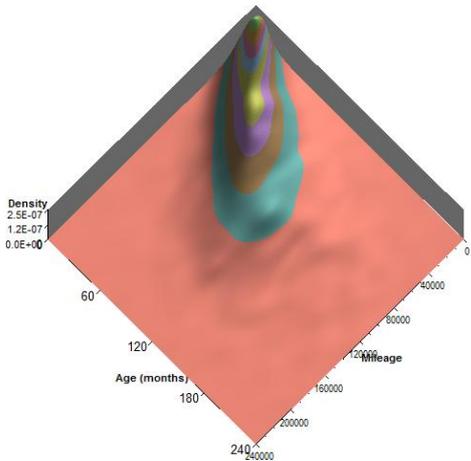
1984



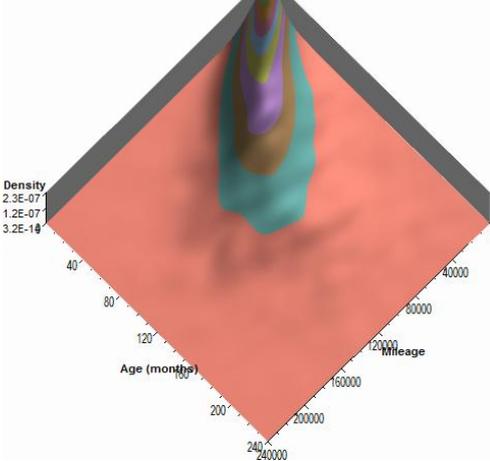
1985



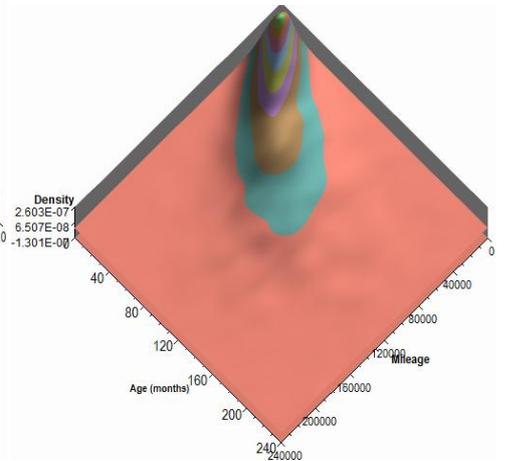
1986



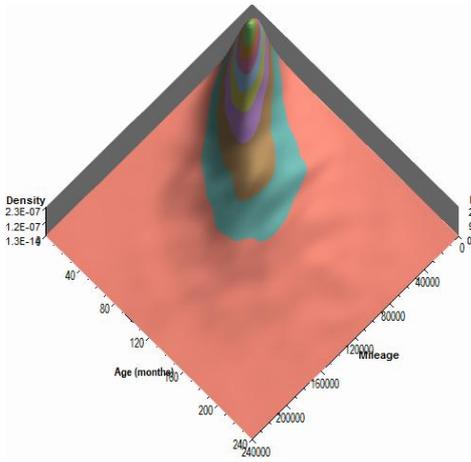
1987



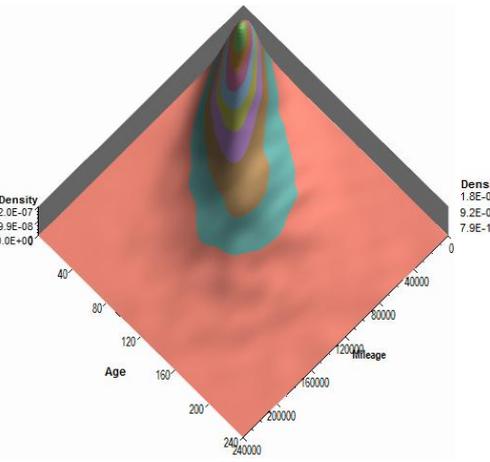
1988



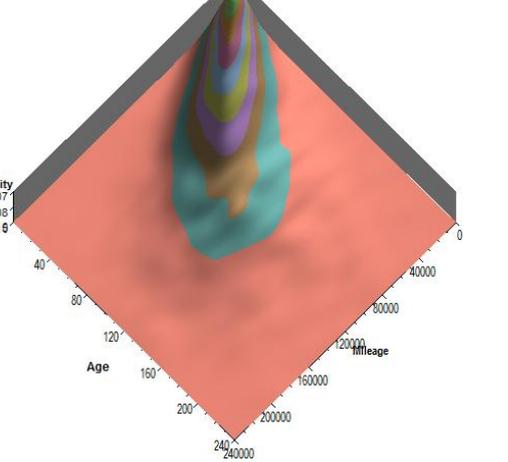
1989



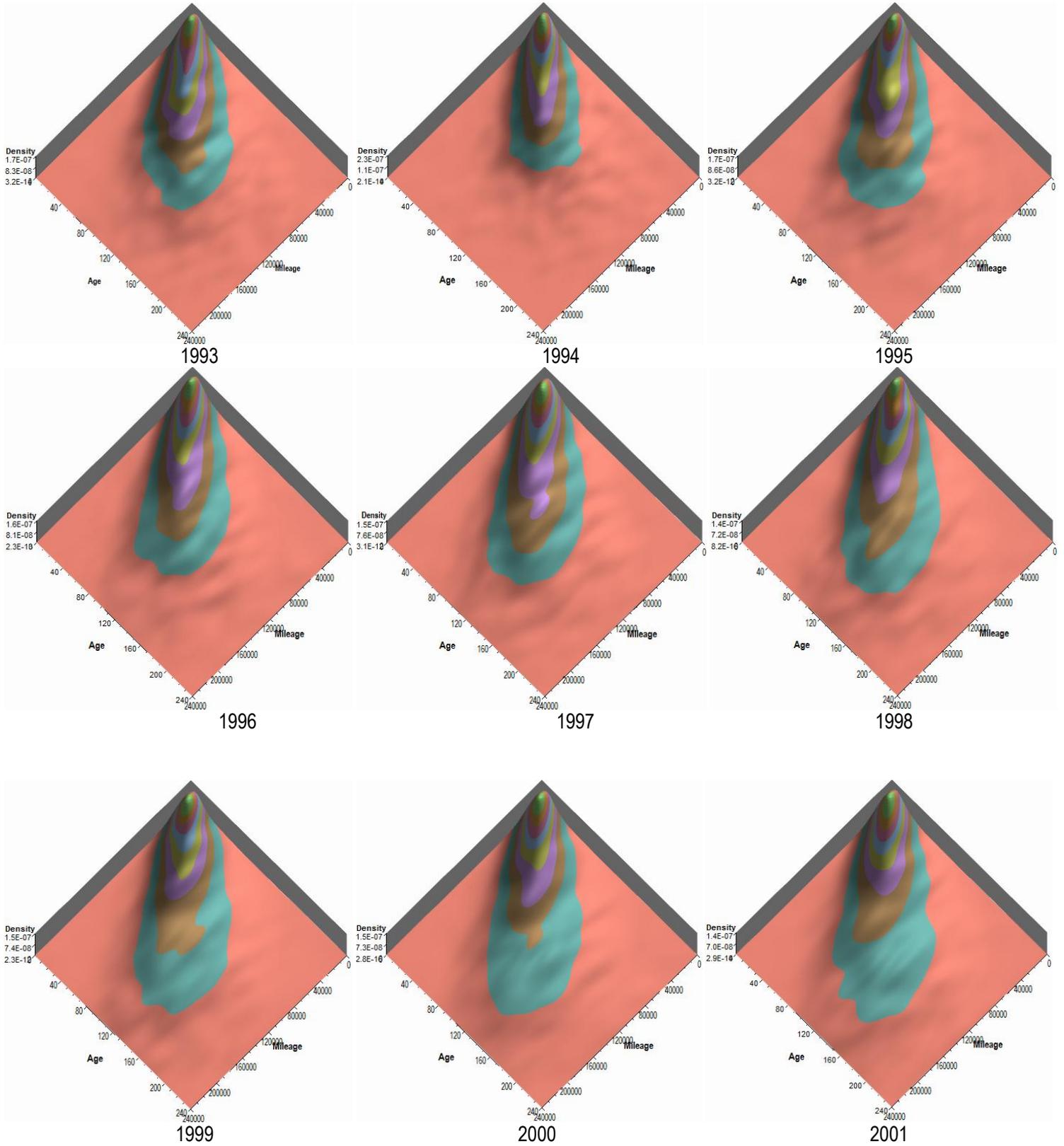
1990

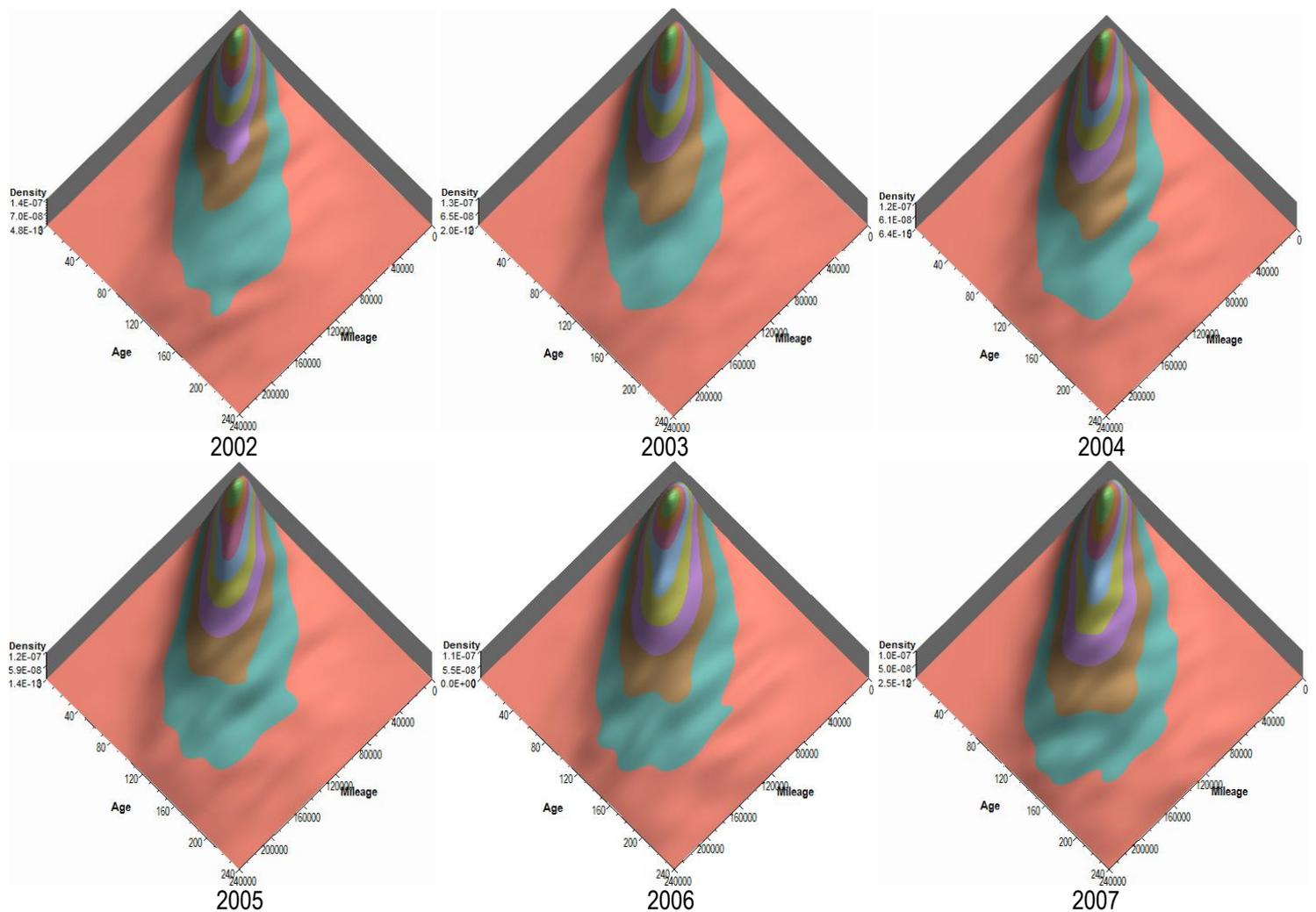


1991



1992





Annexe 4-1 : La loi de Weibull

C'est en 1951 dans son article fondateur [Weibull, 1951], qu'est formellement née la loi dite de « Weibull » du nom de son inventeur Ernst Hjalmar Waloddi WEIBULL⁷⁷. Durant sa vie, Weibull publie au moins 65 articles concernant la solidité des matériaux, les processus de fatigue et de rupture des solides. Aujourd'hui, cette loi est utilisée dans des domaines aussi vairsés que la finance, l'économie, la bio-statistique, la fiabilité et la maintenance que ce soit pour l'analyse de la durée de vie ou des périodes de transition [Kieffer, 1988]. La loi de Weibull recouvre toute une famille de lois, certaines d'entre elles apparaissant en physique comme conséquence de certaines hypothèses. C'est, en particulier, le cas de la loi exponentielle en posant $\alpha = 1$.

La fonction de hasard, de survie et de densité de la loi de Weibull à deux paramètres s'énoncent comme suit :

⁷⁷ Né en 1888 en Suède et mort en 1979 à Annecy (France)

$$h(t, \alpha, \beta) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t}{\beta} \right)^{\alpha-1}$$

$$S(t, \alpha, \beta) = e^{-\left(\frac{t}{\beta} \right)^\alpha}$$

$$f(t, \alpha, \beta) = S(t, \alpha, \beta) \cdot h(t, \alpha, \beta)$$

$$f(t, \alpha, \beta) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t}{\beta} \right)^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{t}{\beta} \right)^\alpha}$$

La constante β est la constante d'échelle temporelle. Une modification du paramètre d'échelle β , a le même effet sur la distribution qu'un changement dans l'échelle des abscisses. Ainsi, une augmentation de la valeur de β tout en maintenant constante la valeur de α a pour effet d'étirer le tracé de la fonction de densité. Dans les figures qui suivent nous donnons les fonctions de hasard, de survie et de densité en faisant varier la constante d'échelle β à des valeurs égales à 50, 100, 150, 200 tout en fixant la valeur de α . Nous choisissons de poser $\alpha = 2$.

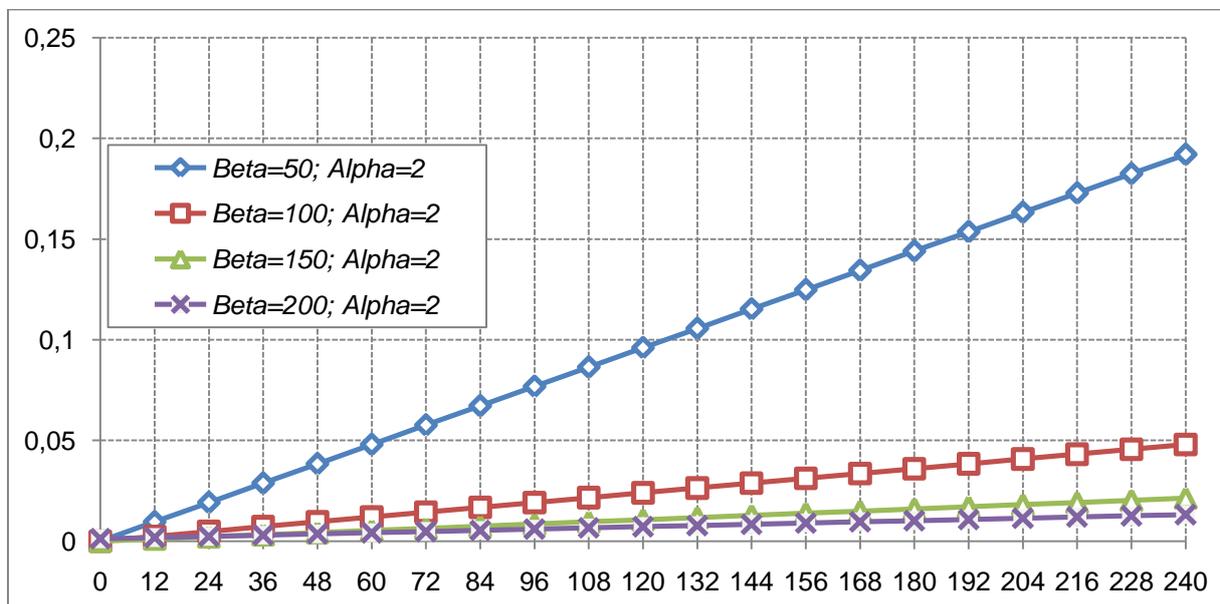


Figure 1 : Fonctions de densité pour une loi de Weibull pour $\alpha = 2$ et pour β à valeurs dans $\{50, 100, 150 \text{ et } 200\}$

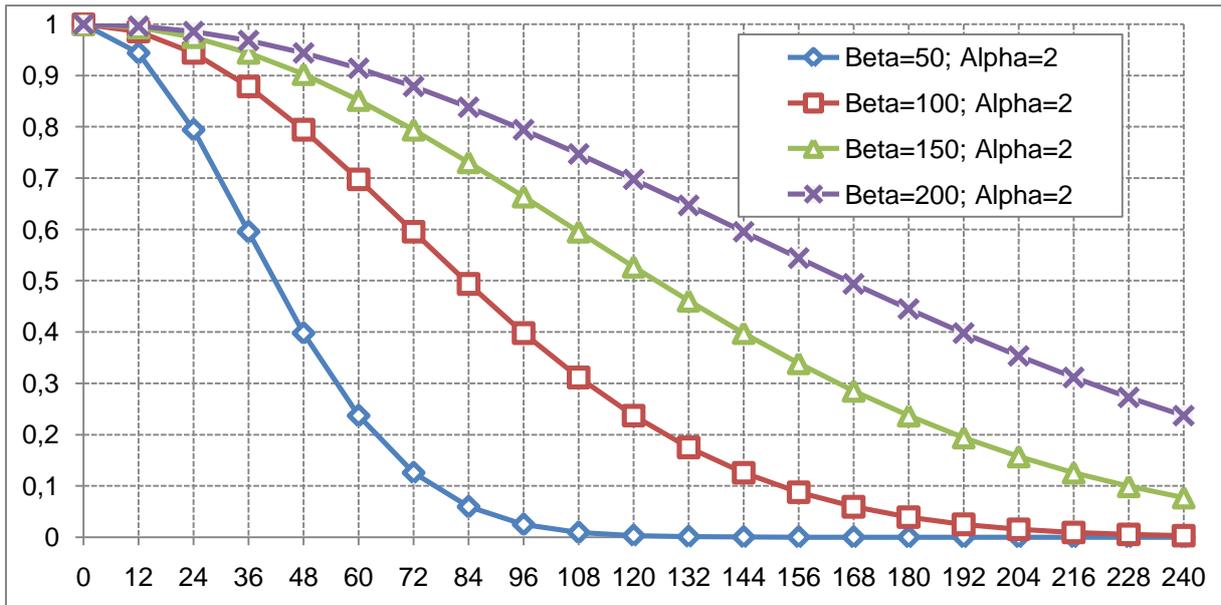


Figure 2 : Fonctions de survie de Weibull pour $\alpha = 2$ et pour β à valeurs dans $\{50, 100, 150$ et $200\}$

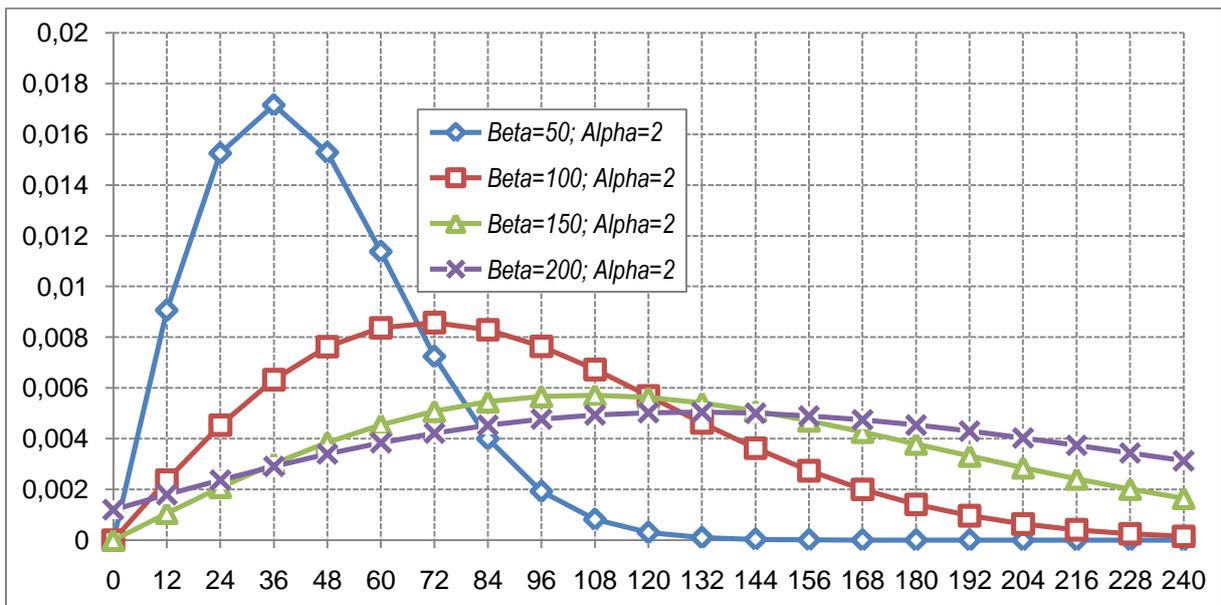


Figure 3 : Distribution de probabilité de Weibull pour $\alpha = 2$ et pour β à valeurs dans $\{50, 100, 150$ et $200\}$

La valeur de la constante α détermine le signe de la fonction dérivée du hasard et donc le caractère croissant ou décroissant de ce dernier. C'est la raison pour laquelle α est un paramètre dit de « forme » car c'est cette constante qui dicte la forme générale de la courbe de survie obtenue. Nous obtenons alors trois cas de figures :

- Si $\alpha = 1$ nous sommes en présence d'un hasard constant et la courbe aura une décroissance exponentielle de paramètre $\frac{1}{\beta}$

- Si $\alpha \leq 1$, le hasard est décroissant, suggérant que les individus (ou systèmes : machines, véhicules etc....) ont de moins en moins de chance de mourir (tomber en panne) avec le temps.
- Si $\alpha \geq 1$, le hasard est croissant, suggérant que les individus (ou systèmes) observés ont de plus en plus de chances de mourir (ou de tomber en panne) quand le temps passe.

Dans les figures 4 à 6 nous donnons les fonctions de hasard, de survie et de densité d'une loi de Weibull dont la constante β reste figée à une valeur égale à 100 et dont nous faisons varier α parmi les valeurs : 0,5; 1; 1,5 et 2.

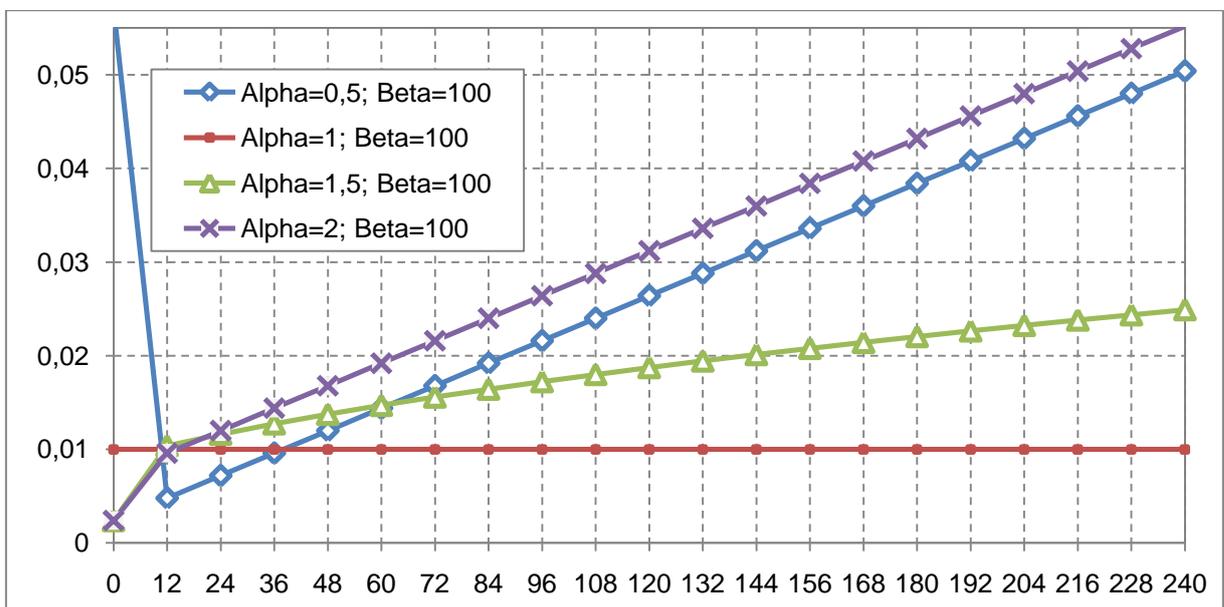


Figure 4: Fonctions de Hasard pour une loi de Weibull pour $\beta=100$ et pour α à valeurs dans $\{0,5 ; 1 ; 1,5 ; 2\}$

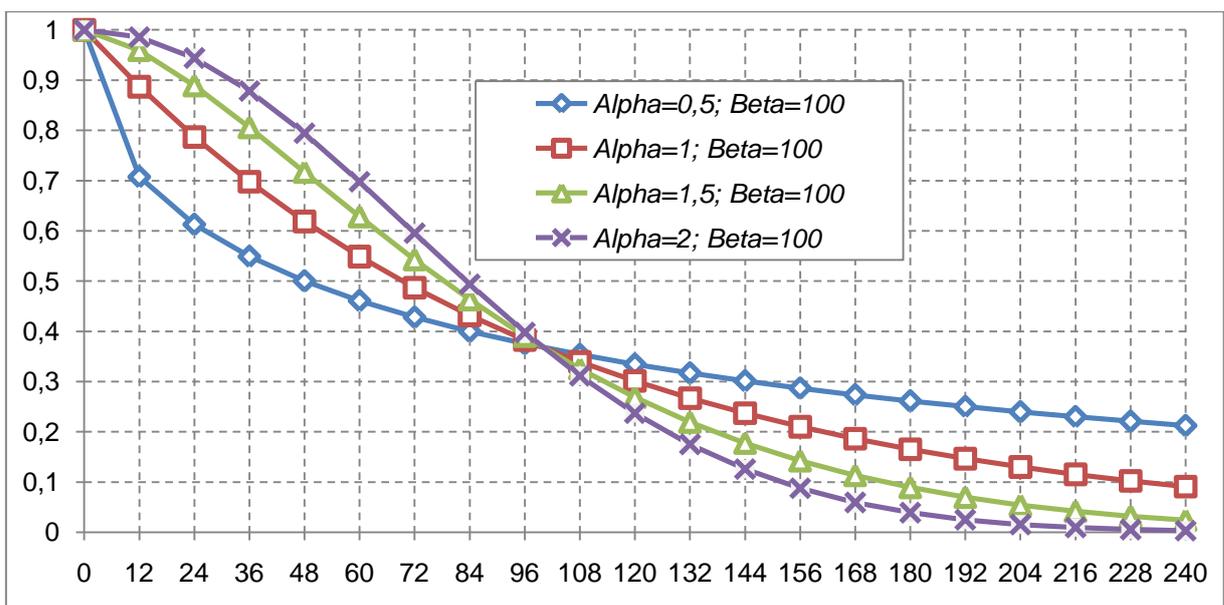


Figure 5 : Fonctions de Survie de Weibull pour $\beta=100$ et pour α à valeurs dans $\{0.5 ; 1 ; 1.5 ; 2\}$

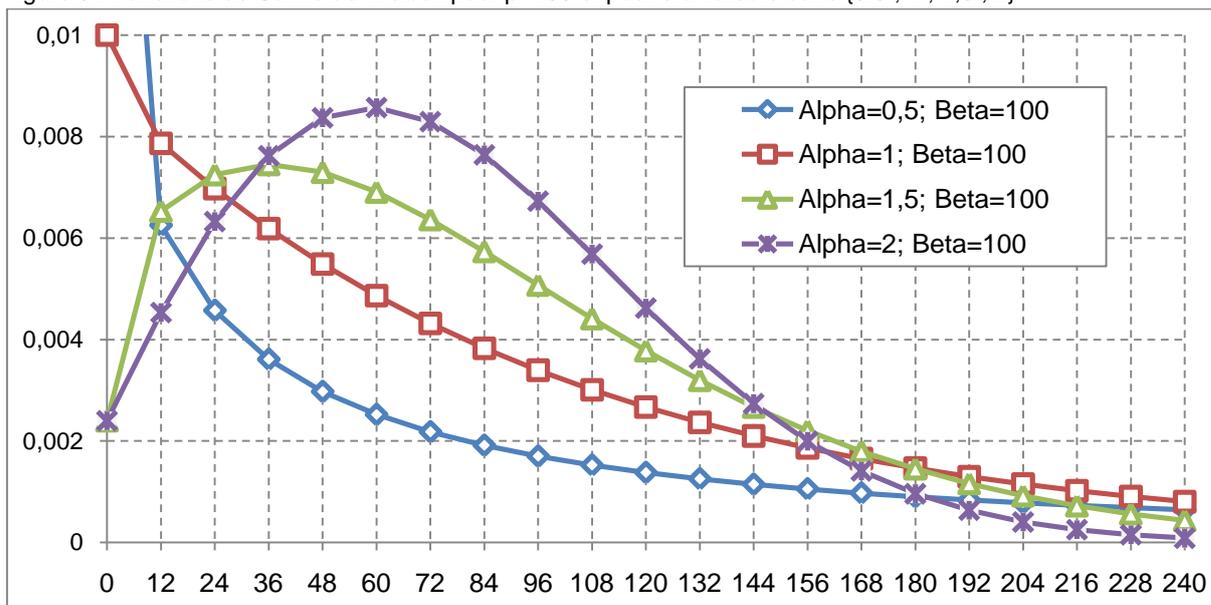


Figure 6 : Distribution de probabilité de Weibull pour $\beta=100$ et pour α à valeurs dans $\{0.5 ; 1 ; 1.5 ; 2\}$

La loi de Weibull est parfois exprimée à l'aide trois paramètres α la constante de forme, β la constante d'échelle temporelle et θ une constante de position qui permet de décaler positivement ou négativement (suivant le signe de θ) la position de la courbe de distribution (de répartition, ou de survie) de Weibull suivant l'axe des abscisses. Les figures 7 et 8 illustrent les effets d'une variation de θ . La constante θ prends respectivement les valeurs -12 ; 0 et 12 tout en fixant les constantes α et β à des valeurs respectives de 2 et 100.

La densité de la loi de Weibull à trois paramètres s'écrivant :

$$f(t, \alpha, \beta) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t-\theta}{\beta} \right)^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{t-\theta}{\beta} \right)^\alpha}$$

Les fonctions de hasard et de survie deviennent :

$$h(t, \alpha, \beta, \theta) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{t-\theta}{\beta} \right)^{\alpha-1}$$

$$S(t, \alpha, \beta) = e^{-\left(\frac{t-\theta}{\beta} \right)^\alpha}$$

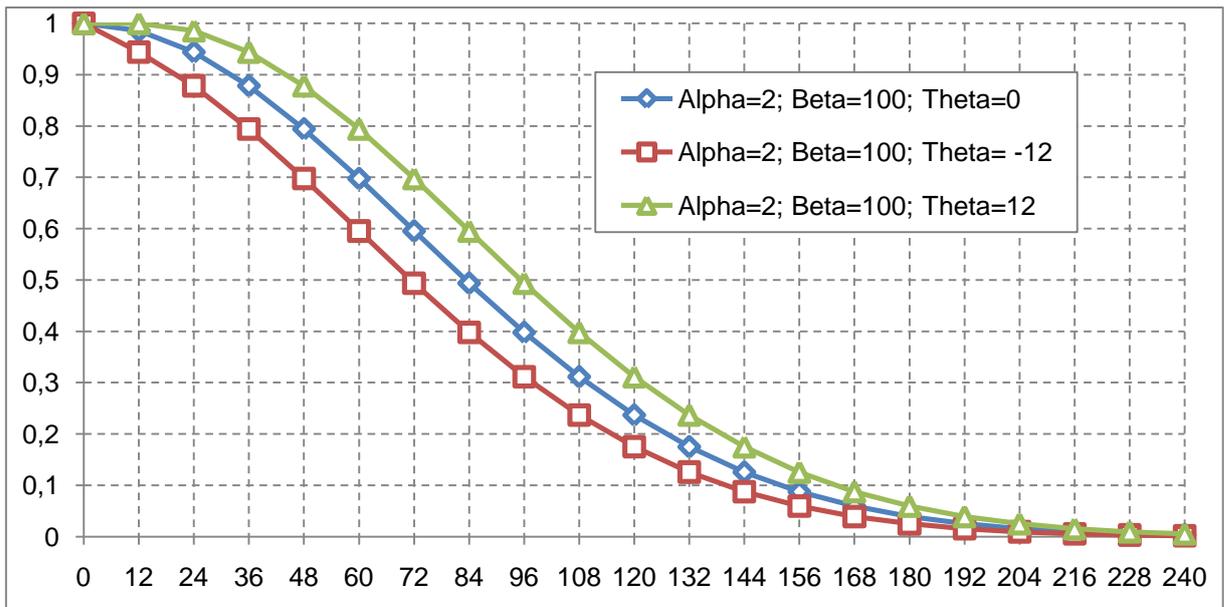


Figure 7 : Distribution de probabilité de Weibull pour $\alpha = 2$; $\beta=100$ et θ à valeurs dans $\{0 ; 12 ; -12\}$

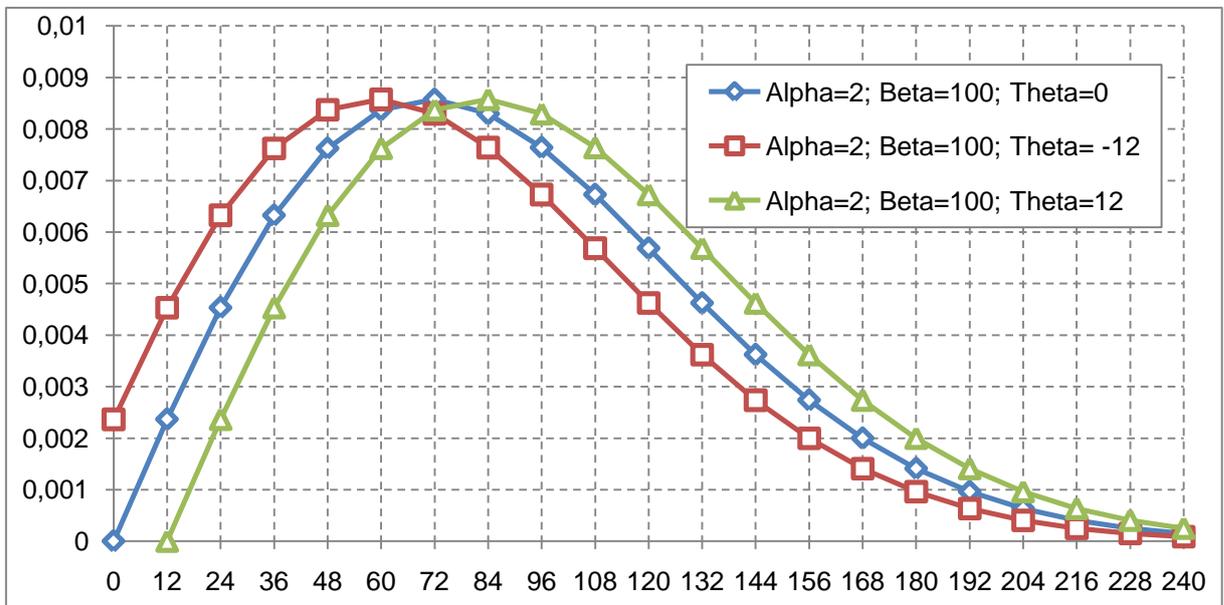


Figure 8 : Lois de survie de Weibull pour $\alpha = 2$; $\beta=100$ et θ à valeurs dans $\{0 ; 12 ; -12\}$

La durée de vie médiane de la loi de Weibull est obtenue aisément par la formule :

$$t_{1/2} = \beta \cdot \ln(2)^{\frac{1}{\alpha}}$$

L'espérance donnant la durée de vie moyenne est obtenue suivant la formule suivante :

$$E(t) = \beta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \text{ avec } \Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} t^{\alpha-1} e^{-t} dt$$

Annexe 4-2 : La loi log-normale

La loi log-normale (pouvant aussi s'écrire « *lognormale* » ou même « *log normale* ») permet de représenter des hasards avec un mode croissant puis décroissant. Par définition, la durée t est telle que :

$$\frac{\text{Ln } t - \text{Ln } m}{\sigma} \sim N(0,1)$$

Dans la grande majorité des cas, l'écriture de la loi log-normale utilise une valeur μ de la médiane telle que $\mu = \text{Ln } m$ ainsi la médiane est donnée par $m = e^\mu$. Avec l'écriture adoptée la médiane est directement donnée par la valeur de m et la moyenne par $m + \frac{\sigma^2}{2}$.

Ainsi, la loi de densité de la loi log-normale s'écrit :

$$f(t, m, \sigma) = \frac{1}{t \cdot \sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\text{Ln } t - \text{Ln } m)^2}{2\sigma^2}\right) = \frac{1}{t\sigma} \phi\left(\frac{\text{Ln } t - \text{Ln } m}{\sigma}\right)$$

Sa fonction de répartition est donnée par :

$$F(t) = \Phi\left(\frac{\text{Ln } t - \text{Ln } m}{\sigma}\right) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \text{erf}\left(\frac{\text{Ln } t - \text{Ln } m}{\sigma\sqrt{2}}\right)$$

Tel que $\text{erf}(t)$ se rapporte à la fonction erreur définie par :

$$\text{erf}(t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^t e^{-u^2} du$$

La fonction de survie d'une loi log-normale s'énonce comme :

$$S(t) = 1 - F(t) = 1 - \Phi\left(\frac{\text{Ln } t - \text{Ln } m}{\sigma}\right) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \text{erf}\left(\frac{\text{Ln } t - \text{Ln } m}{\sigma\sqrt{2}}\right)$$

Le hasard de la loi log-normale n'est pas monotone à la différence de celui de la loi de Weibull. Il possède une expression analytique dépendant du ratio de Mills inverse :

$$h(t) = \frac{1}{t\sigma} \frac{\phi\left(\frac{\text{Ln } t - \text{Ln } m}{\sigma}\right)}{1 - \Phi\left(\frac{\text{Ln } t - \text{Ln } m}{\sigma}\right)}$$

Où ϕ et Φ sont la densité et la fonction de répartition de la loi normale centrée réduite.

Les figures 9 et 10 permettent d'observer les effets d'une hausse de la durée de vie médiane, en fixant la valeur de σ à une valeur de 0.5 sur la fonction de densité et la loi de survie de type log-normale. La variation de la médiane provoque un étirement des queues de

distribution et un allongement des courbes de survie. Ainsi et pour le cas des véhicules particuliers, m correspond à l'abscisse du taux de survie médian.

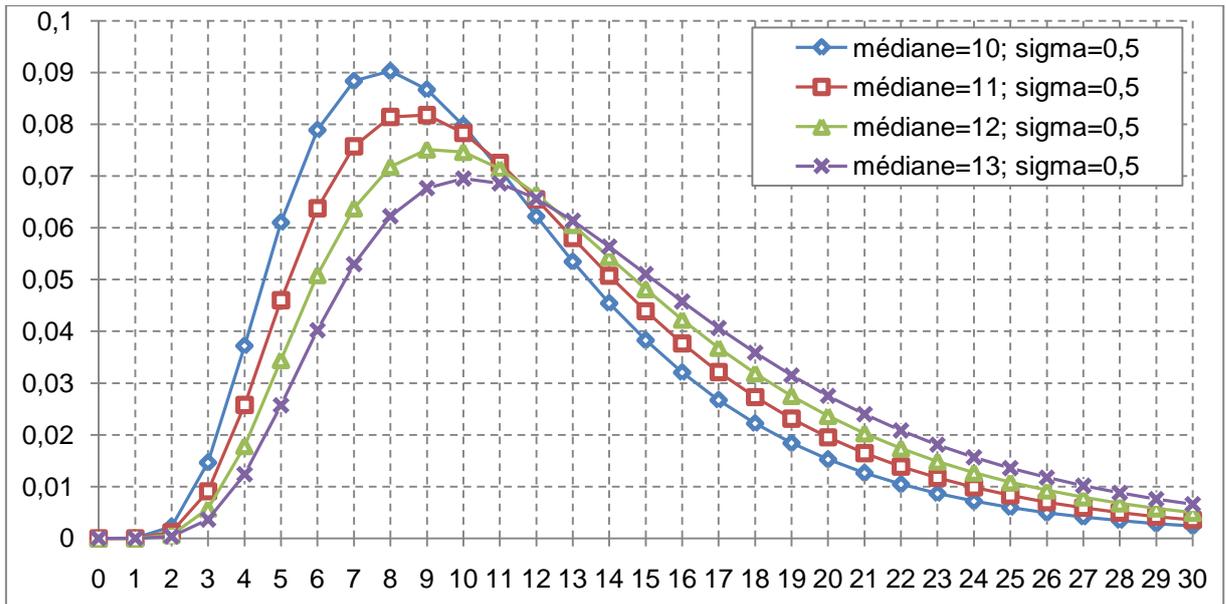


Figure 9 : Distribution de probabilité pour une loi log-normale pour $\sigma = 0.5$ et m à valeurs dans $\{10; 11; 12; 13\}$

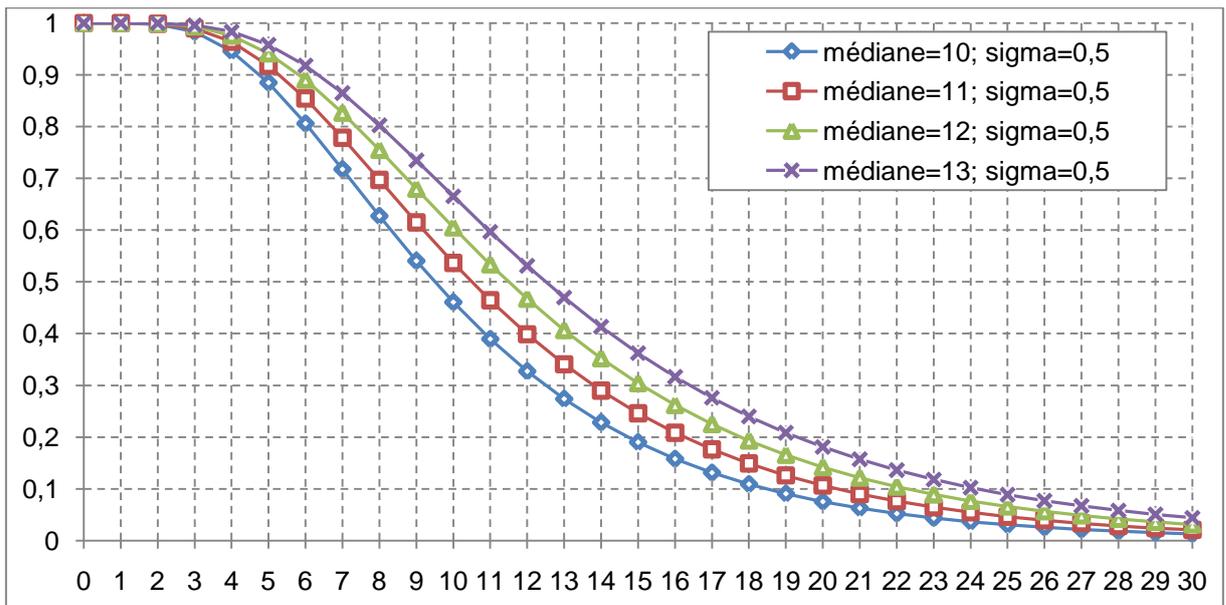


Figure 10 : Loi de survie log-normale pour $\sigma = 0.5$ et m à valeurs dans $\{10; 11; 12; 13\}$

Sur les figures 11 et 12 nous pouvons observer les effets d'une variation de la constante σ sur le tracé des courbes de distribution et de survie pour la loi log-normale. Pour ce faire nous avons préalablement fixé la constante m à une valeur égale à 10. Ainsi pour le cas des véhicules particuliers, la constante σ est un indicateur de mesure de la dispersion des durées de vie autour de la durée de vie médiane. Par conséquent, lorsque la valeur de σ augmente, le taux de déclassement s'accélère, et la courbure de la loi de survie diminue.

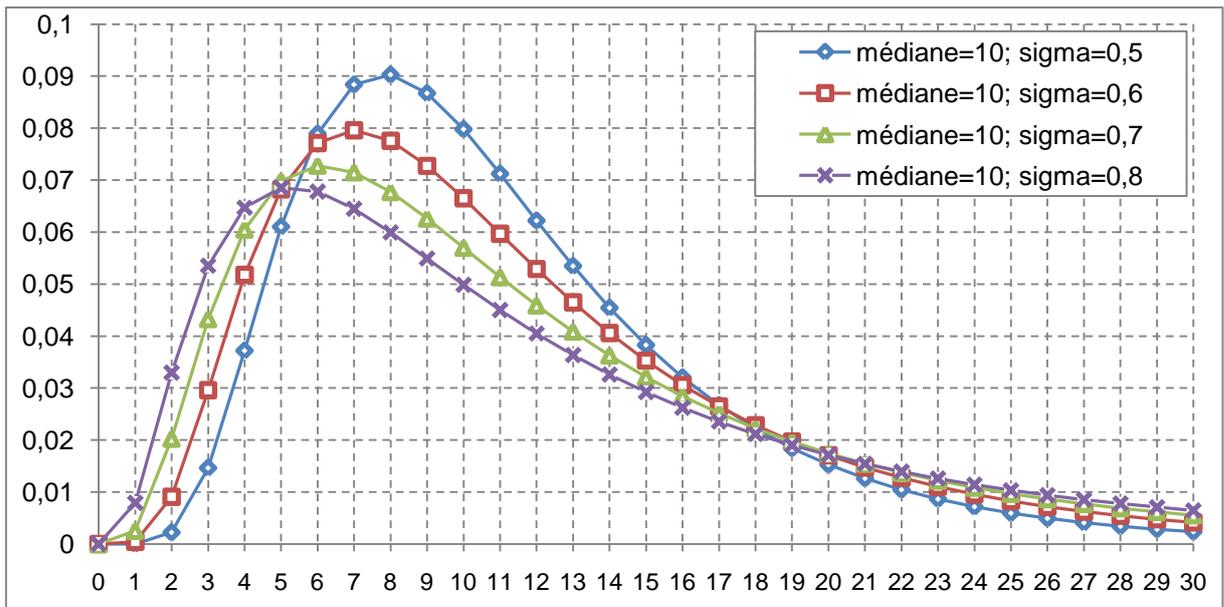


Figure 11 : Distribution de probabilité d'une loi log-normale pour $m = 10$ et σ à valeurs dans $\{0.5; 0.6; 0.7; 0.8\}$

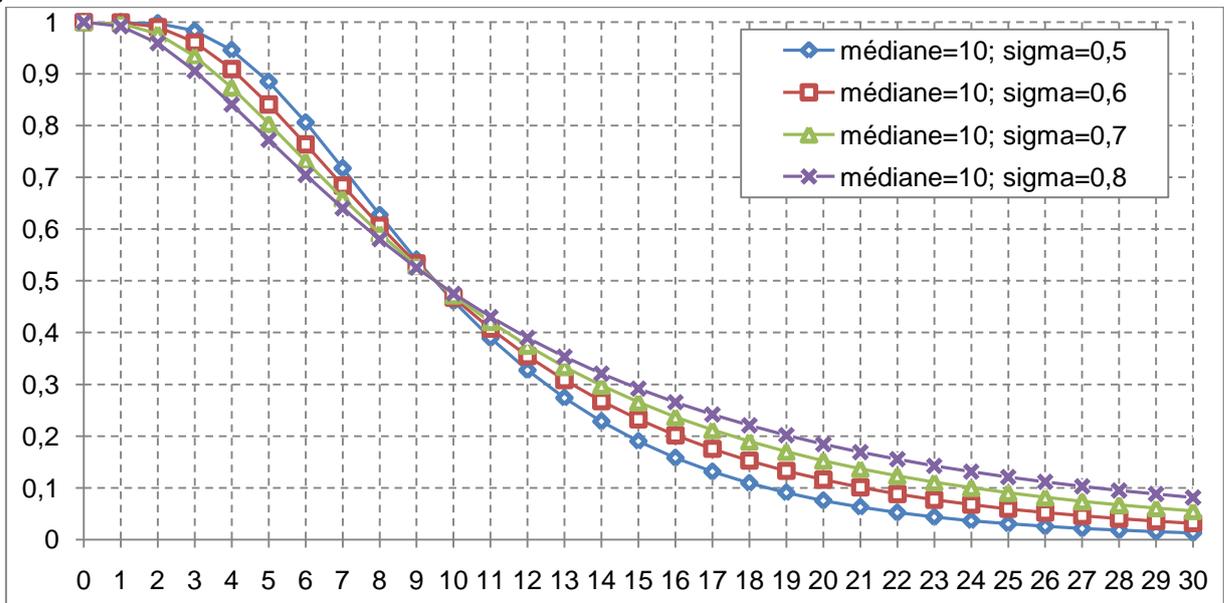


Figure 12 : Loi de survie log-normale pour $m = 10$ et σ à valeurs dans $\{0.5; 0.6; 0.7; 0.8\}$

Annexe 4-3 : La loi log-logistique

La loi log-logistique est, tout comme la loi log-normale caractérisée la caractérisée par un hasard non monotone dépendant du ratio de Mills :

$$h(t) = \frac{1}{t\sigma} \frac{\phi\left(\frac{\ln t - \ln m}{\sigma}\right)}{1 - \Phi\left(\frac{\ln t - \ln m}{\sigma}\right)}$$

La fonction de distribution de la loi log-logistique possède différentes écritures possibles dans la littérature et par souci d'homogénéité et de simplicité dans la formulation nous choisissons celle de Kieffer (1988).

La loi log-logistique est caractérisée par deux constantes $\gamma > 0$ et $\alpha > 0$. La fonction de hasard de la loi log-logistique est donnée par :

$$h(t) = \frac{\gamma \alpha t^{\alpha-1}}{1 + \gamma t^\alpha}$$

La densité de probabilité est définie par Kieffer (1988) comme suit :

$$f(t) = \frac{\gamma \alpha t^{\alpha-1}}{(1 + \gamma t^\alpha)^2}$$

La fonction de survie possède une écriture très simple et pratique à utiliser :

$$S(t) = \frac{1}{1 + \gamma t^\alpha}$$

Pour $\alpha \geq 1$ le hasard commence par décroître puis par croître avec le temps. Si $0 < \alpha \leq 1$ la fonction de hasard est monotone et décroît avec le temps. La principale difficulté de la loi log-logistique réside dans l'échelle du paramètre γ . Aucune étude recensée ne donne d'application d'une loi de survie de type log-logistique avec une forme générale qui diffère ainsi de la forme d'une loi exponentielle (ayant un hasard constant). La recherche des paramètres a été réalisée par un ajustement recourant aux moindres carrés non linéaires. Les bornes de recherche situées dans l'intervalle $[10^{-3}; 10^{-5}]$ ont été trouvées par tâtonnement en divisant par 10 à chaque fois les valeurs des bornes de l'intervalle de recherche.

Dans la figure 1.13, nous choisissons d'illustrer la loi de survie log-logistique en fixant γ à 0.0004 et en faisant varier α entre 11 et 14 avec un pas de 1. Dans la figure 1.14 c'est γ qui est fixé et α qui varie sous les mêmes conditions.

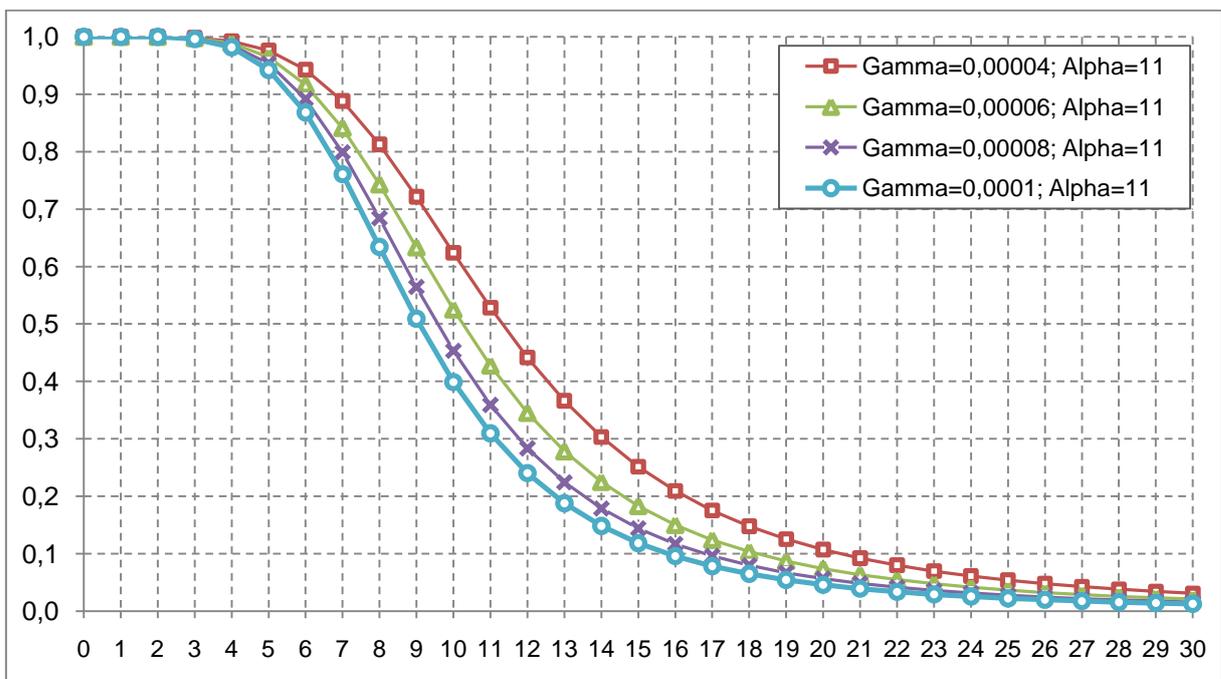


Figure 13 : Loi de survie log-logistique pour $\gamma = 0.0004$ et α à valeurs dans $\{11 ; 12 ; 13 ; 14\}$

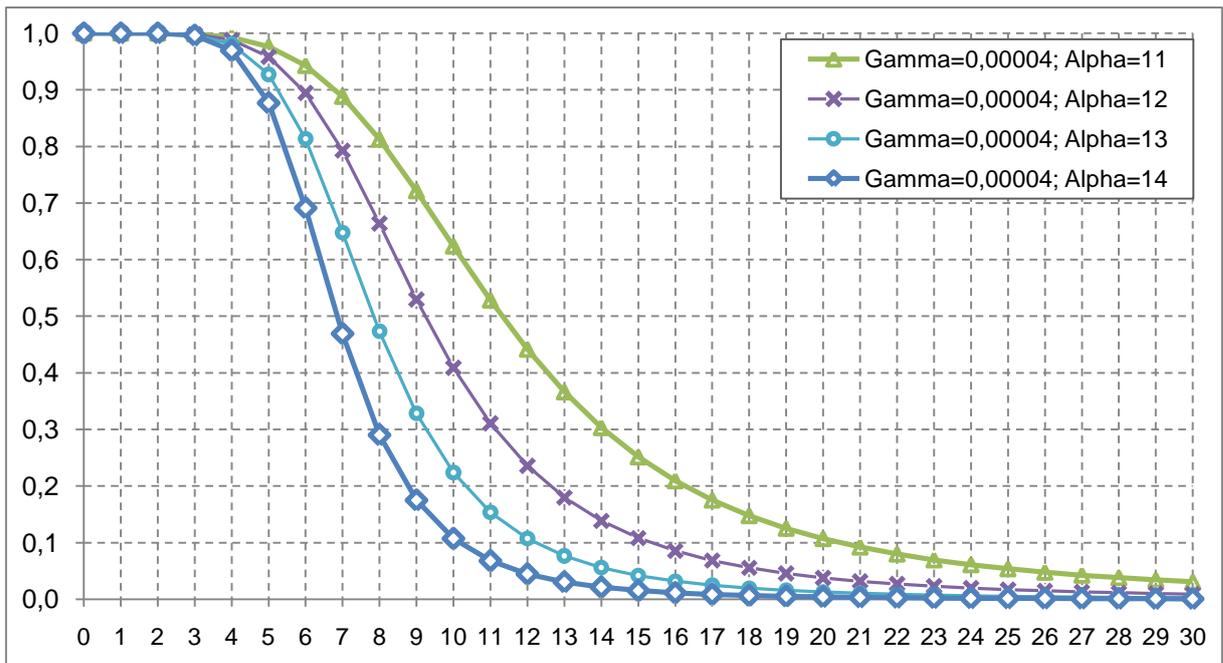


Figure 14 : Loi de survie log-logistique pour $\alpha=11$ et à γ valeurs dans $\{0.00004 ; 0.00006 ; 0.00008 ; 0.0001\}$

Annexe 4-4 : Ajustement Weibull sur taux de survie transversaux pour les années 1984 à 2007.

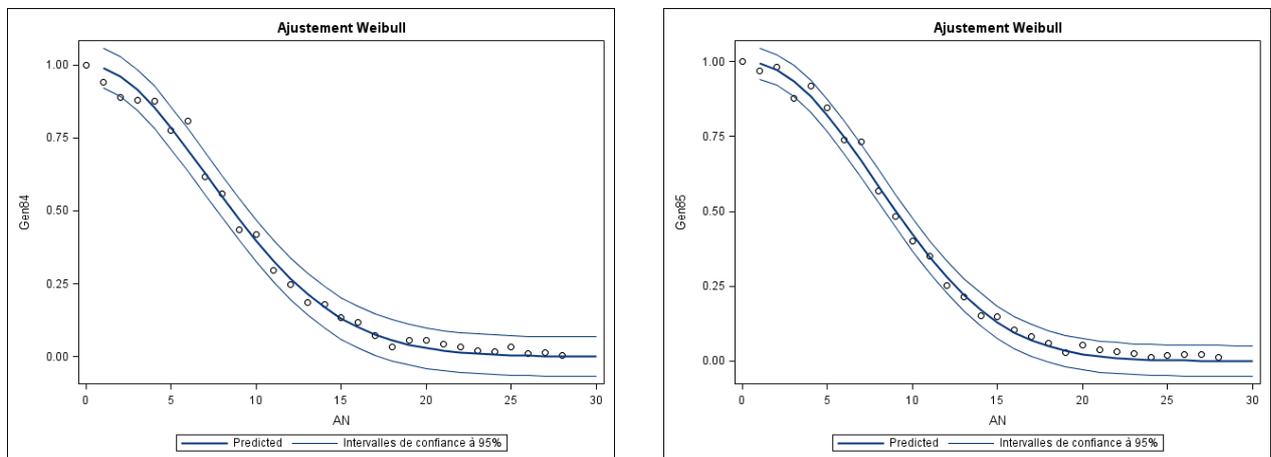


Figure 1 – Ajustements sur taux de survie transversaux pour les années 1984 et 1985 à une loi de survie de Weibull

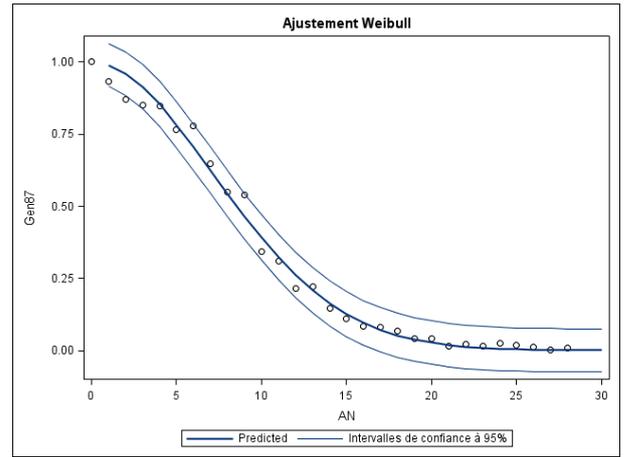
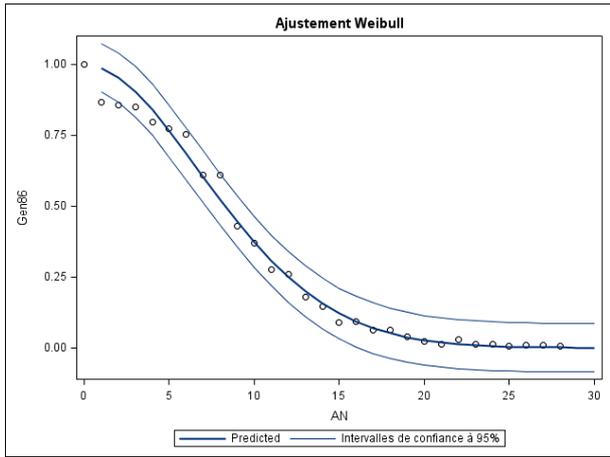


Figure 2 – Ajustements sur taux de survie transversaux pour les années 1984 et 1985 à une loi de survie de Weibull

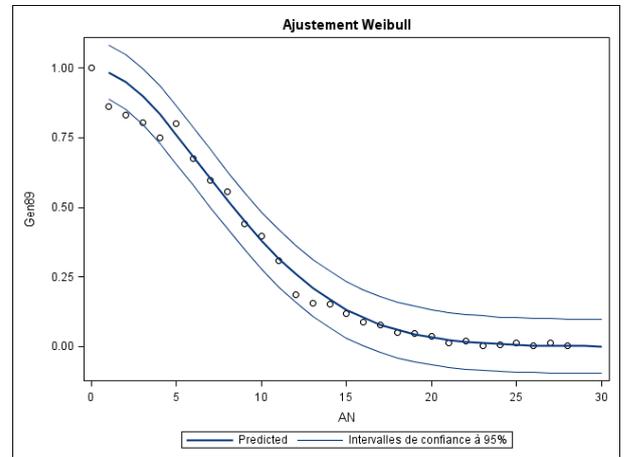
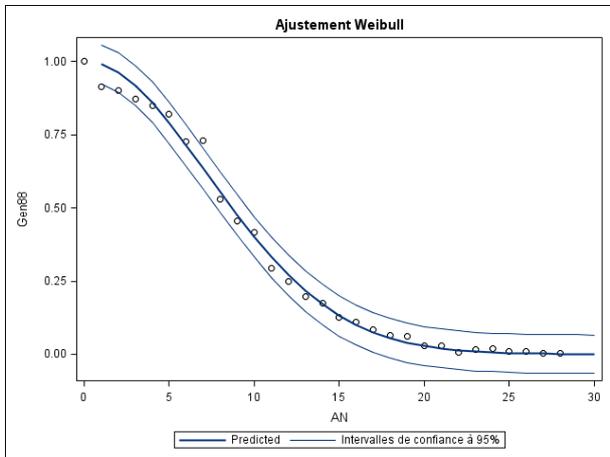


Figure 3 – Ajustements sur taux de survie transversaux pour les années 1988 et 1989 à une loi de survie de Weibull

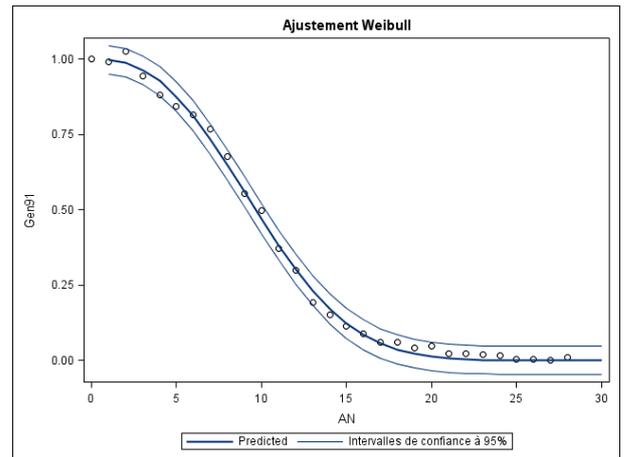
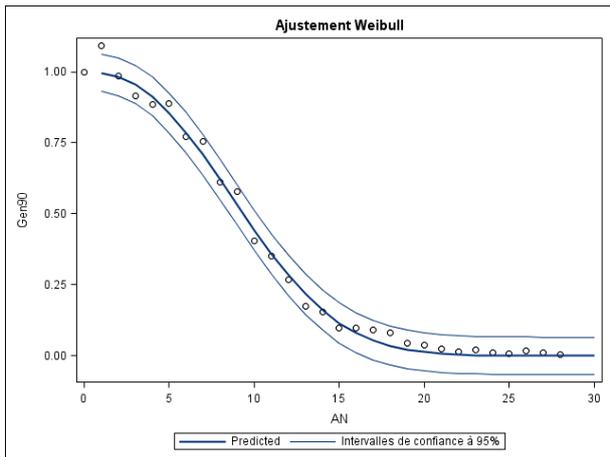


Figure 4 – Ajustements sur taux de survie transversaux pour les années 1990 et 1991 à une loi de survie de Weibull

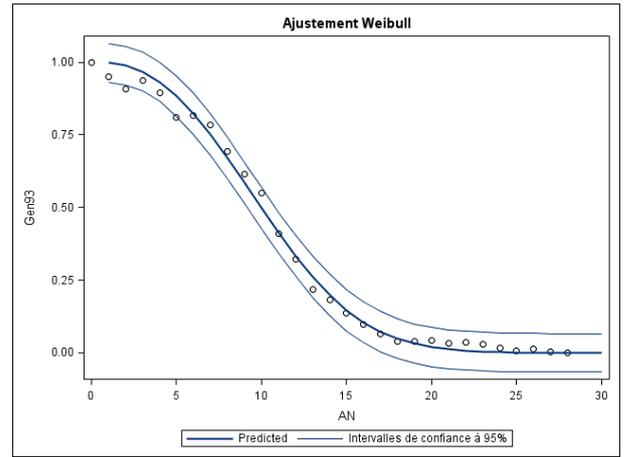
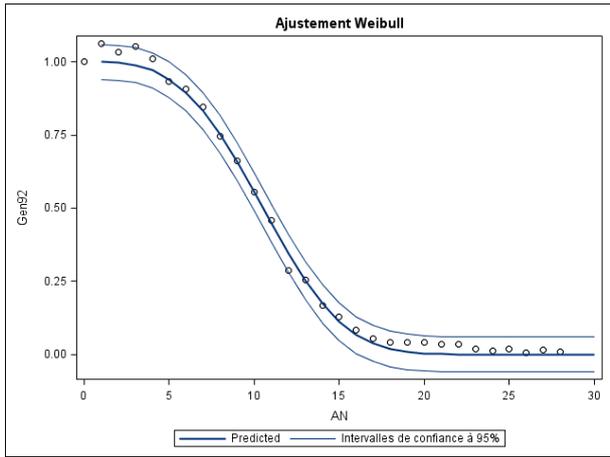


Figure 5 – Ajustements sur taux de survie transversaux pour les années 1992 et 1993 à une loi de survie de Weibull

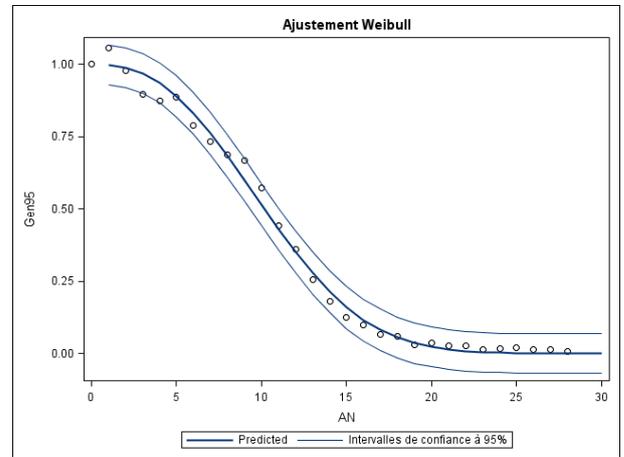
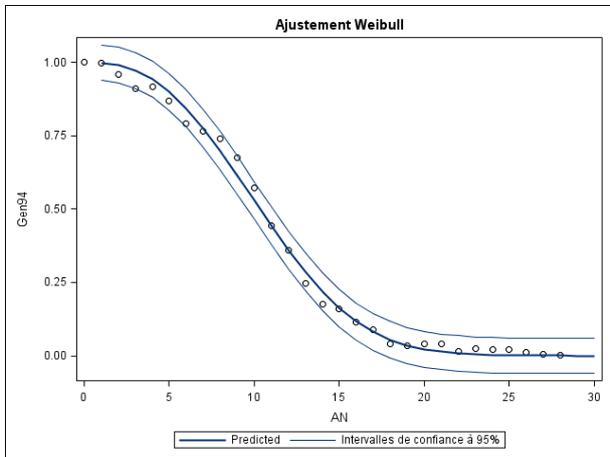


Figure 6 – Ajustements sur taux de survie transversaux pour les années 1995 et 1996 à une loi de survie de Weibull

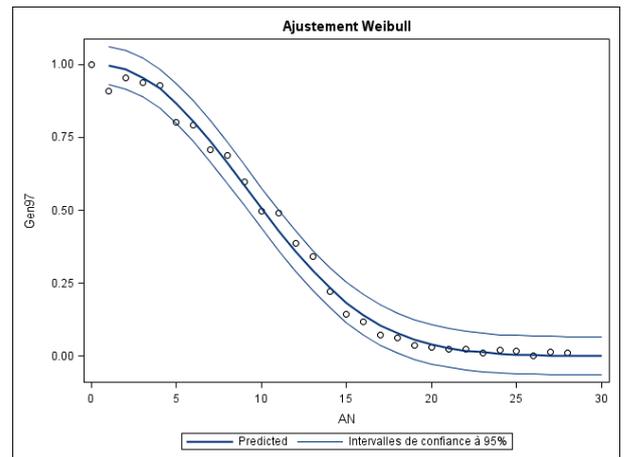
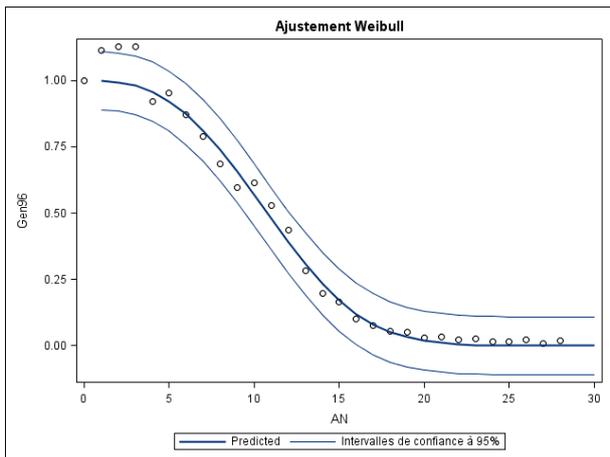


Figure 7 – Ajustements sur taux de survie transversaux pour les années 1996 et 1997 à une loi de survie de Weibull

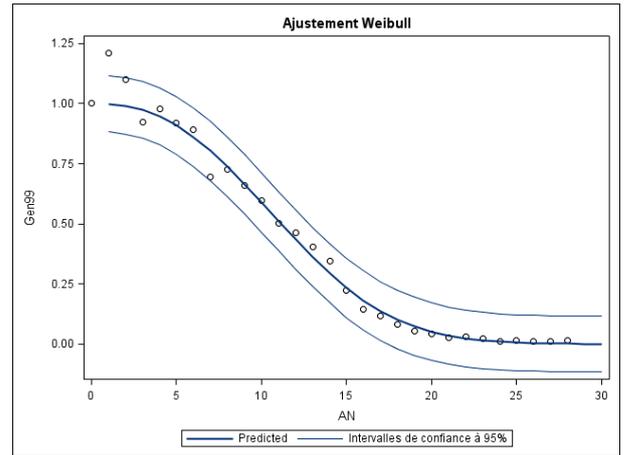
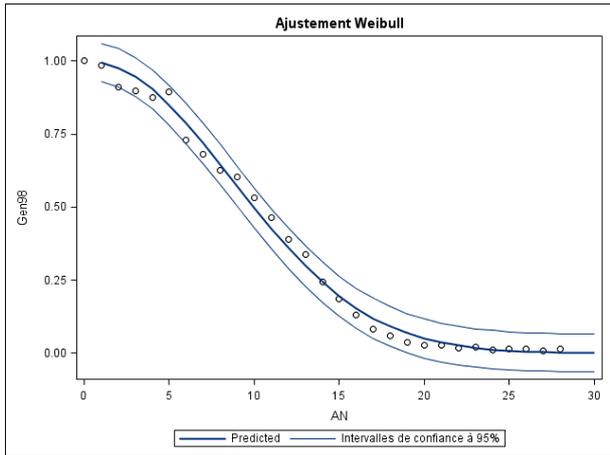


Figure 8 – Ajustements sur taux de survie transversaux pour les années 1998 et 1999 à une loi de survie de Weibull

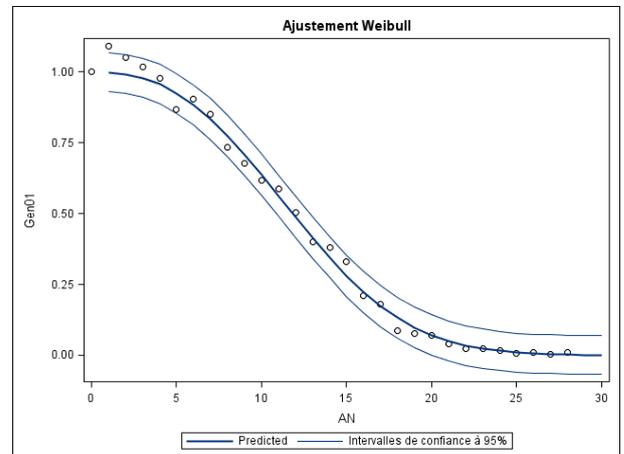
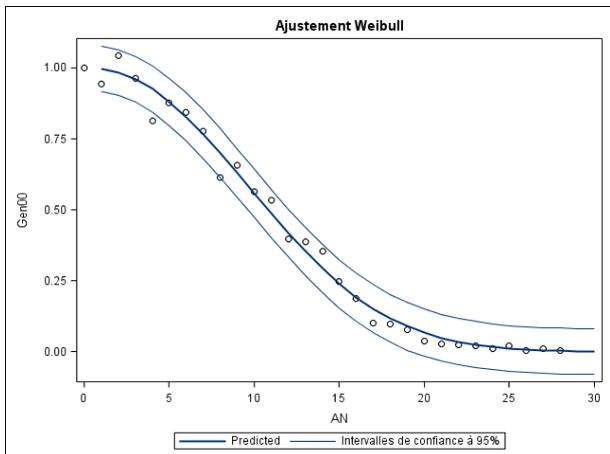


Figure 9 – Ajustements sur taux de survie transversaux pour les années 2000 et 2001 à une loi de survie de Weibull

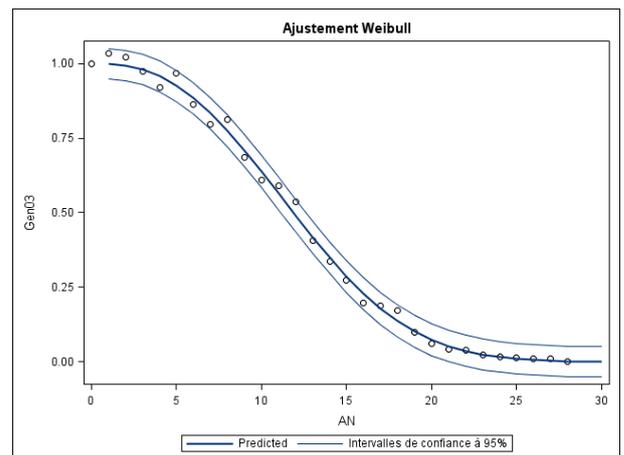
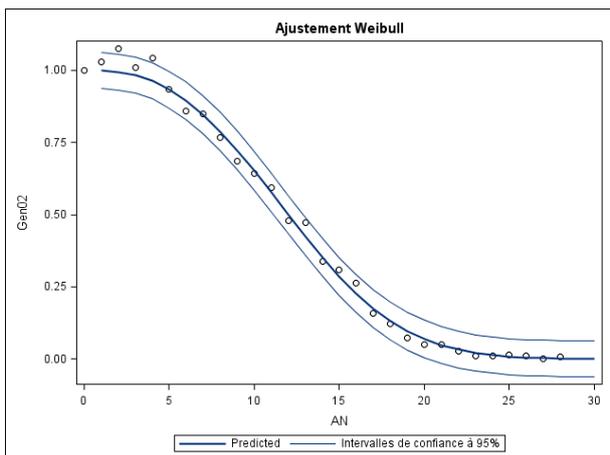


Figure 10 – Ajustements sur taux de survie transversaux pour les années 2002 et 2003 à une loi de survie de Weibull

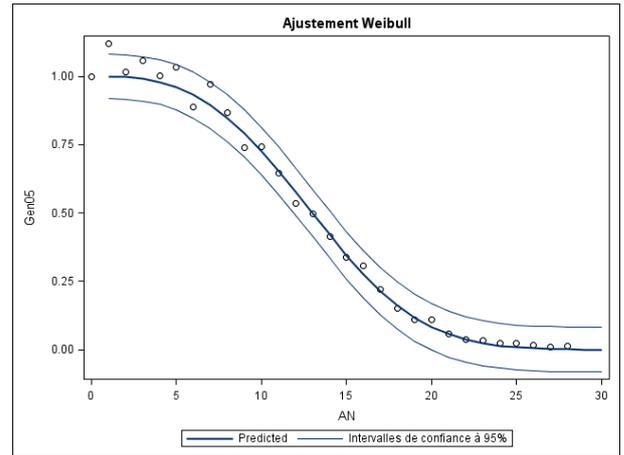
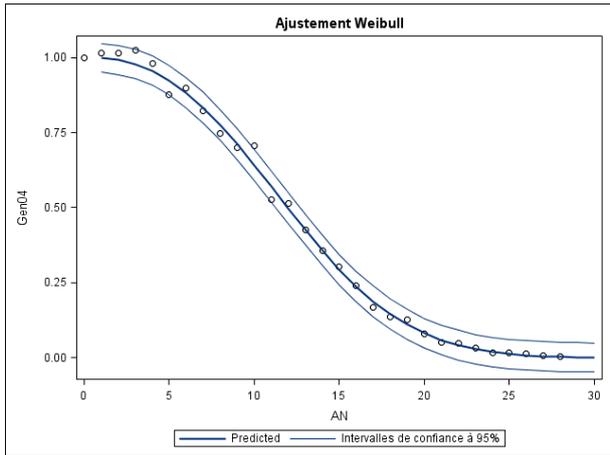


Figure 11 – Ajustements sur taux de survie transversaux pour les années 2004 et 2005 à une loi de survie de Weibull

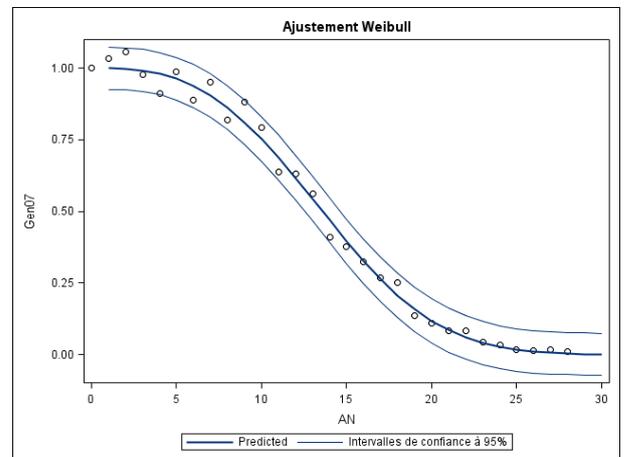
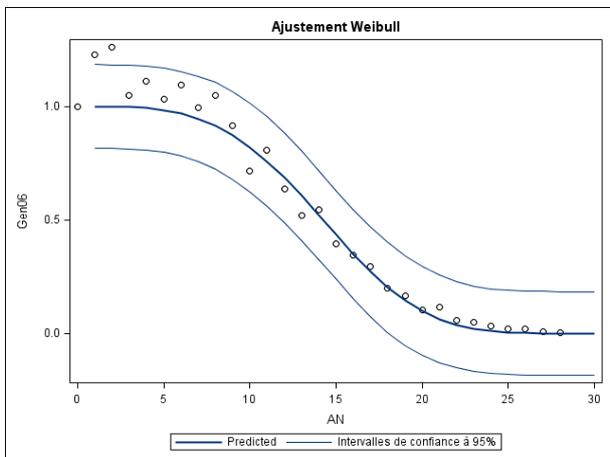


Figure 12 – Ajustements sur taux de survie transversaux pour les années 2006 et 2007 à une loi de survie de Weibull

| Ajustement WEIBULL | Itérations | Nb.Obs. | Alpha (α) | Beta(β) | Intervalle de confiance de Alpha(α) à 95% | Intervalle de confiance de Beta(β) à 95% | Fisher |
|-------------------------------|------------|---------|--------------------|-----------------|--|--|--------|
| <i>Année 1984</i> | 8 | 28 | 1.933 | 10.407 | [1,765 ; 2,100] | [10,082 ; 10,732] | 2645 |
| <i>Année 1985</i> | 8 | 28 | 2.128 | 10.715 | [1,985 ; 2,271] | [10,477 ; 10,954] | 5044 |
| <i>Année 1986</i> | 8 | 28 | 1.877 | 10.071 | [1,671 ; 2,082] | [9,663 ; 10,478] | 1526 |
| <i>Année 1987</i> | 8 | 28 | 1.945 | 10.324 | [1,760 ; 2,132] | [9,970 ; 10,678] | 2134 |
| <i>Année 1988</i> | 8 | 28 | 1.963 | 10.457 | [1,798 ; 2,128] | [10,145 ; 10,770] | 2824 |
| <i>Année 1989</i> | 8 | 28 | 1.820 | 10.190 | [1,597 ; 2,043] | [9,715 ; 10,665] | 1100 |
| <i>Année 1990</i> | 8 | 28 | 2.394 | 10.890 | [1,596 ; 1,879] | [10,599 ; 11,181] | 3329 |
| <i>Année 1991</i> | 7 | 28 | 2.508 | 11.174 | [2,349 ; 2,668] | [10,970 ; 11,378] | 6769 |
| <i>Année 1992</i> | 7 | 28 | 3.249 | 11.768 | [2,964 ; 3,534] | [11,532 ; 12,004] | 4997 |
| <i>Année 1993</i> | 7 | 28 | 2.498 | 11.543 | [2,278 ; 2,719] | [11,249 ; 11,836] | 3328 |
| <i>Année 1994</i> | 7 | 28 | 2.585 | 11.900 | [2,378 ; 2,793] | [11,633 ; 12,167] | 4283 |
| <i>Année 1995</i> | 6 | 28 | 2.503 | 11.769 | [2,276 ; 2,729] | [11,463 ; 12,075] | 3294 |
| <i>Année 1996</i> | 4 | 28 | 2.803 | 12.250 | [2,386 ; 3,220] | [11,777 ; 12,724] | 1530 |
| <i>Année 1997</i> | 5 | 28 | 2.255 | 11.862 | [2,067 ; 2,442] | [11,551 ; 12,172] | 3396 |
| <i>Année 1998</i> | 6 | 28 | 2.097 | 11.859 | [1,928 ; 2,265] | [11,540 ; 12,178] | 3396 |
| <i>Année 1999</i> | 4 | 28 | 2.490 | 12.900 | [2,124 ; 2,855] | [12,354 ; 13,446] | 1361 |
| <i>Année 2000</i> | 5 | 28 | 2.206 | 12.759 | [1,991 ; 2,421] | [12,360 ; 13,158] | 2486 |
| <i>Année 2001</i> | 4 | 28 | 2.555 | 13.652 | [2,338 ; 2,772] | [13,325 ; 13,979] | 4088 |
| <i>Année 2002</i> | 5 | 28 | 2.640 | 13.776 | [2,434 ; 2,846] | [13,482 ; 14,070] | 5019 |
| <i>Année 2003</i> | 4 | 28 | 2.525 | 13.704 | [2,366 ; 2,684] | [13,459 ; 13,949] | 7198 |
| <i>Année 2004</i> | 4 | 28 | 2.502 | 13.838 | [2,355 ; 2,650] | [13,604 ; 14,072] | 8142 |
| <i>Année 2005</i> | 5 | 28 | 2.959 | 14.696 | [2,653 ; 3,265] | [14,320 ; 15,072] | 3321 |
| <i>Année 2006</i> | 7 | 28 | 3.551 | 15.791 | [2,691 ; 4,411] | [14,986 ; 16,596] | 811 |
| <i>Année 2007</i> | 5 | 28 | 2.908 | 15.391 | [2,645 ; 3,172] | [15,041 ; 15,742] | 4052 |

Tableau 1. Paramètres d'ajustements d'une loi de survie de Weibull sur taux de survie transversaux pour les années 1984 à 2007

Annexe 4-5 : Ajustement d'une loi log-normale sur taux de survie transversaux pour les années 1984 à 2007.

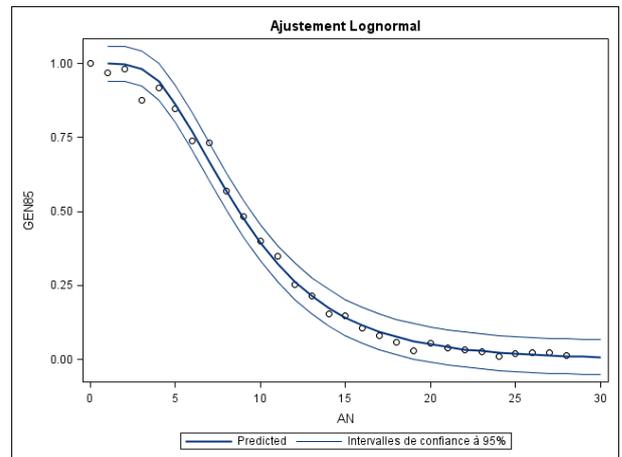
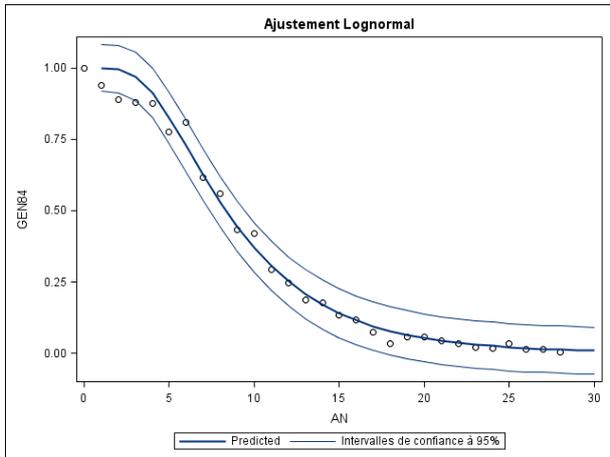


Figure 1 – Ajustements sur taux de survie transversaux pour les années 1984 et 1985 à une loi de survie de log-normale

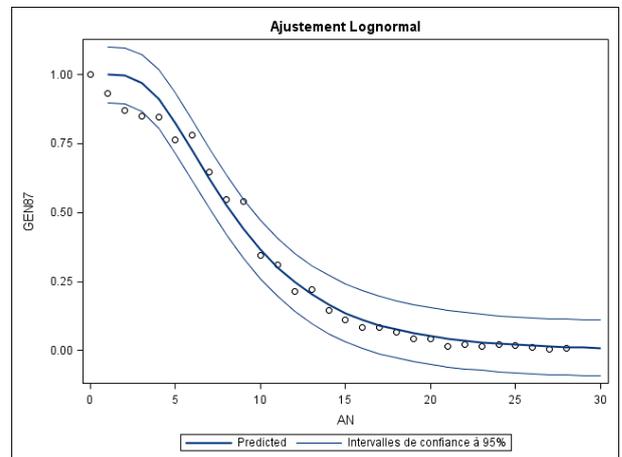
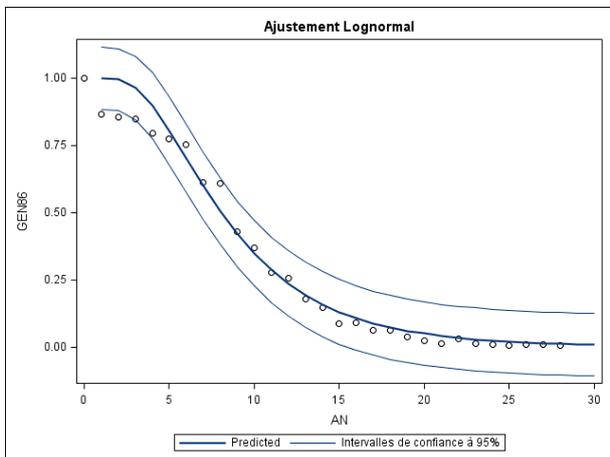


Figure 2 – Ajustements sur taux de survie transversaux pour les années 1986 et 1987 à une loi de survie de log-normale

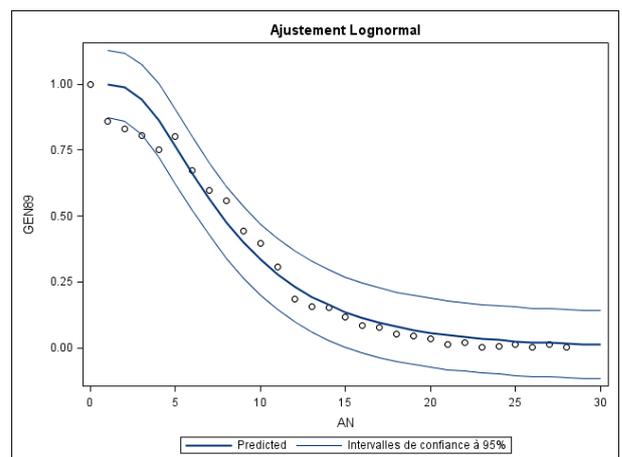
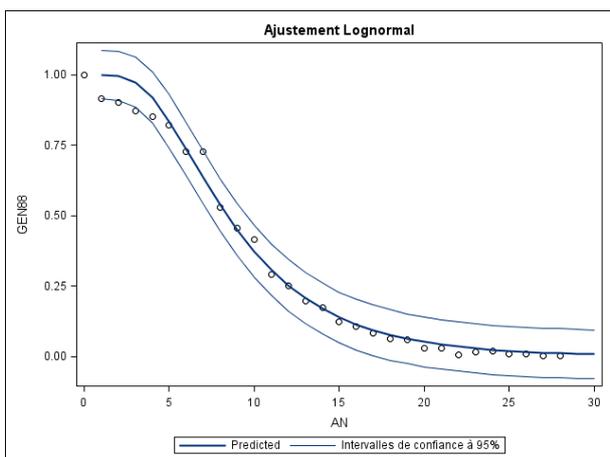


Figure 3 – Ajustements sur taux de survie transversaux pour les années 1988 et 1989 à une loi de survie de log-normale

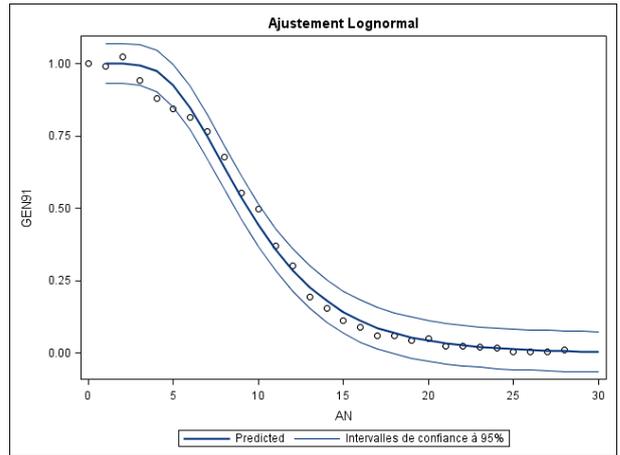
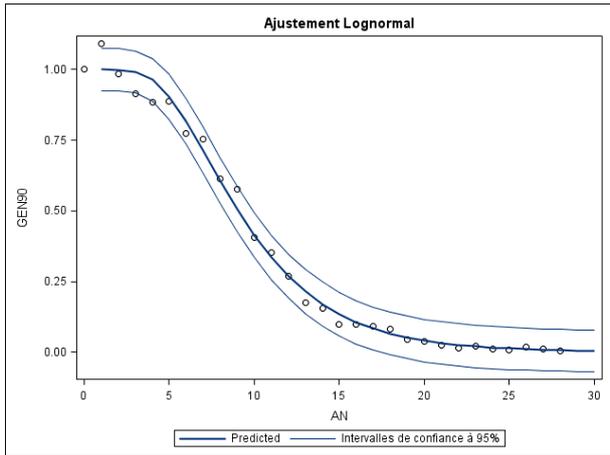


Figure 4 – Ajustements sur taux de survie transversaux pour les années 1990 et 1991 à une loi de survie de log-normale

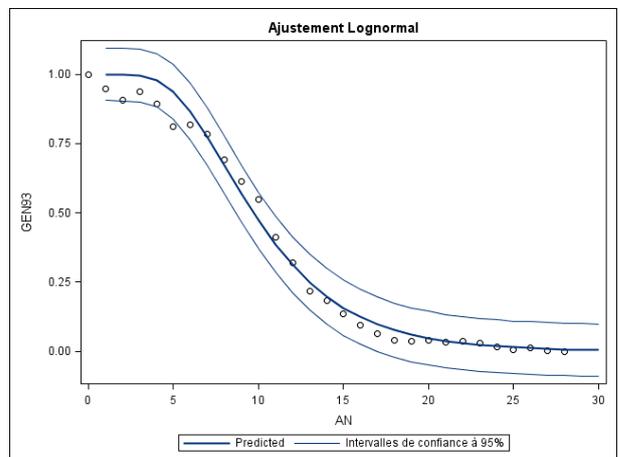
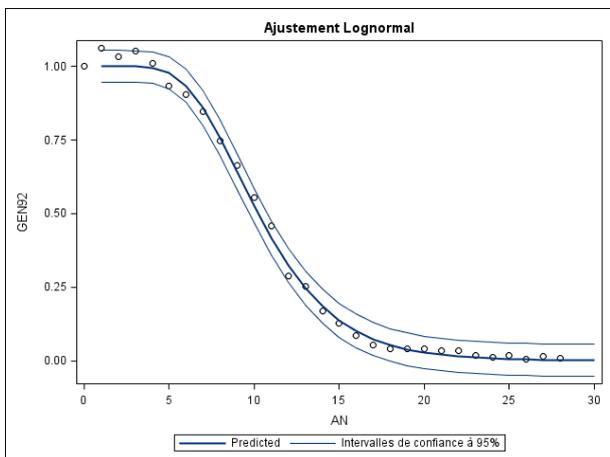


Figure 5 – Ajustements sur taux de survie transversaux pour les années 1992 et 1993 à une loi de survie de log-normale

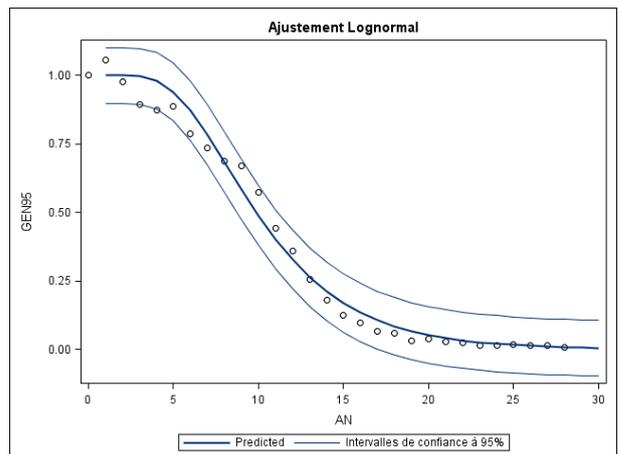
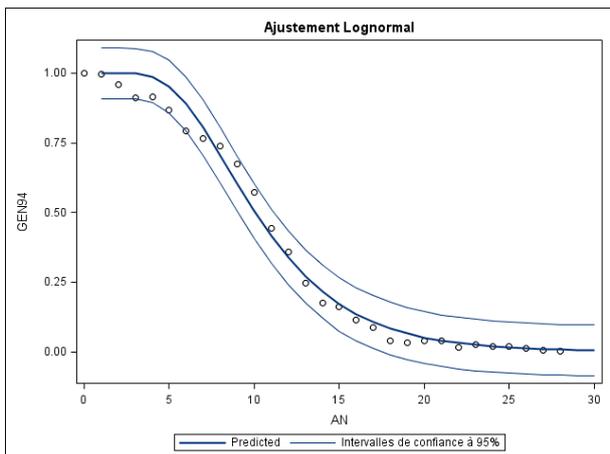


Figure 6 – Ajustements sur taux de survie transversaux pour les années 1994 et 1995 à une loi de survie de log-normale

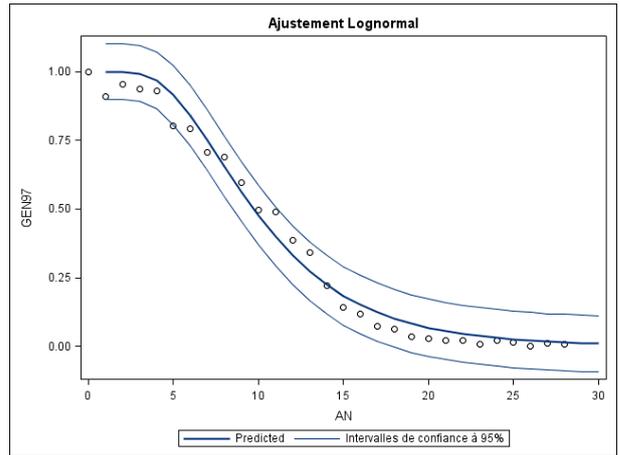
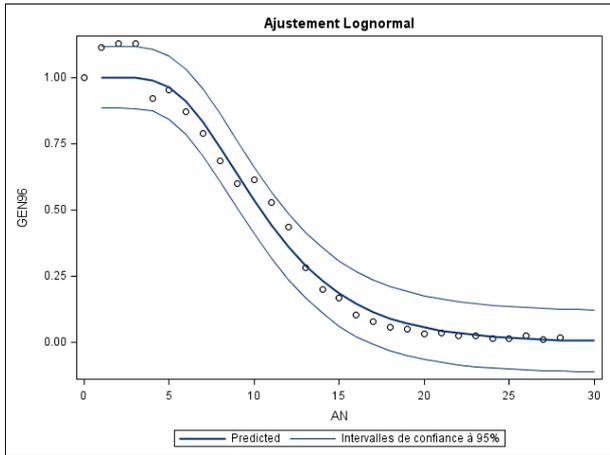


Figure 7 – Ajustements sur taux de survie transversaux pour les années 1996 et 1997 à une loi de survie de log-normale

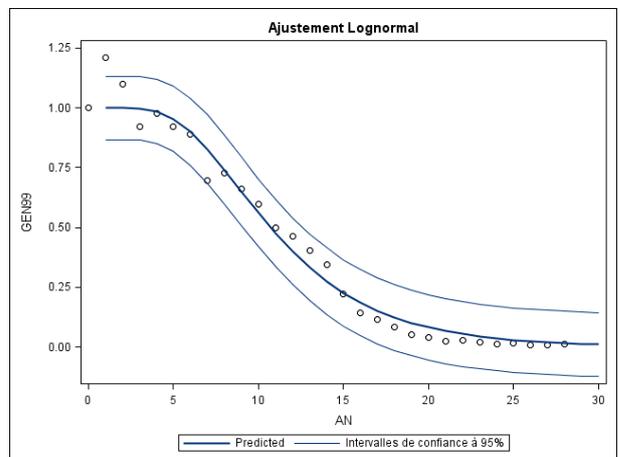
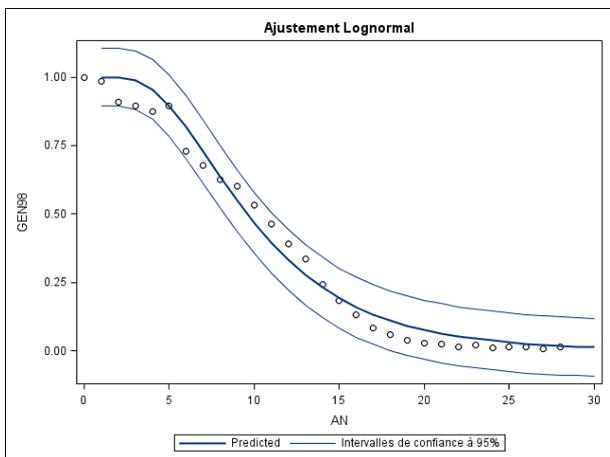


Figure 8 – Ajustements sur taux de survie transversaux pour les années 1998 et 1999 à une loi de survie de log-normale

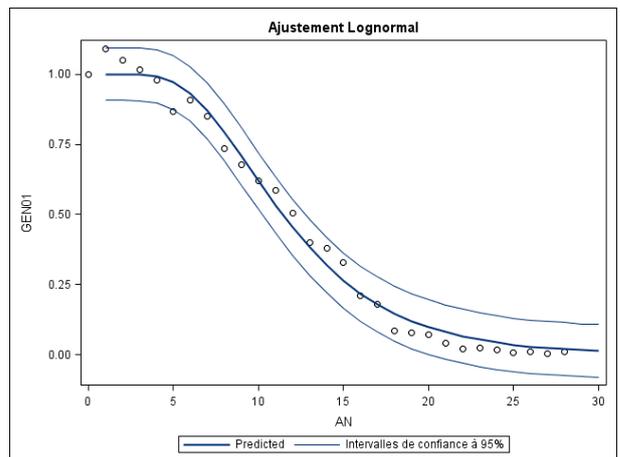
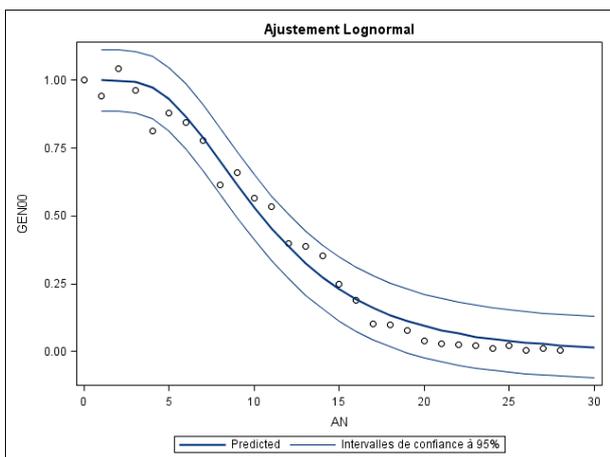


Figure 9 – Ajustements sur taux de survie transversaux pour les années 2000 et 2001 à une loi de survie de log-normale

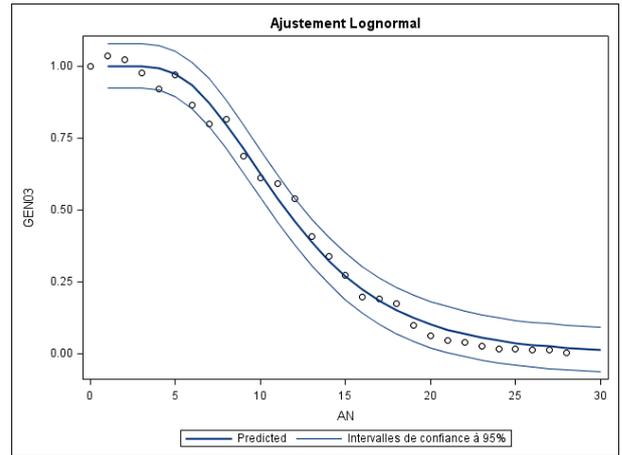
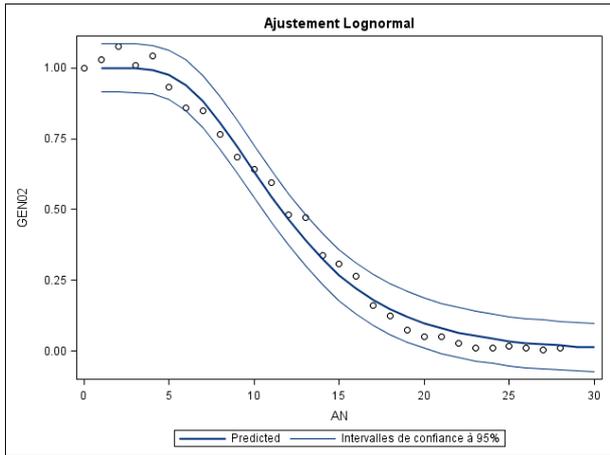


Figure 10 – Ajustements sur taux de survie transversaux pour les années 2002 et 2003 à une loi de survie de log-normale

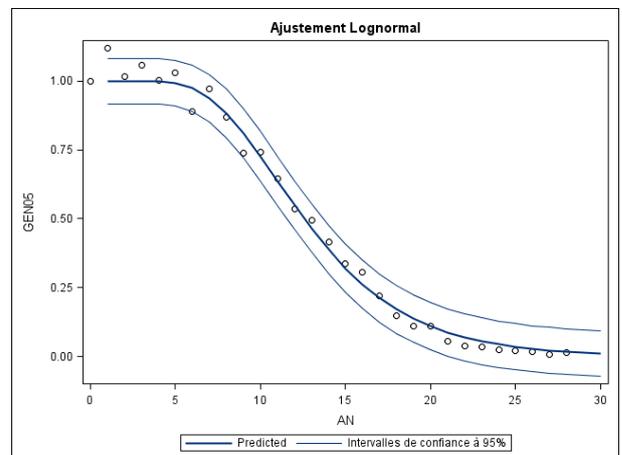
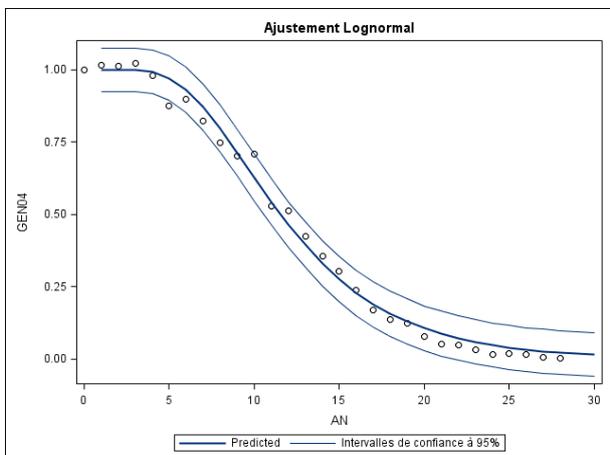


Figure 11 – Ajustements sur taux de survie transversaux pour les années 2004 et 2005 à une loi de survie de log-normale

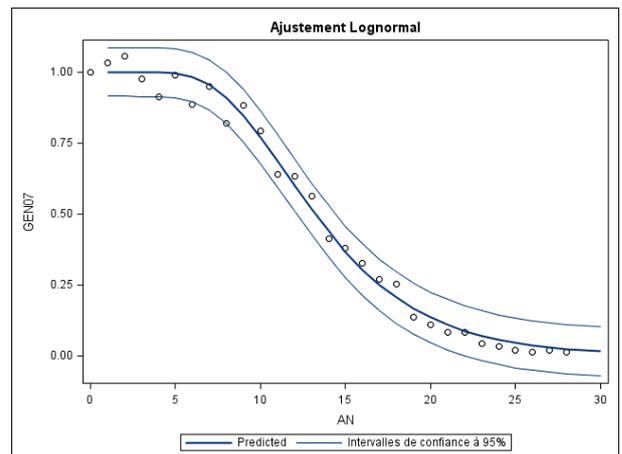
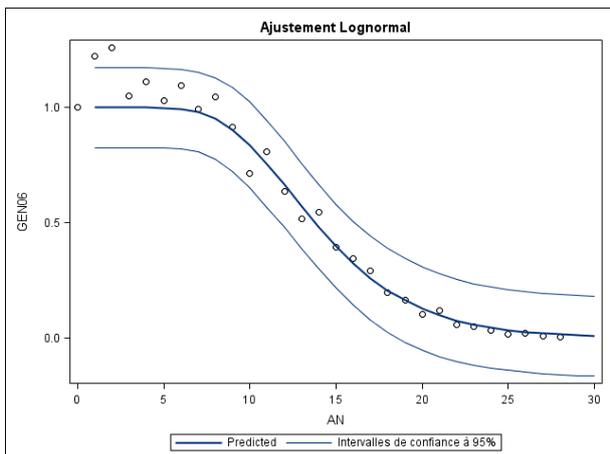


Figure 12 – Ajustements sur taux de survie transversaux pour les années 2006 et 2007 à une loi de survie de log-normale

| Ajustement LOGNORMAL | lt. | Nb. Obs. | Médiane (m) | Sigma (σ) | Intervalle de confiance de la médiane (m) à 95% | Intervalle de confiance de sigma (σ) à 95% | Fisher |
|---------------------------------|-----|----------|-----------------|-----------------------|--|---|--------|
| <i>Année 1984</i> | 7 | 28 | 8.344 | 0.5438 | [8,003 ; 8,685] | [0,4893 ; 0,5983] | 1795 |
| <i>Année 1985</i> | 6 | 28 | 8.720 | 0.5047 | [8,481 ; 8,959] | [0,4679 ; 0,5144] | 3867 |
| <i>Année 1986</i> | 9 | 28 | 8.056 | 0.5534 | [7,581 ; 8,531] | [0,4748 ; 0,6320] | 821 |
| <i>Année 1987</i> | 8 | 28 | 8.305 | 0.5386 | [7,891 ; 8,719] | [0,4720 ; 0,6052] | 1160 |
| <i>Année 1988</i> | 7 | 28 | 8.418 | 0.5323 | [8,063 ; 8,774] | [0,4758 ; 0,5888] | 1620 |
| <i>Année 1989</i> | 7 | 28 | 7.725 | 0.6032 | [7,183 ; 8,266] | [0,5103 ; 0,6961] | 625 |
| <i>Année 1990</i> | 6 | 28 | 9.062 | 0.4547 | [8,772 ; 9,351] | [0,4116 ; 0,4978] | 2654 |
| <i>Année 1991</i> | 6 | 28 | 9.369 | 0.4369 | [9,098 ; 9,639] | [0,3978 ; 0,4760] | 3053 |
| <i>Année 1992</i> | 6 | 28 | 10.222 | 0.3515 | [10,026 ; 10,419] | [0,3251 ; 0,3779] | 6052 |
| <i>Année 1993</i> | 8 | 28 | 9.702 | 0.4330 | [9,328 ; 10,076] | [0,3807 ; 0,4853] | 1606 |
| <i>Année 1994</i> | 8 | 28 | 10.049 | 0.4214 | [9,689 ; 10,409] | [0,3726 ; 0,4701] | 1859 |
| <i>Année 1995</i> | 8 | 28 | 9.869 | 0.4376 | [9,462 ; 10,276] | [0,3817 ; 0,4935] | 1479 |
| <i>Année 1996</i> | 5 | 28 | 10.357 | 0.4109 | [9,893 ; 10,820] | [0,3499 ; 0,4719] | 1340 |
| <i>Année 1997</i> | 7 | 28 | 9.718 | 0.4848 | [9,290 ; 10,144] | [0,4252 ; 0,5443] | 1398 |
| <i>Année 1998</i> | 7 | 28 | 9.583 | 0.5170 | [9,128 ; 10,039] | [0,4526 ; 0,5813] | 1279 |
| <i>Année 1999</i> | 6 | 28 | 10.705 | 0.4500 | [10,142 ; 11,267] | [0,3783 ; 0,5218] | 1037 |
| <i>Année 2000</i> | 7 | 28 | 10.400 | 0.4955 | [9,902 ; 10,898] | [0,4301 ; 0,5609] | 1243 |
| <i>Année 2001</i> | 6 | 28 | 11.399 | 0.4352 | [10,996 ; 11,802] | [0,3866 ; 0,4838] | 2157 |
| <i>Année 2002</i> | 6 | 28 | 11.547 | 0.4246 | [11,181 ; 11,913] | [0,3810 ; 0,4682] | 2629 |
| <i>Année 2003</i> | 6 | 28 | 11.458 | 0.4346 | [11,125 ; 11,791] | [0,3946 ; 0,4745] | 3093 |
| <i>Année 2004</i> | 6 | 28 | 11.539 | 0.4413 | [11,213 ; 11,865] | [0,4024 ; 0,4802] | 3353 |
| <i>Année 2005</i> | 6 | 28 | 12.564 | 0.3790 | [12,216 ; 12,912] | [0,3408 ; 0,4172] | 3198 |
| <i>Année 2006</i> | 7 | 28 | 13.798 | 0.3256 | [13,100 ; 14,495] | [0,2553 ; 0,3958] | 925 |
| <i>Année 2007</i> | 6 | 28 | 13.193 | 0.3754 | [12,827 ; 13,560] | [0,3367 ; 0,4141] | 2967 |

Tableau 1. Paramètres d'ajustements d'une loi de survie log-normale sur taux de survie transversaux pour les années 1984 à 2007

Annexe 4-6 : Ajustement d'une loi log-logistique sur taux de survie transversaux pour les années 1984 à 2007.

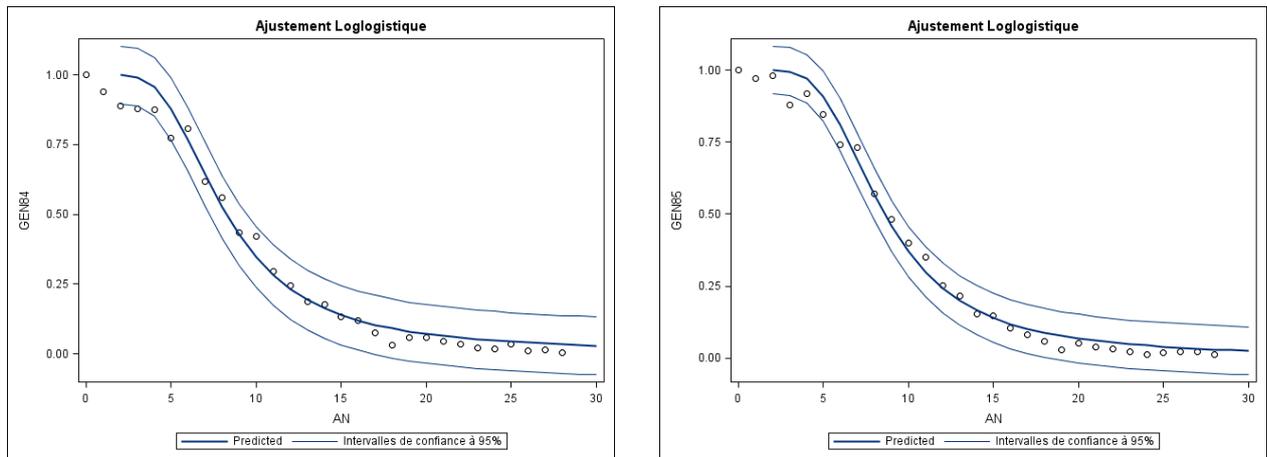


Figure 1 – Ajustements sur taux de survie transversaux pour les années 1984 et 1985 à une loi de survie de log-logistique

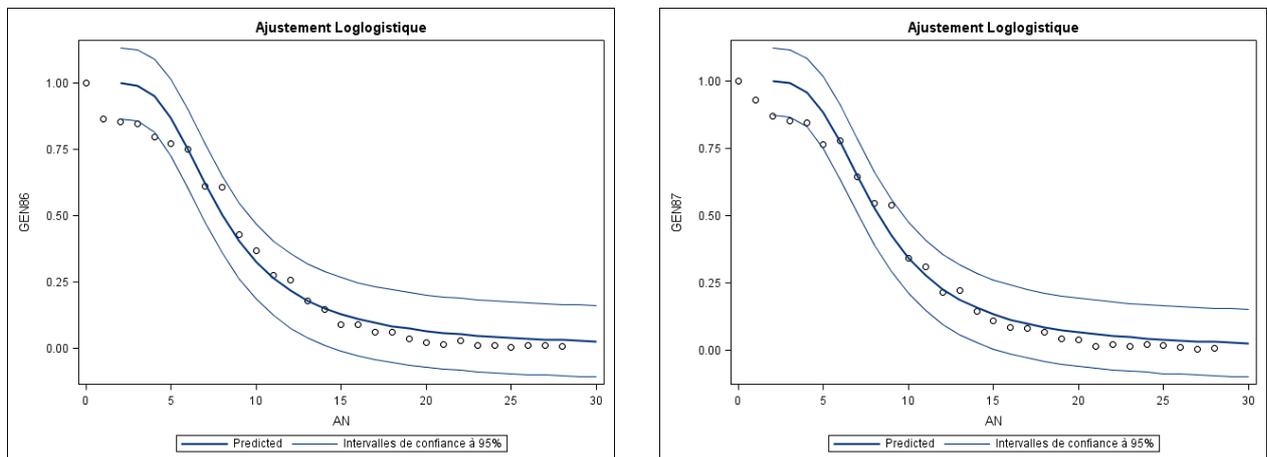


Figure 2 – Ajustements sur taux de survie transversaux pour les années 1986 et 1987 à une loi de survie de log-logistique

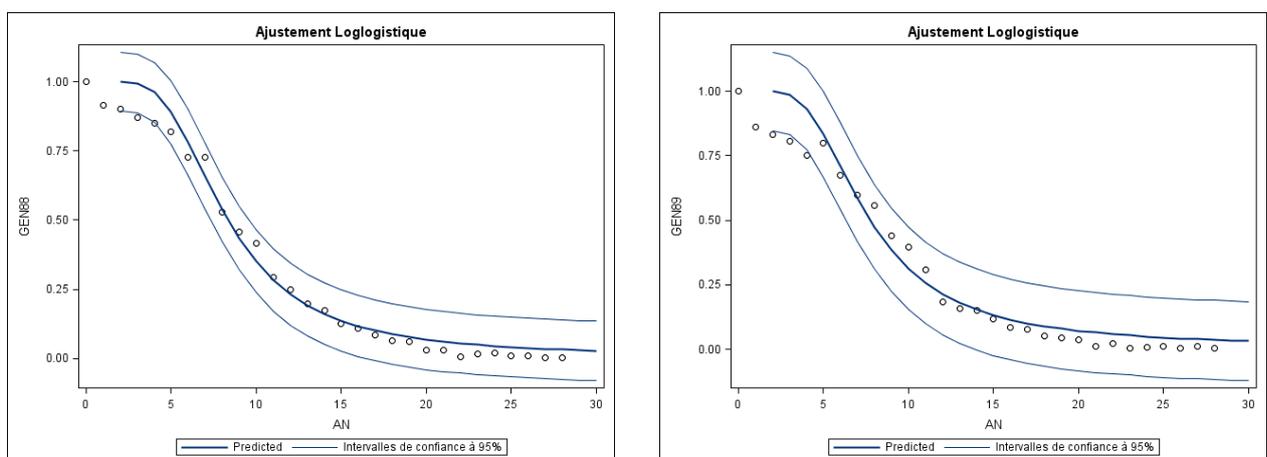


Figure 3 – Ajustements sur taux de survie transversaux pour les années 1988 et 1989 à une loi de survie de log-logistique

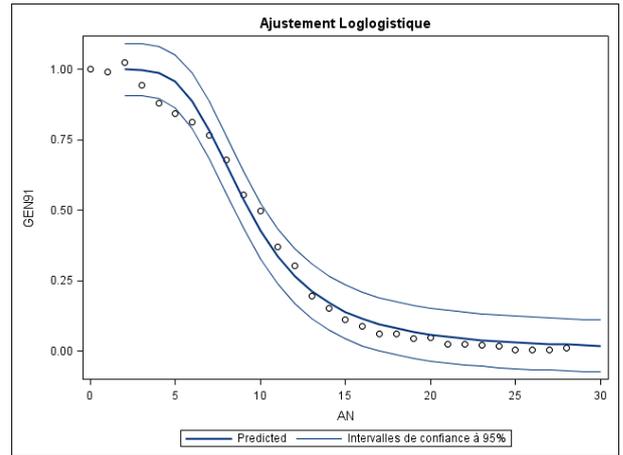
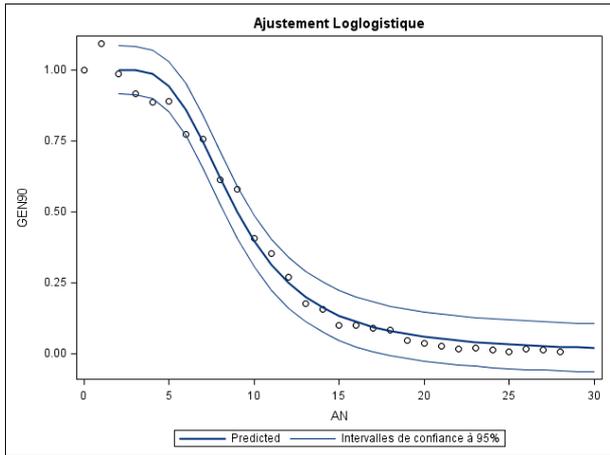


Figure 4 – Ajustements sur taux de survie transversaux pour les années 1990 et 1991 à une loi de survie de log-logistique

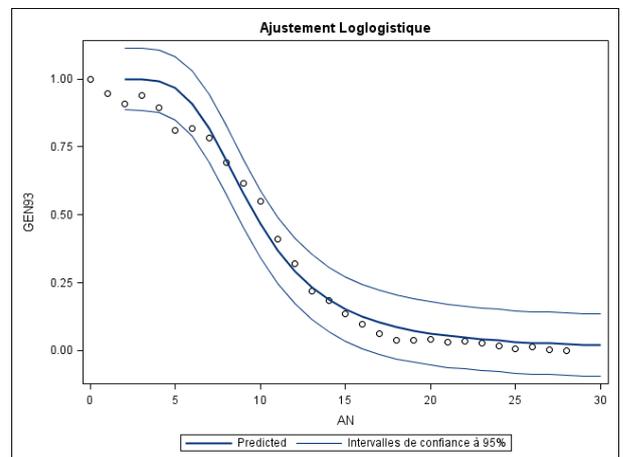
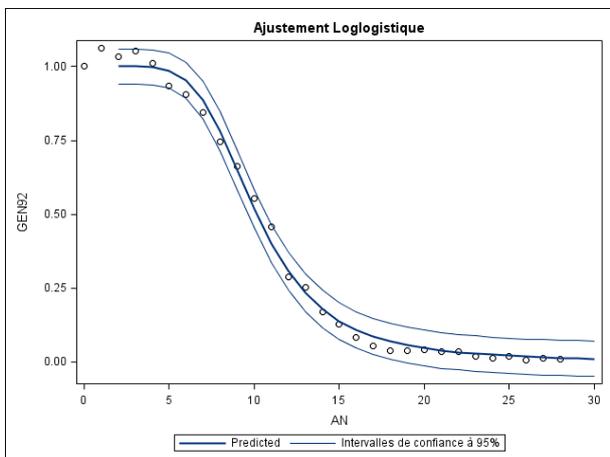


Figure 5 – Ajustements sur taux de survie transversaux pour les années 1992 et 1993 à une loi de survie de log-logistique

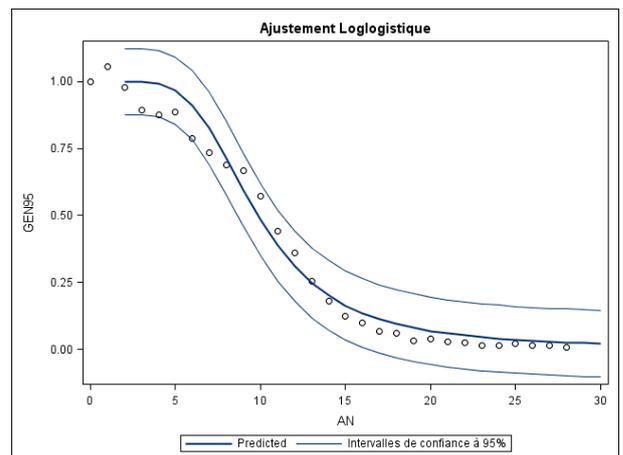
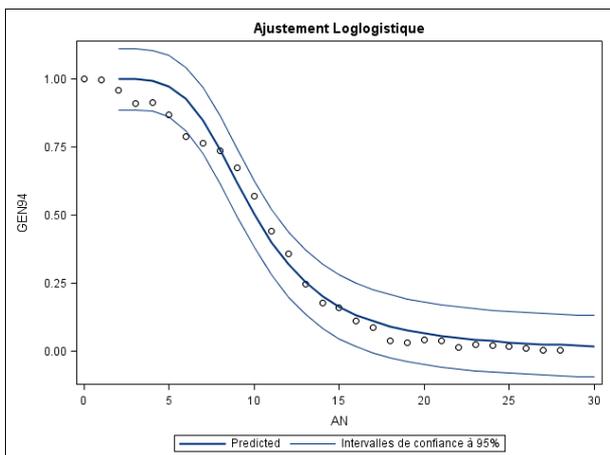


Figure 6 – Ajustements sur taux de survie transversaux pour les années 1994 et 1995 à une loi de survie de log-logistique

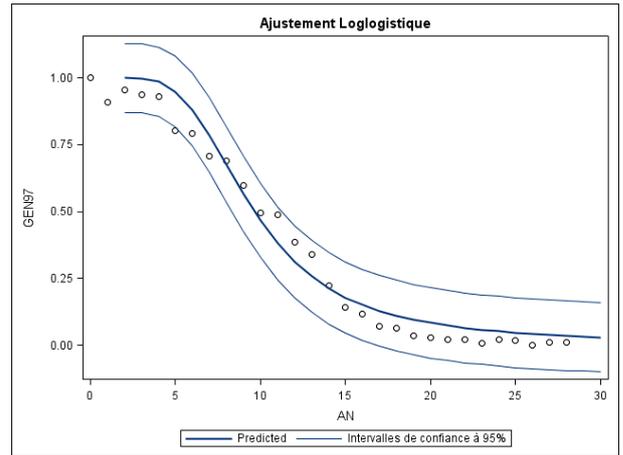
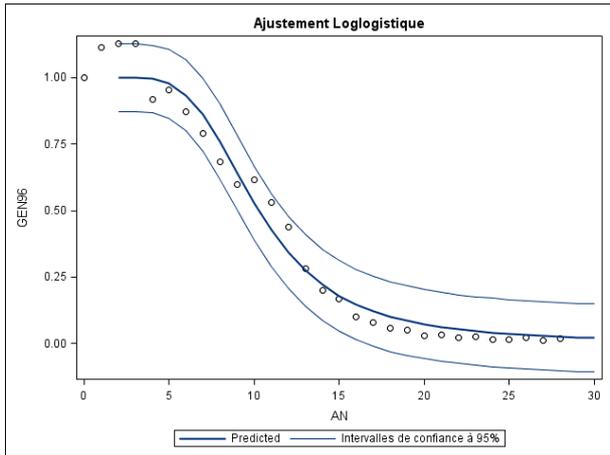


Figure 7 – Ajustements sur taux de survie transversaux pour les années 1996 et 1997 à une loi de survie de log-logistique

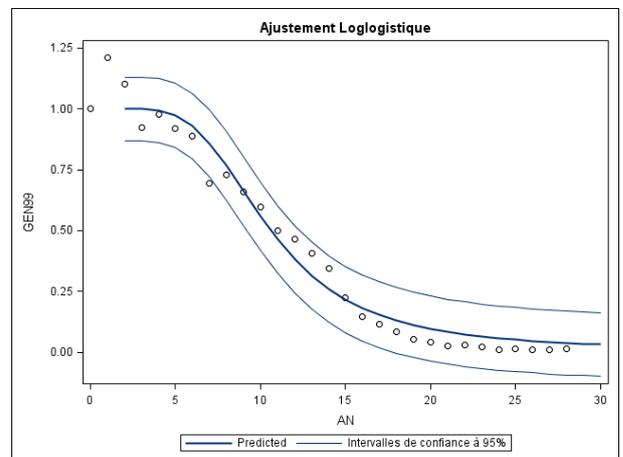
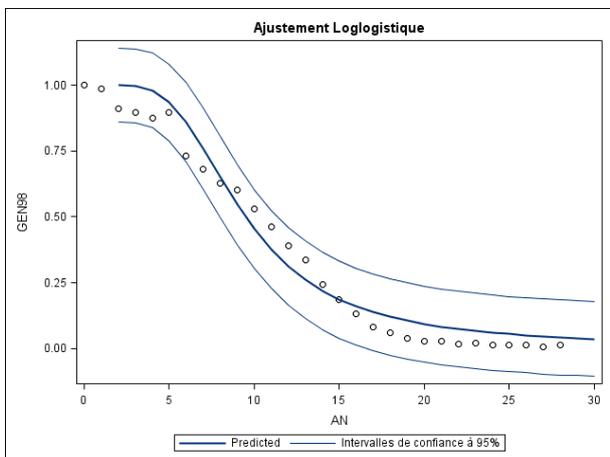


Figure 8 – Ajustements sur taux de survie transversaux pour les années 1998 et 1999 à une loi de survie de log-logistique

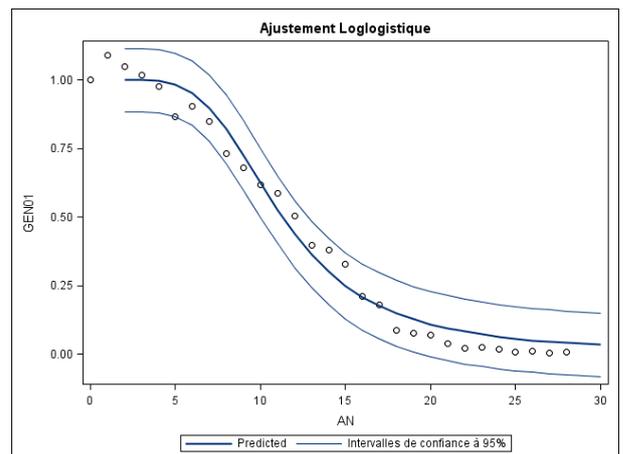
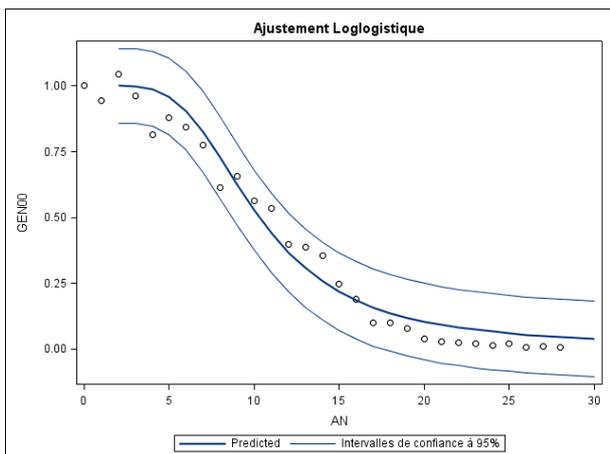


Figure 9 – Ajustements sur taux de survie transversaux pour les années 2000 et 2001 à une loi de survie de log-logistique

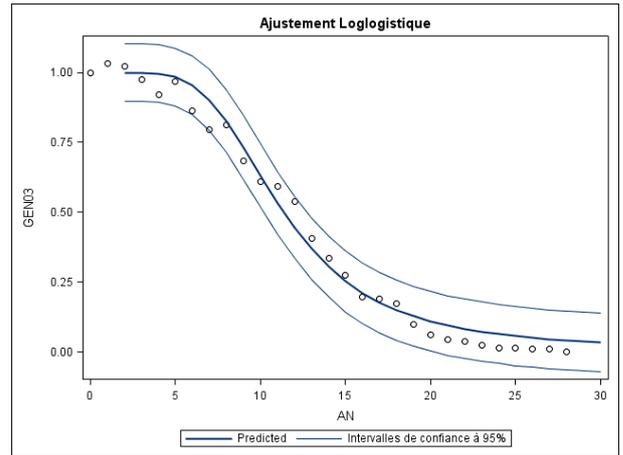
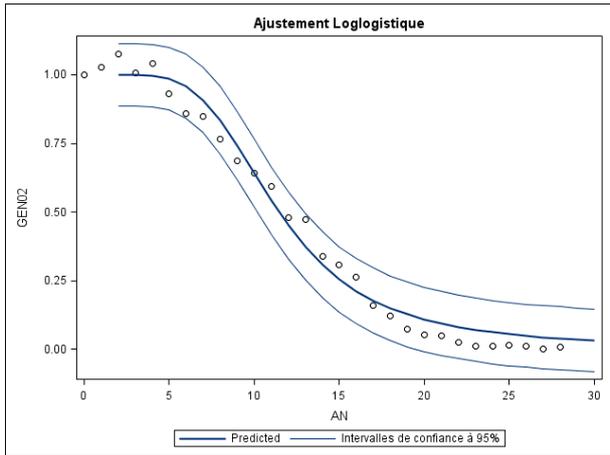


Figure 10 – Ajustements sur taux de survie transversaux pour les années 2002 et 2003 à une loi de survie de log-logistique

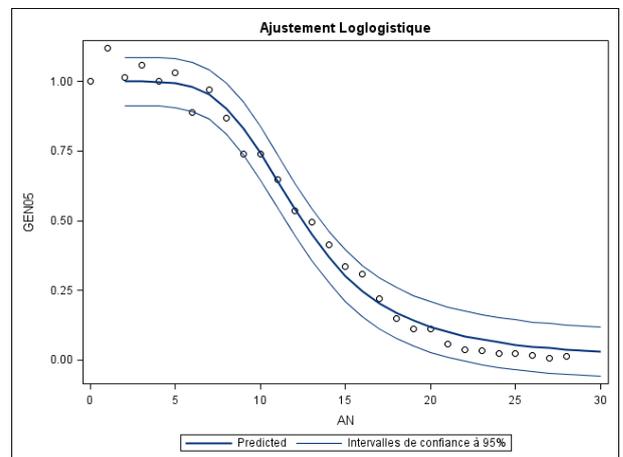
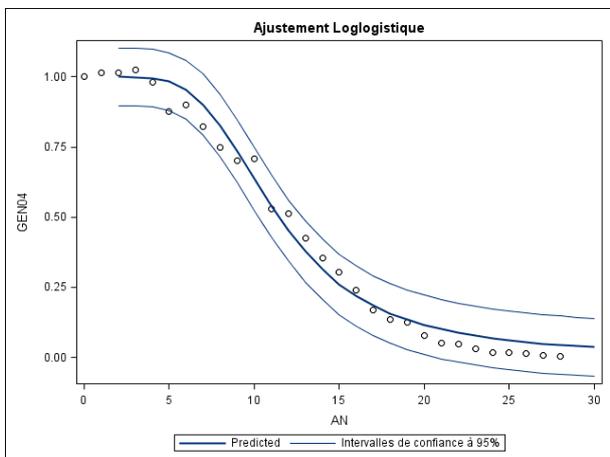


Figure 11 – Ajustements sur taux de survie transversaux pour les années 2004 et 2005 à une loi de survie de log-logistique

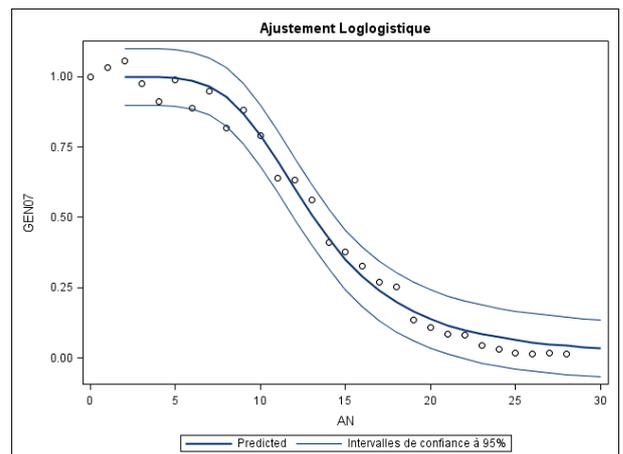
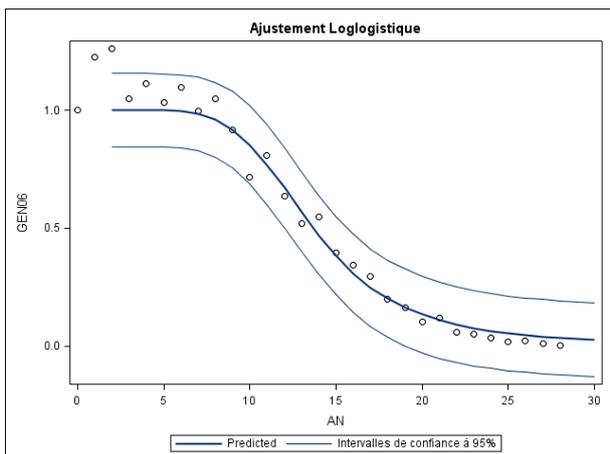


Figure 12 – Ajustements sur taux de survie transversaux pour les années 2006 et 2007 à une loi de survie de log-logistique

| Loi log-logistique | lt. | Nb. Obs. | Gamma (γ) | Alpha (α) | I- C de gamma (γ) à 95% | Intervalle de confiance de alpha (α) à 95% | Fisher |
|---------------------------|-----|----------|--------------------|--------------------|----------------------------------|---|--------|
| <i>Année 1984</i> | 10 | 27 | 0.00421 | 7.3267 | [0.000718 ; 0.000770] | [6.3327 ; 8.3208] | 967 |
| <i>Année 1985</i> | 20 | 27 | 0.00235 | 7.8965 | [0.000638 ; 0.00406] | [7.0327 ; 8.7603] | 1674 |
| <i>Année 1986</i> | 27 | 27 | 0.00461 | 7.3214 | [-0.00033 ; 0.00955] | [6.0192 ; 8.6235] | 526 |
| <i>Année 1987</i> | 12 | 27 | 0.00364 | 7.5103 | [-0.00012 ; 0.00740] | [6.2700 ; 8.7506] | 641 |
| <i>Année 1988</i> | 13 | 27 | 0.00337 | 7.5687 | [0.000353 ; 0.00639] | [6.4966 ; 8.6408] | 906 |
| <i>Année 1989</i> | 27 | 27 | 0.00801 | 6.7352 | [-0.00080 ; 0.0168] | [5.3915 ; 8.0789] | 376 |
| <i>Année 1990</i> | 63 | 27 | 0.000911 | 8.9053 | [0.000115 ; 0.00171] | [7.8750 ; 9.9355] | 1680 |
| <i>Année 1991</i> | 12 | 27 | 0.000513 | 9.4374 | [-0.00001 ; 0.00104] | [8.2414 ; 10.6335] | 1491 |
| <i>Année 1992</i> | 46 | 27 | 0.000054 | 11.6939 | [0.000006 ; 0.000102] | [10.6827 ; 12.7051] | 4369 |
| <i>Année 1993</i> | 14 | 27 | 0.000345 | 9.7269 | [-0.00011 ; 0.000801] | [8.2138 ; 11.2399] | 968 |
| <i>Année 1994</i> | 25 | 27 | 0.000216 | 10.1051 | [-0.00008 ; 0.000512] | [8.5590 ; 11.6513] | 1056 |
| <i>Année 1995</i> | 15 | 27 | 0.000344 | 9.6401 | [-0.00014 ; 0.000831] | [8.0338 ; 11.2464] | 845 |
| <i>Année 1996</i> | 34 | 27 | 0.000198 | 10.0872 | [-0.00011 ; 0.000505] | [8.3609 ; 11.8136] | 974 |
| <i>Année 1997</i> | 12 | 27 | 0.000899 | 8.5740 | [-0.00024 ; 0.00203] | [7.1430 ; 10.0051] | 771 |
| <i>Année 1998</i> | 12 | 27 | 0.00158 | 7.9572 | [-0.00041 ; 0.00357] | [6.5311 ; 9.3834] | 614 |
| <i>Année 1999</i> | 14 | 27 | 0.000321 | 9.3665 | [-0.00014 ; 0.000782] | [7.7960 ; 10.9369] | 902 |
| <i>Année 2000</i> | 46 | 27 | 0.000715 | 8.5528 | [-0.00028 ; 0.00171] | [7.0187 ; 10.0868] | 698 |
| <i>Année 2001</i> | 22 | 27 | 0.000155 | 9.9094 | [-0.00006 ; 0.000366] | [8.4467 ; 11.3722] | 1244 |
| <i>Année 2002</i> | 18 | 27 | 0.000114 | 10.1902 | [-0.00005 ; 0.000274] | [8.7022 ; 11.6781] | 1333 |
| <i>Année 2003</i> | 14 | 27 | 0.000142 | 9.9835 | [-0.00003 ; 0.000317] | [8.6581 ; 11.3089] | 1520 |
| <i>Année 2004</i> | 22 | 27 | 0.000153 | 9.8644 | [-0.00003 ; 0.000338] | [8.5753 ; 11.1534] | 1578 |
| <i>Année 2005</i> | 19 | 27 | 0.000021 | 11.6347 | [0.000000 ; 0.000048] | [10.3082 ; 12.9612] | 2542 |
| <i>Année 2006</i> | 17 | 27 | 0.0000002 | 13.8238 | [0.0000000 ; 0.0000007] | [10.9569 ; 16.6907] | 1015 |
| <i>Année 2007</i> | 18 | 27 | 0.000012 | 12.0234 | [0.000000 ; 0.000030] | [10.4642 ; 13.5826] | 1957 |
| <i>Année 2008</i> | 39 | 27 | 0.000038 | 10.9006 | [-0.00002 ; 0.000095] | [9.3602 ; 12.4410] | 1483 |

Tableau 1. Paramètres d'ajustements d'une loi de survie log-logistique sur taux de survie transversaux pour les années 1984 à 2008

Annexe 4-7 : Ajustement pondérés par une loi exponentielle d'une loi de weibull sur taux de survie longitudinaux

| Ajustement WEIBULL | Itérations | Nb. Obs. | Alpha (α) | Beta(β) | Intervalle de confiance de Alpha(α) à 95% | Intervalle de confiance de Beta(β) à 95% | Fisher |
|-------------------------------|------------|----------|--------------------|-----------------|--|--|----------|
| <i>Génération 84-87</i> | 4 | 24 | 1.975 | 12,002 | [1,815 ; 2,135] | [11,377 ; 12,626] | 1419 |
| <i>Génération 88-91</i> | 4 | 20 | 2,294 | 13,119 | [2,118 ; 2,470] | [12,738 ; 13,500] | 2861 |
| <i>Génération 92-95</i> | 3 | 16 | 2.100 | 13,456 | [1,963 ; 2,376] | [13,285 ; 13,626] | 3806 |
| <i>Génération 96-99</i> | 4 | 12 | 1.803 | 13.793 | [1,626 ; 1,980] | [13,525 ; 14,061] | 27175 |
| <i>Génération 00-03</i> | 4 | 8 | 1.850 | 14.106 | [1,585 ; 2,176] | [13,721 ; 14,492] | 22976 |
| <i>Génération 04-08</i> | <i>N</i> | <i>N</i> | <i>N</i> | <i>N</i> | <i>N</i> | <i>N</i> | <i>N</i> |
| <i>Moyenne totale</i> | 4 | 24 | 2.124 | 12.491 | [2,047 ; 2,200] | [12,221 ; 12,762] | 5834 |
| <i>Génération 1984</i> | 5 | 24 | 1.800 | 11.061 | [1,546 ; 1,919] | [11,011 ; 11,111] | 4939 |
| <i>Génération 1985</i> | 5 | 23 | 1.761 | 11.681 | [1,573 ; 1,948] | [10,891 ; 12,472] | 1645 |
| <i>Génération 1986</i> | 6 | 22 | 1.950 | 11.733 | [1,740 ; 2,283] | [11,661 ; 11,805] | 3335 |
| <i>Génération 1987</i> | 6 | 21 | 1.900 | 11.803 | [1,728 ; 2,098] | [11,726 ; 11,880] | 3939 |
| <i>Génération 1988</i> | 6 | 20 | 1.908 | 11.928 | [1,817 ; 2,039] | [11,886 ; 11,970] | 16890 |
| <i>Génération 1989</i> | 6 | 19 | 1.650 | 11.862 | [1,467 ; 1,863] | [11,746 ; 11,979] | 4197 |
| <i>Génération 1990</i> | 4 | 18 | 1.738 | 12.529 | [1,596 ; 1,879] | [12,195 ; 12,863] | 8690 |
| <i>Génération 1991</i> | 4 | 17 | 1.940 | 12.964 | [1,753 ; 2,127] | [12,667 ; 13,262] | 6143 |
| <i>Génération 1992</i> | 4 | 16 | 2.297 | 13.891 | [1,999 ; 2,595] | [13,674 ; 14,108] | 4003 |
| <i>Génération 1993</i> | 6 | 15 | 2.055 | 12.652 | [1,768 ; 2,343] | [12,396 ; 12,908] | 3474 |
| <i>Génération 1994</i> | 3 | 14 | 2.100 | 12.287 | [1,934 ; 2,294] | [12,096 ; 12,478] | 3210 |
| <i>Génération 1995</i> | 5 | 13 | 1.950 | 12.222 | [1,741 ; 2,176] | [12,040 ; 12,403] | 5603 |
| <i>Génération 1996</i> | 5 | 12 | 1.800 | 13.713 | [1,664 ; 1,952] | [13,537 ; 13,890] | 17968 |
| <i>Génération 1997</i> | 5 | 11 | 1.850 | 13.916 | [1,687 ; 1,951] | [13,647 ; 14,185] | 11399 |
| <i>Génération 1998</i> | 5 | 10 | 1.750 | 14.159 | [1,623 ; 1,938] | [13,945 ; 14,374] | 30668 |
| <i>Génération 1999</i> | 4 | 9 | 1.800 | 14.002 | [1,650 ; 2,146] | [13,729 ; 14,274] | 26912 |
| <i>Génération 2000</i> | 4 | 8 | 1.800 | 14.484 | [1,703 ; 1,944] | [14,216 ; 14,752] | 54697 |
| <i>Génération 2001</i> | 4 | 7 | 2.200 | 15.246 | [2,067 ; 2,698] | [13,067 ; 16,698] | 7965 |
| <i>Génération 2002</i> | 9 | 6 | 2.400 | 14.234 | [2,067 ; 2,698] | [10,001 ; 18,883] | 2471 |

Tableau 1. Paramètres d'ajustements d'une loi de survie de Weibull sur taux de survie transversaux pour les générations 1984 à 2002

Annexe 4-8 : Paramètres des ajustements d'une loi Weibull sur taux de survie transversaux (2000 à 2008) par type de motorisation.

| Ajustement WEIBULL | lt. | Nb. Obs. | Alpha (α) | Beta(β) | Intervalle de confiance de Alpha(α) à 95% | Intervalle de confiance de Beta(β) à 95% | Fisher | SCR |
|--|-----|-------------|-----------------------|-----------------|--|--|--------|---------|
| <i>Essence 2000</i> | 5 | 21 | 2.8209 | 10.8187 | [2.4041 ; 3.2377] | [10.4057 ; 11,2318] | 1440 | 0.0452 |
| <i>Essence 2001</i> | 6 | 24 | 3.5967 | 12.1534 | [2,8770 ; 4,3165] | [11,6474 ; 12,6594] | 1158 | 0.0902 |
| <i>Essence 2002</i> | 6 | 19 | 3.4748 | 12.4768 | [2,9080 ; 4.0415] | [12.0412 ; 12.9123] | 1704 | 0.0469 |
| <i>Essence 2003</i> | 6 | 18 | 2.8739 | 12.3099 | [2,5650 ; 3.1828] | [11.9816 ; 12.6383] | 3178 | 0.0204 |
| <i>Essence 2004</i> | 7 | 25 | 2.2454 | 12.0008 | [1.9279 ; 2.5629] | [11.4650 ; 12.5366] | 1120 | 0.0678 |
| <i>Essence 2005</i> | 5 | 19 | 2.6977 | 13.5609 | [2,3441 ; 3,0514] | [13.1045 ; 14.0173] | 2230 | 0.0344 |
| <i>Essence 2006</i> | 6 | 20 | 3.3857 | 14.7444 | [2.2774 ; 4.4939] | [13.7112 ; 15.7776] | 462 | 0.2239 |
| <i>Essence 2007</i> | 8 | 21 | 2.0194 | 13.8074 | [1.6529 ; 2.3859] | [12.9998 ; 14.6150] | 821 | 0.0877 |
| <i>Essence 2008</i> | 6 | 28 | 1.6305 | 12.8972 | [1.3688 ; 1.8922] | [12.1047 ; 13.6898] | 834 | 0.0783 |
| <i>Essence moyenne 2000 à 2002</i> | 5 | 24 | 3.2680 | 11.8454 | [2.9355 ; 3.6006] | [11.5722 ; 12.1187] | 3821 | 0.0246 |
| <i>Essence moyenne 2003 à 2005</i> | 6 | 24 | 2.5974 | 12.6303 | [2.4553 ; 2.7395] | [12.4383 ; 12.8222] | 9542 | 0.00908 |
| <i>Essence moyenne 2006 à 2008</i> | 7 | 22 | 2.3314 | 13.9859 | [2.0999 ; 2.5629] | [13.5764 ; 14.3954] | 2912 | 0.0290 |
| <i>Diesel 2000</i> | 6 | 21 | 2.0734 | 13.4848 | [1,7287 ; 2,4181] | [12,7699 ; 14,1996] | 995 | 0.0743 |
| <i>Diesel 2001</i> | 6 | 23 | 2.1380 | 13.7907 | [1.9102 ; 2,3658] | [13,3227 ; 14,2586] | 2257 | 0.0375 |
| <i>Diesel 2002</i> | 6 | 24 | 2.1650 | 14.1577 | [1.8688 ; 2,4611] | [13,5439 ; 14,7715] | 1380 | 0.0676 |
| <i>Diesel 2003</i> | 6 | 24 | 2.2235 | 14.5582 | [1.9130 ; 2.5339] | [13,9306 ; 15.1857] | 1387 | 0.0702 |
| <i>Diesel 2004</i> | 5 | 27 | 2.3988 | 15.0871 | [2,0215 ; 2,7760] | [14,3851 ; 15,7892] | 1164 | 0.1079 |
| <i>Diesel 2005</i> | 5 | 28 | 2.7997 | 15.5038 | [2,3023 ; 3,2972] | [14,7906 ; 16,2170] | 1087 | 0.1208 |
| <i>Diesel 2006</i> | 7 | 27 | 3.0668 | 16.7340 | [2,3451 ; 3,7885] | [15,7927 ; 17,6753] | 739 | 0.2230 |
| <i>Diesel 2007</i> | 7 | 26 | 2.9744 | 16.3705 | [2,5376 ; 3,4113] | [15,7818 ; 16,9592] | 1723 | 0.0825 |
| <i>Diesel 2008</i> | 6 | 28 | 2.6551 | 16.2009 | [2,3654 ; 2,9449] | [15,7213 ; 16,6806] | 2695 | 0.0542 |
| <i>Diesel moyenne 2000 à 2002</i> | 6 | 24 | 2.1244 | 13.8103 | [1,9294 ; 2,3194] | [13,4007 ; 14,2200] | 2934 | 0.0304 |
| <i>Diesel moyenne 2003 à 2005</i> | 5 | 27 | 2.4663 | 15.0832 | [2,2408 ; 2,6917] | [14,6844 ; 15,4820] | 3464 | 0.0358 |
| <i>Diesel moyenne 2006 à 2008</i> | 6 | 28 | 2.8945 | 16.4445 | [2,5383 ; 3,2607] | [15,9203 ; 16,9687] | 2259 | 0.0695 |

Annexe 5-1 : Moyennes de kilométrages annuel et au compteur par type de motorisation et de gammes

| Période | | | Nb obs. | Km annuel | écart-type | Km compteur | écart-type |
|------------------|---|---|---------|-----------|------------|-------------|------------|
| 2005 à 2010 | E | B | 623 | 9 058 | 6 888 | 30 999 | 31 315 |
| | | M | 176 | 11 233 | 9 546 | 42 854 | 35 323 |
| | | H | 37 | 11 174 | 5 531 | 37 777 | 30 400 |
| | D | B | 783 | 14 235 | 10 598 | 48 800 | 42 990 |
| | | M | 927 | 16 557 | 13 498 | 56 474 | 46 003 |
| | | H | 230 | 18 166 | 13 882 | 65 417 | 46 052 |
| 2001 à 2004 | E | B | 375 | 10 310 | 12 200 | 77 517 | 49 446 |
| | | M | 183 | 10 698 | 9 531 | 87 621 | 52 470 |
| | | H | 51 | 9 067 | 7 372 | 90 593 | 54 824 |
| | D | B | 315 | 13 852 | 11 657 | 121 386 | 68 567 |
| | | M | 447 | 14 841 | 13 862 | 129 504 | 64 040 |
| | | H | 205 | 15 388 | 10 082 | 137 822 | 66 007 |
| 1996 à 2000 | E | B | 448 | 7 476 | 6 533 | 110 131 | 57 619 |
| | | M | 223 | 8 848 | 11 188 | 127 963 | 63 101 |
| | | H | 105 | 9 285 | 7 863 | 123 779 | 69 186 |
| | D | B | 173 | 11 235 | 14 573 | 166 823 | 92 270 |
| | | M | 206 | 13 861 | 16 016 | 175 723 | 100 332 |
| | | H | 139 | 14 252 | 14 465 | 191 727 | 86 958 |
| 1991 à 1995 | E | B | 230 | 5 280 | 5 725 | 123 900 | 69 251 |
| | | M | 88 | 6 591 | 10 477 | 142 946 | 85 635 |
| | | H | 41 | 6 193 | 5 956 | 157 319 | 61 761 |
| | D | B | 100 | 8 447 | 8 736 | 185 866 | 95 666 |
| | | M | 89 | 8 634 | 7 718 | 200 914 | 109 753 |
| | | H | 69 | 12 824 | 14 268 | 198 807 | 126 297 |
| 1986 à 1990 | E | B | 70 | 4 776 | 8 938 | 144 124 | 77 325 |
| | | M | 28 | 5 305 | 5 890 | 153 852 | 78 569 |
| | | H | 26 | 5 086 | 5 390 | 135 119 | 65 081 |
| | D | B | 44 | 8 216 | 13 699 | 210 304 | 82 257 |
| | | M | 10 | 6 438 | 7 195 | 173 870 | 155 356 |
| | | H | 28 | 11 577 | 11 844 | 163 642 | 146 430 |
| 1982 à 1985 | E | B | 13 | 2 383 | 3 120 | 124 590 | 76 735 |
| | | M | 5 | 5 929 | 10 410 | 132 417 | 134 275 |
| | | H | 5 | 6 322 | 4 426 | 195 077 | 101 069 |
| | D | B | 5 | 7 042 | 6 418 | 187 821 | 127 835 |
| | | M | 2 | 3 337 | 1 424 | 72 955 | 156 644 |
| | | H | 3 | 2 631 | 1 593 | 212 346 | 141 685 |
| Antérieur à 1981 | E | B | 79 | 5 787 | 7 146 | 99 739 | 79 447 |
| | | M | 25 | 8 234 | 8 332 | 80 966 | 79 445 |
| | | H | 14 | 5 031 | 4 488 | 107 196 | 86 760 |
| | D | B | 68 | 13 060 | 12 910 | 90 461 | 111 362 |
| | | M | 47 | 17 699 | 11 974 | 125 356 | 129 373 |
| | | H | 18 | 19 657 | 22 538 | 97 280 | 106 524 |

Tableau-1. Moyennes de kilométrages annuels et au compteur par groupes d'années, motorisation (E : essence, D : diesel) et gammes (B : basse, M : moyenne ; H : haute). Source : panel Parc Auto 2010

| Véhicules Hybrides | | Km annuel | Km compteur |
|--------------------|---|-----------|-------------|
| 2005 à 2010 | B | 11 941 | 41 788 |
| | M | 15 708 | 50 832 |
| | H | 17 197 | 57 542 |
| 2001 à 2004 | B | 11 927 | 98 952 |
| | M | 13 637 | 112 439 |
| | H | 14 129 | 117 874 |

Tableau-2. Kilométrages annuels et au compteur par groupes d'années pour les véhicules hybrides. Estimés sur la base de la moyenne pondérée des populations essence et diesel.

Annexe 5-2 : Minimales et maximales des températures moyennes mensuelles

| | Minimales | Maximales | Station de moyenne minimale | Station de moyenne maximale |
|-----------|-----------|-----------|-----------------------------|-----------------------------|
| Janvier | -1 | 12,9 | Strasbourg | Nice |
| Février | -0,7 | 13,4 | Strasbourg | Perpignan |
| Mars | 2,2 | 15,7 | Strasbourg | Perpignan |
| Avril | 4,6 | 17,6 | Strasbourg | Perpignan |
| Mai | 8,4 | 21,1 | Bourges | Perpignan |
| Juin | 11 | 25,3 | Lille | Perpignan |
| Juillet | 13,1 | 28,8 | Lille | Perpignan |
| Août | 12,9 | 28,4 | Lille | Perpignan |
| Septembre | 10,3 | 25,1 | Strasbourg | Perpignan |
| Octobre | 6,6 | 20,6 | Strasbourg | Nice |
| Novembre | 2,3 | 16,3 | Strasbourg | Nice |
| Décembre | 0,3 | 13,8 | Strasbourg | Nice |

Tableau 1. Températures mensuelles moyennes minimales et maximales par station. Moyennes calculées sur la période 1970-2000. Source : Météo-France

Résumé

Le but de cette thèse de doctorat est l'analyse du volume et de la structure démographique du parc automobile français. L'objectif est d'estimer la contribution de la circulation automobile aux émissions de CO₂ et de polluants locaux à l'horizon 2020. Les analyses exploitent les données du panel Parc Automobile de la Sofres (observations annuelles sur la période 1984-2008).

L'examen de l'évolution de l'âge moyen montre que ce dernier subit un vieillissement d'ordre structurel. Le calibrage d'une famille de lois de survie paramétriques montre une hausse continue de la durée de vie des véhicules. La durée de vie médiane, estimée par ajustement d'une loi de Weibull sur des taux de survie transversaux gagne près de 4,6 années en passant de 8,6 ans pour la période 1984-1987 à 13,2 ans pour la période 2004-2008.

La hausse de la durée de vie des véhicules est expliquée par le multi-équipement des ménages, la diésélisation croissante du parc automobile et par une relative hausse de la robustesse des véhicules. Cette hausse de la durée de vie des véhicules particuliers vient s'ajouter à la relative stabilité du volume des immatriculations des véhicules neufs observée depuis deux décennies pour expliquer la croissance du solde naturel ainsi que le vieillissement du parc. Une régression de Poisson nous permet de confirmer la supériorité des véhicules à moteur diesel en matière de durée de vie ainsi que l'effet négatif de la hausse du kilométrage annuel sur cette dernière.

Enfin, sur la base de nos résultats concernant les lois de survie du parc, nous présentons un modèle stylisé de projection de la structure du parc à l'horizon 2020 suivant deux scénarios contrastés de diffusion de véhicules hybrides et électriques. A partir de chaque scénario de parc, des projections d'émissions sont menées à l'horizon 2020 à l'aide du logiciel Copert IV.

Mots-clés : parc automobile ; polluants ; taux de survie.

Abstract

The aim of this PhD thesis is to analyze the volume and the demographic structure of the French passenger car fleet in order to estimate the contribution of the car traffic to CO₂ emissions and of local pollutants and to make related statistical projections to 2020. We used "Parc-Auto" an annual car fleet database built from annual postal surveys conducted with a panel of 10 000 French households (annual observations over the period 1984-2008).

The continuous increase of the average age shows that the passenger car fleet undergoes an ageing of structural order. The calibration of a family of parametric survival functions shows a continuous increase of vehicles life expectancy. The median life expectancy estimated by adjustment of a Weibull law on transversal survival rates increased from 8,6 years in the period 1984-1987 to 13,2 years in the period 2004-2008 which represent a gap of 4,6 years over the whole period.

The increase of the life expectancy of vehicles is explained by households' multi-equipment, the increasing diesel share and by a relative increase of vehicles robustness. This relative increase of passengers cars lifetime added to the relative stability of new registrations observed from two decades explains the natural balance growth as well as the national fleet ageing. Moreover, a Poisson regression analysis allowed us to confirm the superiority of the diesel motor vehicles as well as the negative effect of the annual mobility on vehicles lifetime. Finally, on the basis of our survival study a projection to 2020 of the fleet structure following two different scenarios of hybrid and electric vehicles market shares has been conducted. For each fleet structure we obtained projections of CO₂ and pollutants emissions until 2020 thanks to the software Copert IV.

Keywords : passenger car fleet ; pollutants ; survival rates.