



Contributions à la gestion des risques en assurance vie

Baptiste Dieltiens

► To cite this version:

Baptiste Dieltiens. Contributions à la gestion des risques en assurance vie. Gestion et management. Université de Lyon, 2021. Français. NNT : 2021LYSE1135 . tel-03827688

HAL Id: tel-03827688

<https://theses.hal.science/tel-03827688>

Submitted on 24 Oct 2022

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.



N°d'ordre NNT : 2021LYSE1135

THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON

opérée au sein de
I'Université Claude Bernard Lyon 1

Ecole Doctorale ED 486
Sciences Économiques et de Gestion

Spécialité de doctorat : Sciences de Gestion
Discipline : Actuariat

Soutenue publiquement le 13/07/2021, par :
Baptiste Dieltiens

Contributions à la Gestion des Risques en Assurance Vie

Devant le jury composé de :

Mercè Claramunt, Professeure à l'Université de Barcelone
Didier Folus, Professeur à l'Université Paris Nanterre
Séverine Arnold(-Gaille), Professeure à l'Université de Lausanne
Frédéric Planchet, Professeur à l'Université Lyon 1

Rapporteuse
Rapporteur
Examinatrice
Examineur

Stéphane Loisel, Professeur à l'Université Lyon 1
Anani Olympio, Responsable chez CNP Assurances

Directeur de thèse
Invité

*If you can keep your head when all about you
Are losing theirs and blaming it on you,
If you can trust yourself when all men doubt you,
But make allowance for their doubting too;
If you can wait and not be tired by waiting,
Or being lied about, don't deal in lies,
Or being hated, don't give way to hating,
And yet don't look too good, nor talk too wise:*

*If you can dream - and not make dreams your master;
If you can think - and not make thoughts your aim;
If you can meet with Triumph and Disaster
And treat those two impostors just the same;
If you can bear to hear the truth you've spoken
Twisted by knaves to make a trap for fools,
Or watch the things you gave your life to, broken,
And stoop and build 'em up with worn-out tools:*

*If you can make one heap of all your winnings
And risk it on one turn of pitch-and-toss,
And lose, and start again at your beginnings
And never breathe a word about your loss;
If you can force your heart and nerve and sinew
To serve your turn long after they are gone,
And so hold on when there is nothing in you
Except the Will which says to them: 'Hold on!'*

*If you can talk with crowds and keep your virtue,
Or walk with Kings - nor lose the common touch,
If neither foes nor loving friends can hurt you,
If all men count with you, but none too much;
If you can fill the unforgiving minute
With sixty seconds' worth of distance run,
Yours is the Earth and everything that's in it,
And - which is more - you'll be a Man, my son!*

Rudyard Kipling – If (1895)

Remerciements

Je souhaiterais commencer ce manuscrit en remerciant les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué au bon déroulement de ma thèse.

En premier lieu, la personne sans laquelle cette aventure n'aurait pas été possible : mon directeur de thèse, Stéphane Loisel. C'est grâce à ton soutien, ton accompagnement et tes orientations que j'ai pu mener à bien mes travaux. J'ai beaucoup apprécié nos échanges, et outre ton apport technique, je souhaiterais saluer ta bienveillance dans la gestion de mes moments de doute et de stress.

Je suis très reconnaissant à M. Mercè Claramunt et à Didier Folus d'avoir accepté de rapporter sur ma thèse : vos remarques judicieuses ont aidé à améliorer la qualité du manuscrit. Je remercie également Frédéric Planchet et Séverine Arnold-Gaille qui ont gentiment accepté de faire partie du jury, ainsi que Caroline Hillairet pour ses conseils et commentaires avisés lors des comités de suivi.

J'éprouve la plus vive gratitude à l'égard de CNP Assurances, qui m'a offert un cadre de travail propice au bon déroulement de la thèse. Je remercie en particulier Thomas Béhar, qui m'a accueilli au sein de ses équipes et qui m'a honoré de sa confiance. Un grand merci également à Anani Olympio, mon responsable de thèse en entreprise, pour la qualité de nos échanges, qu'ils soient professionnels ou non. J'ai également une pensée pour Jean-Baptiste Nessi, Quentin Boudoux ainsi que Camille Gutknecht pour la confiance qu'ils m'ont témoignée au quotidien.

Evidemment, je me dois de remercier l'ensemble des personnes avec qui j'ai pu collaborer au cours de ces 5 dernières années, et en particulier la *Dream Team* du Data Lab. D'abord parce que je leur ai promis de le faire (ce qui constituerait une raison suffisante en soi), mais surtout parce je n'aurais pas pu rêver meilleur environnement pour m'épanouir. Merci donc Romain pour ton soutien, ta confiance, et la qualité des sujets sur lesquels tu m'as fait travailler. Et puis bien sûr pour la formidable ambiance que tu contribues à maintenir au sein de l'équipe ! Un énorme *big up* à JCH, alias Djadja (y a pas moyen !), à Marie (Oh Marie, si tu savais...), ma jumelle de cœur, à Tutur, à Gab, à Ievgen (avec un I !), à Hervé, à Benoît, à Annie (*are you okay?*) ainsi qu'à David pour votre professionnalisme mais aussi pour nos fous rires, nos délires, nos conneries, et surtout pour votre très grande patience pour supporter mes blagues (je dois

bien leur tirer mon chapeau sur ce coup-là). Merci également aux « anciens » : Jérémy Jay-Z, Fatou et Asim qui m'ont accueilli lors de mon arrivée et qui m'ont aidé à grandir professionnellement. J'ai aussi une pensée pour l'ensemble des stagiaires, alternants et prestataires avec qui j'ai pu travailler, avec une mention spéciale pour Zach (allez l'OL!).

Je n'oublie pas l'ambiance et la qualité de l'environnement que m'a offert le laboratoire SAF de l'ISFA. Merci à l'ensemble des chercheurs et doctorants pour leur accueil toujours chaleureux lors de mes présences à Lyon. Pensée particulière pour Anne, Nicolas, Pierre, Yahia, Xavier, Claire et Julien pour les bons moments que l'on a partagés.

Merci à l'équipe de bad de l'AC15 (allez *Team 2*!) pour toutes les folles soirées, les matchs d'interclub accrochés (ou non), et surtout les après-matchs! Merci aussi à Clément, Micka et Philippine pour nos soirées des « anciens » ISFA (même s'il y a trop longtemps que l'on n'a pas pu en faire une...), ainsi qu'aux « anciens » de Hoche : Camille, Jean, Quentin, François, Diane... Reconnaissance éternelle à Kenza (je me bats, j'ai l'habitude...) pour tout ce que tu m'as apporté, d'abord professionnellement (si vous avez une question python ou *machine learning*, c'est vers elle qu'il faut se tourner!) et puis personnellement ensuite. C'est le meilleur exemple qu'une rencontre professionnelle peut se transformer en belle amitié. En parlant de belles rencontres, je remercie (enfin le mot n'est pas assez fort, mais je n'en trouve pas d'autres) Gwladys pour tout ce que l'on a partagé, les cinés, les restos, nos galères, nos peines, nos joies... Et surtout nos fous rires! Et enfin, bien évidemment, un énorme merci à Pierrick, alias Hardy (si si la famille!) pour tout : les conneries (il y en a beaucoup), les soirées Palmashow, les soirées vin (j'attends la prochaine avec impatience!) et la patience inimaginable dont tu as fait preuve depuis 2015.

Ceux qui me connaissent un peu savent que j'apprécie (entre autres choses) la lecture, et certains auteurs m'accompagnent depuis de nombreuses années. Qu'ils soient donc ici remerciés. En vrac : Boris Vian, Hervé Bazin, Peter May, Antoine de Saint-Exupéry, Jean Anouilh, Guy de Maupassant, Harper Lee, Daniel Keyes, Albert Camus, George Orwell et tant d'autres... Et surtout bien sûr, le meilleur, Pierre Lemaitre.

Evidemment, je ne serais pas celui que je suis sans le soutien permanent de ceux qui sont là depuis le début : ma famille. Je ne citerai pas tout le monde parce qu'alors je n'aurais toujours pas fini en 2050 (j'ai une très grande famille), mais ils se reconnaîtront! Spéciale dédicace pour tatie couz Caro, pour mon filleul Martin et pour

REMERCIEMENTS

mon parrain Christophe. J'en profite également pour remercier la famille Demeester/Verein/Degrande/Lefebvre qui m'a si gentiment accueilli il y a bien longtemps maintenant. J'ai aussi une pensée particulière pour ceux qui m'ont quitté trop tôt, papa et mamie, à qui je dédie ce manuscrit. Enfin, j'inclus ici la famille *que j'ai choisie, celle que je ressens* comme chante notre Jean-Jacques national : Isa et Fred, Pascale et Pierre, Nénie et Bernard. Merci d'être présent à mes côtés depuis le début.

Enfin, je voudrais remercier du fond du cœur mon socle, ma *famille nucléaire* : mon gros Doudouille, qui m'a aidé à rédiger une grande partie du manuscrit (vrai de vrai!), le plus belge de tous les *world champions* français, mon beau-père JP (ou Jean, Pierre - je ne sais plus... -), les jeunes mariés futurs parents Sarah et Meumeu, mes beaux-frères Ben et Thom ainsi que mes neveu/filleule/nièce/filleul (par ordre de naissance!) Louis, Léonie, Victoire et Eliott, qui sont une inépuisable source d'inspiration. Enfin, un merci particulier à celles qui me supportent depuis tellement longtemps maintenant : mes sœurs Caro et Elo. Grandir auprès de vous a été une chance énorme. Merci pour tout. Elo, je ne te répéterai jamais assez ma reconnaissance pour ton soutien lors du *sprint* final, ainsi que pour ton œil aiguisé pour traquer les coquilles!

Enfin, je termine ces remerciements par la personne à qui je dois tout. Elle m'a soutenu, encouragé, secoué quand il le fallait, et surtout elle m'a transmis les valeurs qui me caractérisent aujourd'hui. Un très beau proverbe dit qu'on ne peut donner que deux choses à ses enfants : des racines et des ailes. Tu m'as donné les deux, et une thèse entière ne suffirait pas à te dire ma gratitude. Merci maman.

À Claude et Geneviève

Résumé

La gestion des risques est un enjeu majeur pour le pilotage d'une compagnie d'assurance. Les données toujours plus nombreuses, les modèles toujours plus sophistiqués et la puissance informatique croissante permettent aujourd'hui aux actuaires, *risk managers* et *data scientists* d'affiner la connaissance de leurs portefeuilles d'assurés et des risques sous-jacents. C'est dans ce contexte que se situe cette thèse, qui a pour objectif de contribuer à la compréhension et à la modélisation des risques biométriques et comportementaux en assurance vie, par le biais de trois chapitres introduits et contextualisés dans une introduction générale.

Le Chapitre 1 s'intéresse aux versements libres sur les contrats d'assurance vie. Nous proposons une méthodologie basée sur l'apprentissage automatique pour les piloter efficacement : le modèle, construit via l'algorithme de *Gradient Boosting*, s'appuie aussi bien sur des variables liées aux versements passés que sur des variables liées au produit en question et au *business plan*, et nous montrons qu'il donne de meilleurs résultats qu'une méthodologie plus classique fondée sur l'utilisation de séries temporelles. En outre, l'analyse du modèle via le cadre proposé par SHAP (*Shapley Additive Explanations*) permet de mettre en évidence certains faits stylisés ; enfin, l'étude à une maille plus fine complète les travaux et interroge la relation entre les versements et les rachats et arbitrages.

Le Chapitre 2 concerne les transferts en assurance vie, qui offrent la possibilité à un épargnant d'investir de l'argent sur un nouveau contrat tout en conservant une partie des avantages afférents à son contrat d'origine. En particulier, nous nous intéressons aux transferts Fourgous et PACTE que nous présentons et dont nous mettons en exergue les principaux points communs et différences majeures. Nous proposons alors une modélisation de l'amendement Fourgous via une régression logistique dynamique et analysons, au vu des premières observations, dans quelle mesure les enseignements que l'on peut en tirer sont applicables à la loi PACTE. Enfin, nous élargissons la réflexion en discutant du cadre législatif et de ses impacts potentiels en termes de comportements des assurés.

Enfin, le Chapitre 3 est consacré au risque de longévité, et s'intéresse en particulier à une hypothèse extrême, peu considérée en actuariat : le transhumanisme. Cette hypo-

thèse envisage une potentielle amélioration gigantesque de la longévité par l'apport de la science et des technologies. Après avoir rappelé l'état de la connaissance sur la longévité et tous les sujets y afférent (espérance de vie, âge biologique maximal en particulier) et les principales hypothèses sur son évolution future, mettant ainsi en évidence l'absence de consensus et la complexité du sujet, nous analysons plus en détail l'hypothèse transhumaniste et discutons de ses tenants et aboutissants.

Mots-clés : Versements libres ; Transferts Fourgous ; Transferts PACTE ; Hypothèse transhumaniste ; Séries temporelles ; *Gradient Boosting* ; Régression logistique.

Abstract

Risk management is a major issue for the piloting of an insurance company. The increasing amount of data, the sophistication of models and the growing computing power now allow actuaries, risk managers and data scientists to refine the knowledge of their policyholder portfolios and the underlying risks. This is the context of this thesis, which aims to contribute to the understanding and modeling of biometric and behavioral risks in life insurance, through three chapters introduced and contextualized in a general introduction.

Chapter 1 focuses on free payments on life insurance contracts. We propose a methodology based on machine learning to pilot them efficiently: the model, based on the Gradient Boosting algorithm, relies on variables related to past payments as well as variables related to the product in question and its business plan, and we show that it gives better results than a more classical methodology based on the use of time series. In addition, the analysis of the model via the framework proposed by SHAP (Shapley Additive Explanations) makes it possible to highlight certain stylized facts; finally, the study at a finer scale completes the work and questions the relationship between payments and surrenders or arbitrages.

Chapter 2 deals with life insurance transfers, which allow a saver to invest money in a new contract while retaining some of the advantages of the original contract. In particular, we are interested in the Fourgous and PACTE transfers, which we present; we highlight the main common points and major differences of those transfers. We then propose a model of the Fourgous amendment using dynamic logistic regression and analyze, given the initial observations, to what the extent the lessons that can be drawn from it are applicable to the PACTE law. Finally, we broaden the reflection by discussing the legislative framework and its potential impacts in terms of policyholder behavior.

Finally, Chapter 3 is devoted to the risk of longevity, and focuses in particular on an extreme assumption, not really considered in actuarial science: transhumanism. This assumption considers a potential gigantic improvement in longevity through the use of science and technology. After discussing the state of the art on longevity and all the related subjects (life expectancy, maximum biological age in particular) and the main

hypotheses on its future evolution, thus highlighting the lack of consensus and the complexity of this subject, we analyze the transhumanist assumption in more details and discuss its ins and outs.

Keywords: Free payments; Fourgous transfers; PACTE transfers; Transhumanist assumption; Time series; Gradient Boosting; Logistic regression.

Table des matières

Remerciements	v
Résumé	xi
Abstract	xiii
Table des matières	xv
Liste des figures	xvii
Liste des tableaux	xxi
Introduction générale	1
Contexte et structure de la thèse	1
Gestion des risques comportementaux	3
Gestion des risques biométriques	19
Principaux outils mathématiques utilisés	26
Principales contributions	32
Bibliographie	36
1 Éléments d'analyse des versements libres à l'aide de <i>machine learning</i>	45
Résumé	46
Abstract	46
1.1 Introduction	47
1.2 Data	48
1.3 First approach	49
1.4 Improvement via a machine learning methodology	52
1.5 Risk Management oriented analysis	59
1.6 Conclusion	65
1.7 Appendix	67
Bibliography	102
2 Évolution réglementaire et modélisation des transferts	109
Résumé	110

2.1	Introduction	110
2.2	Présentation de l'amendement Fourgous et de la loi PACTE	111
2.3	Les enseignements concernant l'amendement Fourgous	116
2.4	Tentative de modélisation des transferts Fourgous	119
2.5	Discussions	125
2.6	Conclusion	129
2.7	Annexes	131
	Bibliographie	142
3	Hypothèses extrêmes en longévité : le cas du transhumanisme	147
	Résumé	148
	Abstract	148
3.1	Introduction	148
3.2	Data	153
3.3	Transhumanist assumption	154
3.4	Discussion	160
3.5	Conclusion	162
3.6	Appendix	163
	Bibliography	166
	Conclusion	173
	Bibliographie générale	175

Liste des figures

1	Collecte nette assurance vie	4
2	Rendement assurance vie	5
3	Fiscalité assurance vie	8
4	Rachat conjoncturel	14
5	Ligne de Merton	15
6	Récapitulatif de la vie d'un contrat	18
7	Evolution de l'espérance de vie en France	20
8	Taux de mortalité pour quelques pays	25
9	Fonction logit	27
10	Algorithme de Gradient Boosting	30
11	Fonctions de perte	31
12	Cadre SHAP	32
1.1	Statistiques descriptives	49
1.2	Prédictions par séries temporelles	51
1.3	Corrélations entre produits	52
1.4	Fonctions de perte	55
1.5	Prédictions GBRT	56
1.6	Comparaison des prédictions	57
1.7	Cadre SHAP	60
1.8	Importance des variables	61
1.9	Comparaison versements <i>vs</i> rachats et arbitrages	63
1.10	Produit 1 : décomposition additive	68
1.11	Produit 1 : boîtes à moustaches et corrélogrammes	68
1.12	Produit 1 : résultats du calibrage	69
1.13	Produit 2 : décomposition additive	70
1.14	Produit 2 : boîtes à moustaches et corrélogrammes	70
1.15	Produit 2 : résultats du calibrage	71
1.16	Produit 3 : décomposition additive	72
1.17	Produit 3 : boîtes à moustaches et corrélogrammes	72
1.18	Produit 3 : résultats du calibrage	73
1.19	Produit 4 : décomposition additive	74

1.20	Produit 4 : boîtes à moustaches et corrélogrammes	74
1.21	Produit 4 : résultats du calibrage	75
1.22	Produit 5 : décomposition additive	76
1.23	Produit 5 : boîtes à moustaches et corrélogrammes	76
1.24	Produit 5 : résultats du calibrage	77
1.25	Produit 6 : décomposition additive	78
1.26	Produit 6 : boîtes à moustaches et corrélogrammes	78
1.27	Produit 6 : résultats du calibrage	79
1.28	Produit 7 : décomposition additive	80
1.29	Produit 7 : boîtes à moustaches et corrélogrammes	80
1.30	Produit 7 : résultats du calibrage	81
1.31	Produit 8 : décomposition additive	82
1.32	Produit 8 : boîtes à moustaches et corrélogrammes	82
1.33	Produit 8 : résultats du calibrage	83
1.34	Produit 9 : décomposition additive	84
1.35	Produit 9 : boîtes à moustaches et corrélogrammes	84
1.36	Produit 9 : résultats du calibrage	85
1.37	Produit 10 : décomposition additive	86
1.38	Produit 10 : boîtes à moustaches et corrélogrammes	86
1.39	Produit 10 : résultats du calibrage	87
1.40	Produit 1 : comparaison TS et GBRT	88
1.41	Produit 2 : comparaison TS et GBRT	88
1.42	Produit 3 : comparaison TS et GBRT	88
1.43	Produit 4 : comparaison TS et GBRT	89
1.44	Produit 5 : comparaison TS et GBRT	89
1.45	Produit 6 : comparaison TS et GBRT	89
1.46	Produit 7 : comparaison TS et GBRT	90
1.47	Produit 8 : comparaison TS et GBRT	90
1.48	Produit 9 : comparaison TS et GBRT	90
1.49	Produit 10 : comparaison TS et GBRT	91
1.50	Produit 1 : comportements par âge	92
1.51	Produit 1 : comportements par âge	93
1.52	Produit 1 : comportements par âge	93
1.53	Produit 1 : comportements par PM	94
1.54	Produit 1 : comportements par PM	95

LISTE DES FIGURES

1.55	Produit 1 : comportements par PM	95
1.56	Produit 1 : comportements par PM (UC)	96
1.57	Produit 1 : comportements par PM (UC)	97
1.58	Produit 1 : comportements par PM (UC)	97
1.59	Produit 2 : comportements par âge	98
1.60	Produit 2 : comportements par âge	99
1.61	Produit 2 : comportements par âge	99
1.62	Produit 2 : comportements par PM	100
1.63	Produit 2 : comportements par PM	101
1.64	Produit 2 : comportements par PM	101
1.65	Produit 2 : comportements par PM (UC)	102
1.66	Produit 2 : comportements par PM (UC)	103
1.67	Produit 2 : comportements par PM (UC)	103
2.1	Nombre de transferts Fourgous	113
2.2	Nombre de transferts Fourgous (portefeuilles étudiés)	117
2.3	Transferts Fourgous par âge, ancienneté et PM	119
2.4	Adéquation du modèle (Janvier-Mars 2007)	123
2.5	Résultats du modèle	124
2.6	Partie « conjoncturelle »	124
2.7	Transferts PACTE	127
2.8	Transferts PACTE par âge, ancienneté et PM	127
2.9	Taux PACTE par tranche de score Fourgous (Juillet-Septembre 2020) . .	128
2.10	Courbe ROC	132
2.11	Variables explicative des transferts Fourgous	132
2.12	Transferts Fourgous selon différentes variables	133
2.13	Adéquation du modèle (Janvier-Mars 2006)	134
2.14	Adéquation du modèle (Avril-Juin 2006)	134
2.15	Adéquation du modèle (Juillet-Septembre 2006)	135
2.16	Adéquation du modèle (Octobre-Décembre 2006)	135
2.17	Adéquation du modèle (Janvier-Mars 2007)	136
2.18	Adéquation du modèle (Avril-Juin 2007)	136
2.19	Adéquation du modèle (Juillet-Septembre 2007)	137
2.20	Adéquation du modèle (Octobre-Décembre 2007)	137
2.21	Adéquation du modèle (Janvier-Mars 2008)	138

2.22 Adéquation du modèle (Avril-Juin 2008)	138
2.23 Adéquation du modèle (Juillet-Septembre 2008)	139
2.24 Adéquation du modèle (Octobre-Décembre 2008)	139
2.25 Adéquation du modèle (Janvier-Mars 2009)	140
2.26 Adéquation du modèle (Avril-Juin 2009)	140
2.27 Adéquation du modèle (Juillet-Septembre 2009)	141
2.28 Adéquation du modèle (Octobre-Décembre 2009)	141
2.29 Taux PACTE par tranche de score Fourgous (Janvier-Mars 2020)	142
2.30 Taux PACTE par tranche de score Fourgous (Avril-Juin 2020)	142
2.31 Taux PACTE par tranche de score Fourgous (Juillet-Septembre 2020) . .	142
2.32 Taux PACTE par tranche de score Fourgous (Octobre-Décembre 2020) .	143
3.1 Données utilisées	153
3.2 Approche « causes de décès »	155
3.3 Amélioration annuelle des taux de mortalité	158
3.4 Amélioration transhumaniste	159
3.5 Impact des « cures de jouvence »	159
3.6 Rectangularisation de la courbe de survie	161

Liste des tableaux

1	Transformations « Fourgous »	7
2	Paramètres de la loi de rachat conjoncturel	14
3	Crédibilité de l'hypothèse transhumaniste	35
1.1	Signification des variables	54
1.2	Comparaison des RMSLE	57
1.3	Tests de sensibilité sur les variables	58
1.4	Produit 1 : tests KPSS et ADF	69
1.5	Produit 2 : tests KPSS et ADF	71
1.6	Produit 3 : tests KPSS et ADF	73
1.7	Produit 4 : tests KPSS et ADF	75
1.8	Produit 5 : tests KPSS et ADF	77
1.9	Produit 6 : tests KPSS et ADF	79
1.10	Produit 7 : tests KPSS et ADF	81
1.11	Produit 8 : tests KPSS et ADF	83
1.12	Produit 9 : tests KPSS et ADF	85
1.13	Produit 10 : tests KPSS et ADF	87
1.14	RMSLE pour les différents modèles	91
2.1	Comparatif entre l'amendement Fourgous et la loi PACTE	115
2.2	Statistiques Fourgous	117
2.3	Limite de l'approche « produit en croix »	125
2.4	Statistiques PACTE	126
3.1	Crédibilité de l'hypothèse transhumaniste	153
3.2	Taux de décès par cause	156
3.3	Evolution de la crédibilité accordée	161
3.4	Impact de l'hypothèse transhumaniste	162

Introduction générale

Contexte et structure de la thèse

Contexte

Les travaux de cette thèse ont été effectués dans le cadre d’une convention CIFRE avec CNP Assurances, au sein du pôle R&Data Lab de la Direction Technique Groupe, dont les activités concernent pour partie le calibrage de lois biométriques et comportementales et pour partie l’application des méthodologies issues de la *data science* pour l’amélioration des processus internes et de l’expérience client. Cette thèse s’inscrit donc naturellement dans une démarche opérationnelle d’analyse et de gestion des risques.

La concurrence de plus en plus forte, les contraintes réglementaires de plus en plus nombreuses et le contexte économique de plus en plus difficile imposent aux compagnies d’assurance une gestion efficace et cohérente de leurs risques, en lien avec leur appétence. Cette gestion efficiente suppose une compréhension fine des mécanismes sous-jacents à l’heure où émergent des algorithmes de *machine learning* qui innervent le secteur de l’assurance et qui permettent d’améliorer la connaissance des assurés ou la maîtrise des risques, en perfectionnant notamment les méthodologies actuarielles traditionnelles (e.g. Lopez *et al.* [2016]; Wüthrich [2018]), ce qui peut potentiellement avoir des impacts économiques réels pour l’assureur, par exemple sur le *churn* comme chez Loisel *et al.* [2019], sur la prévention comme chez Gauchon *et al.* [2020] ou encore dans la lutte contre la fraude comme chez Makki [2019].

C’est dans ce contexte que cette thèse a été réalisée, dans une démarche de recherche constante d’équilibre entre complexité des modèles et explicabilité des résultats afin de proposer des cadres pour la compréhension et la gestion des risques biométriques et comportementaux en assurance vie.

Structure de la thèse

Cette thèse se structure en quatre parties. Après une introduction générale permettant de situer, contextualiser et introduire les travaux et les principaux outils statistiques

utilisés, trois chapitres viennent former le cœur de ce manuscrit.

Les Chapitres 1 et 2 s'intéressent en particulier aux risques comportementaux en assurance vie :

- Le Chapitre 1 étudie les versements libres sur les contrats d'épargne, pour lesquels la littérature est peu fournie. D'un point de vue théorique, il s'attache à montrer comment les méthodologies et modèles issus de la *data science* peuvent aider à améliorer l'efficacité de méthodes statistiques plus traditionnelles. D'un point de vue pratique, nous analysons les *drivers* des versements libres d'un point de vue macro, mettant en évidence en particulier l'impact des campagnes commerciales, et d'un point de vue micro, mettant en lumière quelques éléments des comportements des épargnants.
- Le Chapitre 2 examine les comportements liés à des transferts, qui consistent en la possibilité pour l'épargnant d'investir sur un nouveau contrat en gardant les avantages fiscaux liés au contrat d'origine. En particulier, nous analysons les transferts dits « Fourgous », lancés en 2005, pour mettre en lumière certaines caractéristiques de ces transferts ; nous en proposons une modélisation et nous analysons également les principaux points communs et différences majeures avec la loi PACTE, lancée en 2019, et qui permet également d'effectuer des transferts. Par ailleurs, nous étudions les premiers retours concernant cette loi récente.

Le Chapitre 3 concerne quant à lui un des risques biométriques majeurs pour les compagnies d'assurance, la longévité. En particulier, il reprend l'article *Longevity and extreme assumptions: some insights on transhumanism* qui s'intéresse aux hypothèses extrêmes en longévité, aujourd'hui peu considérées dans le monde actuariel, mais dont la prise en compte serait de nature à bouleverser en profondeur la gestion de ce risque. En particulier, nous nous penchons sur le cas du transhumanisme, qui anticipe un allongement de la durée de vie extraordinaire (« L'homme qui vivra 1000 ans est né ») grâce notamment à l'apport de la science et des technologies. Nous analysons cette hypothèse et considérons ses implications, tant assurantielles que sociétales.

Dans la suite de cette introduction générale, nous présentons les éléments de contexte qui permettront de comprendre les travaux de la thèse et de la resituer dans la littérature. En particulier, nous abordons dans un premier temps la gestion des risques comportementaux en assurance vie, en présentant les grands principes de l'assurance vie en France, ses dernières évolutions réglementaires majeures et les principaux risques comportementaux qu'elle implique pour l'assureur. Ces différents éléments introduisent

les deux premiers chapitres. Ensuite, nous abordons la gestion des risques biométriques en assurance vie, en nous intéressant en particulier à la longévité. Nous présentons les grands principes et méthodes utilisés par les actuaires et les démographes aujourd'hui et en précisons les limites ainsi que les pistes peu explorées. Cela nous permet d'introduire les éléments au cœur du troisième chapitre. Nous présentons également les principaux outils mathématiques utilisés pour les différents travaux, et terminons en résumant les différentes contributions à la gestion des risques de cette thèse.

Gestion des risques comportementaux en assurance vie

Les grands principes de l'assurance vie en France

L'assurance vie est un placement financier qui permet à un assuré d'épargner de l'argent pour le transmettre à un bénéficiaire en cas de réalisation d'un risque lié à sa durée de vie ; le bénéficiaire peut être l'assuré lui-même. On distingue :

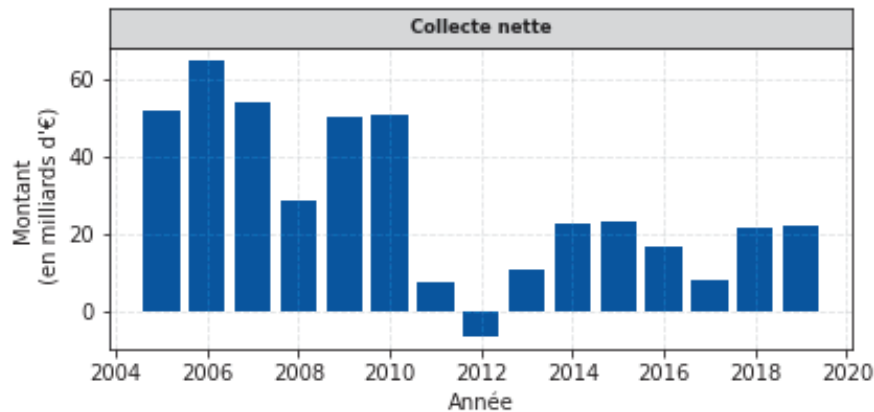
- les contrats « en cas de vie », qui prévoient le versement d'un capital ou d'une rente au bénéficiaire en cas de survie de l'assuré au terme du contrat ;
- les contrats « en cas de décès », qui prévoient le versement d'un capital ou d'une rente au bénéficiaire en cas de décès de l'assuré avant le terme du contrat, éventuellement avec contre-assurance des primes (remboursement de tout ou partie des primes payées par l'assuré si celui-ci survit au terme du contrat) ;
- les contrats « mixtes », qui prévoient le versement d'un capital ou d'une rente soit au bénéficiaire en cas de décès de l'assuré avant le terme du contrat, soit à l'assuré en cas de survie de celui-ci au terme du contrat.

Les contrats d'assurance vie peuvent être souscrits à titre individuel ou à titre collectif. Dans le cas de l'individuel, les deux seules parties contractantes sont l'assureur et le client qui souscrit son contrat directement auprès de la compagnie d'assurance. Dans le cas collectif, c'est une personne morale (entreprise ou association par exemple) qui souscrit le contrat d'assurance vie et qui le distribue ensuite à ses adhérents.

Avec un encours de près de 1 800 milliards d'euros en 2019¹, l'assurance vie est l'un des placements préférés des français, qui l'utilisent aussi bien dans une optique de

1. Source : sauf mention contraire, les chiffres présentés dans cette partie sont tirés de la Fédération Française de l'Assurance (FFA).

constitution d'un capital que de complément de retraite ou de transmission de patrimoine. Cet attrait pour l'assurance vie explique la collecte nette régulièrement positive, tel qu'illustré par le Graphique 1, bien que cette collecte soit plus faible depuis la crise de 2011.

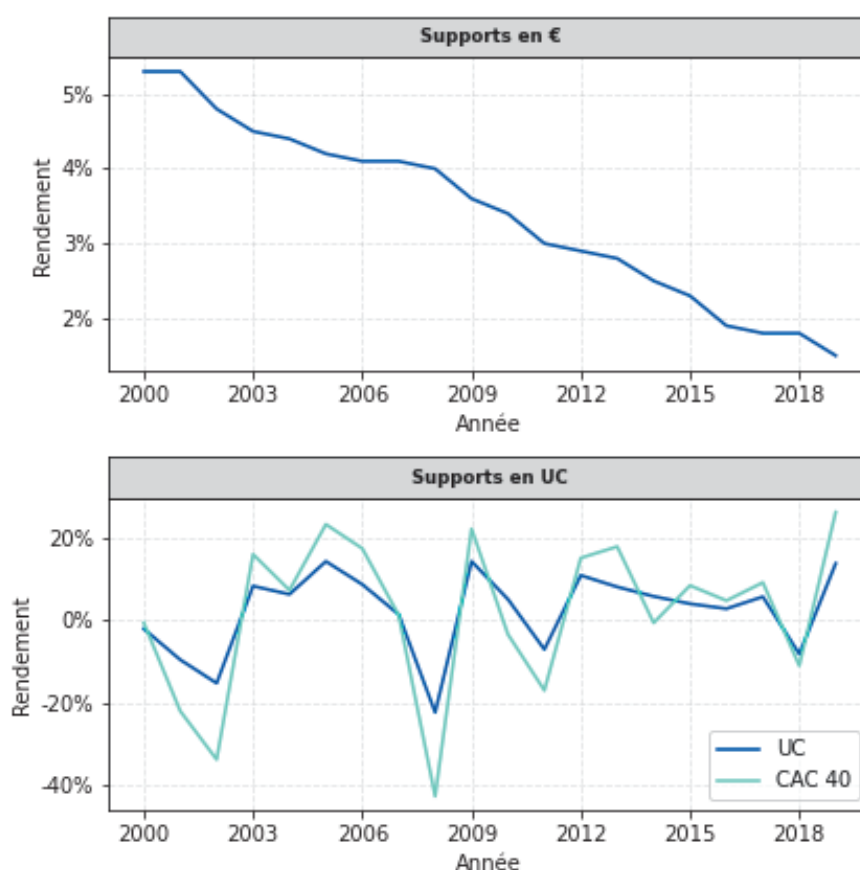


GRAPHIQUE 1 – Collecte nette en France.

Il existe deux grands types de contrats d'assurance vie : les contrats monosupports en euros et les contrats multisupports. Dans le cas des contrats monosupports, les versements de l'épargnant sont investis par l'assureur sur des produits financiers dits « sans risque », comme par exemple des obligations d'État. Chaque année, l'assureur revalorise les versements à un taux lié à ses performances financières (sachant qu'il doit garantir un rendement minimum en cas de baisse de la valeur de l'euro, complété par une participation aux bénéfices) pour l'année écoulée, à moins qu'un taux minimum ne soit garanti contractuellement. Le capital est garanti à tout moment et les intérêts de l'année sont définitivement acquis : c'est l'assureur qui porte le risque. Dans le cadre des contrats multisupports, tout ou partie du capital est investi sur des produits financiers liés à la bourse, tels que des obligations, des actions, des Sociétés d'Investissement à Capital Variable (Sicav)... Ces instruments, investis sur les marchés financiers, sont appelés unités de compte (UC). L'assureur ne garantit pas la valeur de ces unités de compte mais leur nombre : le risque est alors porté par l'assuré. Les unités de compte permettent des plus-values plus importantes que les supports en euros, mais ils sont volatiles et donc plus risqués. L'assureur est tenu à un devoir de conseil : il doit informer l'assuré des caractéristiques des produits qu'il commercialise et s'assurer que le produit est adapté à ses besoins.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le Graphique 2 illustre à la fois l'intérêt et le risque des unités de compte : alors que les rendements des supports en euros diminuent linéairement depuis de nombreuses années (de 5,3% en 2000 à 1,5% en 2019), dans le même temps le rendement des supports en unités de compte offre des perspectives potentiellement intéressantes (plus de 20% en 2005, 2009 et 2019) mais il est parfois négatif (en 2000, 2001, 2002, 2008, 2010, 2011, 2014 et 2018) lorsque le CAC40, auquel il est lié, subit des chocs économiques. À titre d'illustration, un individu qui aurait investi 100€ sur un support en unités de compte début 2000, pour un rendement identique à celui du graphique proposé, aurait perdu 14,85€ (sans compter d'éventuels frais) en rachetant début 2009 ; il gagnerait 43,8€ en rachetant en 2020... On comprend dès lors que l'horizon d'investissement est un élément essentiel à prendre en compte lors du placement de son épargne sur des unités de compte.



GRAPHIQUE 2 – Rendement des fonds en € et UC. Net de frais de gestion pour les fonds en € et brut pour les fonds en UC ; brut de prélèvements sociaux et fiscaux pour les deux.

Les principales évolutions réglementaires récentes

Le secteur de l'assurance vie a subi un certain nombre d'évolutions réglementaires au cours des 15 dernières années. Nous présentons succinctement trois des principales dans ce qui suit.

Les transferts Fourgous

Porté par le député Jean-Michel Fourgous, l'amendement qui porte son nom a été inséré dans la loi relative à la confiance et à la modernisation de l'économie de 2005. Son objectif était de permettre aux détenteurs d'un contrat monosupport en euros de transférer leur épargne sur un produit multisupport (si l'assureur en offre la possibilité) et donc de la diversifier en investissant une partie sur des supports en unité de compte, le tout sans perdre leur antériorité fiscale (la fiscalité de l'assurance vie est détaillée dans le paragraphe suivant).

Trois conditions sont nécessaires pour réaliser un transfert dit « Fourgous » :

- (i) le transfert doit s'effectuer au sein de l'assureur d'origine ;
- (ii) le transfert doit concerner l'intégralité de l'encours ;
- (iii) au moins 20% de l'encours doit être investi sur des supports UC.

Quinze ans après sa mise en œuvre, les effets de l'amendement sont visibles sur le paysage de l'assurance vie comme le montre le Tableau 1. Le gros des transferts a surtout eu lieu entre 2006 et 2008 (plus de la moitié des transferts sur la période 2005-2018) pour un total de 30% réinvesti en unités de compte. Ainsi, si les provisions mathématiques associées aux contrats monosupports représentent 56% du total en 2005, elles ne correspondent plus qu'à 24% du total en 2019. Cette diminution est vraisemblablement la conjonction de l'amendement et de la diminution progressive de la commercialisation des contrats monosupports au profit des contrats multisupports. Il convient néanmoins d'apporter une nuance à ces propos : seul 23% de l'encours est investi sur des supports en unités de compte en 2019, pour 19% en 2005... De façon générale, si l'épargne est davantage investie sur des contrats multisupports, il reste une certaine frilosité concernant l'investissement sur les unités de compte et les supports sécurisés restent une valeur refuge. Cela s'observe sur les arbitrages entre supports, qui, loin de s'effectuer uniquement des supports en euros vers les supports en unités de compte, alternent au gré de la confiance des épargnants.

TABLEAU 1 – Transformations dans le cadre de l'amendement « Fourgous ».

Année	Nombre de contrats transformés (en milliers)	Montant total transféré (en Md€)	dont réinvesti en unités de compte
2005	20	1,1	0,4
2006	494	20,2	6,4
2007	812	26,1	7,8
2008	266	8,2	2,2
2009	173	5,0	1,3
2010	148	4,2	1,1
2011	115	3,2	0,8
2012	85	2,5	0,7
2013	95	3,3	0,9
2014	103	3,8	1,1
2015	124	4,8	1,5
2016	131	5,2	1,6
2017	218	8,3	2,7
2018	174	5,6	1,8
2019	99	2,9	1,0
2005-2019	3 057	104,5	31,2

Le Prélèvement Forfaitaire Unique (PFU)

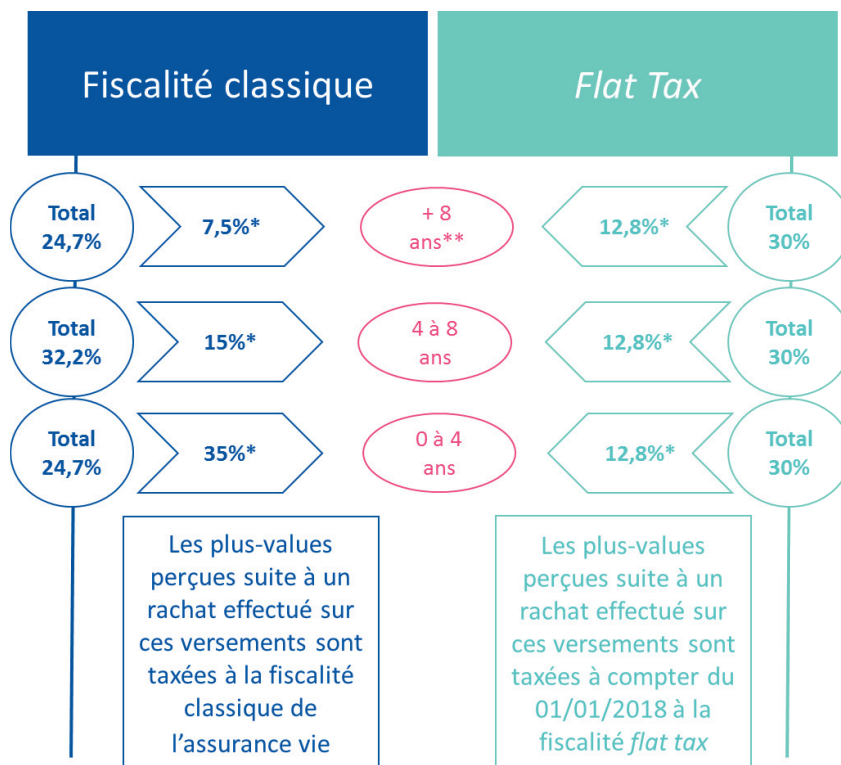
Le Prélèvement Forfaitaire Unique ou PFU, également appelé *Flat Tax*, est entré en vigueur le 1^{er} janvier 2018 et modifie la fiscalité de l'assurance vie pour les produits issus de versements réalisés avant le 27 septembre 2017, tel qu'indiqué par le Graphique 3.

Pour les produits liés à des versements réalisés avant le 27 septembre 2017, l'épargnant a le choix, au moment de son rachat, entre la réintégration des produits dans sa déclaration d'impôt sur le revenu d'une part, et l'imposition au Prélèvement Forfaitaire Libératoire (PFL) d'autre part. Le PFL est dégressif : pour les contrats de moins de 4 ans d'ancienneté, son taux est de 35% ; il passe à 15% pour les contrats dont l'ancienneté est comprise entre 4 et 8 ans ; enfin, il est de 7,5% pour les contrats dont l'ancienneté est supérieure à 8 ans. Au moment du rachat, si des produits associés à des versements effectués avant le 27 septembre 2017 sont constatés, l'assureur prélève soit uniquement des prélèvements sociaux (dont le taux est actuellement de 17,2%) si l'assuré a choisi la première option, soit les prélèvements sociaux et le PFL si l'assuré a choisi la deuxième option.

Pour les produits liés à des versements réalisés après le 27 septembre 2017, c'est la *Flat Tax* qui s'applique. Au moment du rachat, l'assuré a le choix entre la réintégration des

produits dans sa déclaration d'impôt sur le revenu d'une part, et l'imposition au PFU d'autre part. Le taux du PFU est de 12,8% si le contrat a moins de 8 ans d'ancienneté ; si le contrat a plus de 8 ans d'ancienneté, ce taux est de 7,5% pour les produits associés à des versements ne dépassant pas 150 000€ et de 12,8% sinon. Au moment du rachat, si des produits associés à des versements effectués après le 27 septembre 2017 sont constatés, l'assureur procède au précompte d'un Prélèvement Forfaitaire Obligatoire (PFO), non libératoire, au taux de 12,8% pour les contrats de moins de 8 ans et de 7,5% sinon, auquel s'ajoutent les prélèvements sociaux. Ce précompte est l'objet d'une régularisation fiscale par la suite.

Notons qu'il existe un abattement annuel d'un montant de 4 600€ pour une personne célibataire, veuve ou divorcée et de 9 200€ pour les personnes soumises à une déclaration d'impôt commune.



* Auquel s'ajoutent les prélèvements sociaux (17,2% au 01/01/2021)

** Abattement de 4600€ / 9200€

GRAPHIQUE 3 – Fiscalité des produits d'assurance vie.

Inspiré de AXA ^a

^a <https://www.axa.fr/qui-sommes-nous/comprendre-flat-tax.html>

La loi PACTE (Plan d'Action pour la Croissance et la Transformation des Entreprises)

La loi PACTE correspond à la loi n° 2019-486 du 22 mai 2019 relative à la croissance et à la transformation des entreprises présentée par le gouvernement d'Édouard Philippe. Elle impacte le droit des sociétés aussi bien que le droit des affaires ou le droit social avec un certain nombre de mesures qui visent à² : « simplifier la création d'entreprise, faire grandir les entreprises, autoriser l'échec pour mieux rebondir, transmettre les entreprises, financer la croissance des entreprises, innover et préparer l'avenir, défendre les entreprises stratégiques, récompenser le travail des salariés et redéfinir la raison d'être des entreprises ».

En particulier, la loi PACTE innove également le secteur de l'assurance et en particulier celui de l'assurance vie avec un certain nombre de changements qui prévoient, entre autres :

- Le renforcement des obligations d'information de l'assureur : avant la souscription, l'assureur doit désormais informer l'épargnant de la performance brute de frais, nette de frais ainsi que des frais prélevés au cours d'une période définie par arrêté du Ministre chargé de l'économie pour chaque unité de compte de ses contrats en comportant. Le niveau de détail est fin puisqu'il doit mentionner également les éventuelles rétrocessions de commissions des intermédiaires tels que les gestionnaires de fonds par exemple. L'information annuelle délivrée par l'assureur est également renforcée avec, en substance, l'obligation pour l'assureur de mentionner le rendement garanti moyen et le taux moyen de la participation aux bénéfices des contrats de même nature, qu'ils soient ouverts ou fermés à la souscription. Ces éléments viennent compléter les informations déjà obligatoires (rendement garanti et participation aux bénéfices techniques et financiers du contrat de l'épargnant). Pour les contrats comportant des unités de compte, l'assureur doit désormais communiquer annuellement au souscripteur, en plus des valeurs de ces unités de compte, de leur évolution annuelle depuis la souscription du contrat et des modifications significatives affectant chaque unité de compte - dont l'information était déjà obligatoire -, les frais prélevés au titre de chaque unité de compte, les frais supportés par l'actif en représentation de l'engagement en unités de compte au cours du dernier exercice connu et les éventuelles rétrocessions de commission perçues par lui ou ses intermédiaires.

2. <https://www.economie.gouv.fr/loi-pacte-croissance-transformation-entreprises>

Au moins une fois par trimestre, l'assureur doit communiquer à ses épargnants le montant de la valeur de rachat et la part des actifs de leur épargne allouée à la transition énergétique au secteur solidaire et responsable. Enfin, l'assureur doit publier annuellement, sur son site internet, le rendement garanti moyen et le taux moyen de la participation aux bénéfices attribué pour chacun de ses contrats d'assurance vie ou de capitalisation (la publication doit avoir lieu dans les 3 premiers mois de l'année).

- Le développement des unités de compte labellisées vertes, solidaires et responsables : à compter du 1^{er} janvier 2020, tout contrat en unités de compte devra proposer dans sa gamme d'actifs financiers au moins une unité de compte composée d'actifs respectant les critères suivants :
 - (i) être composé, pour une part comprise entre 5% et 10%, de titres émis par des entreprises solidaires d'utilité sociale agréées, par des sociétés de capital-risque mentionnées au I de l'article 1^{er} de la loi n° 85-695 du 11 juillet 1985 ou par des fonds communs de placements à risque dont l'actif est composé d'au moins 40% de titres émis par des entreprises solidaires ;
 - (ii) avoir obtenu un label reconnu par l'État et satisfaisant à des critères de financement de la transition énergétique et écologique selon des modalités définies par décret ;
 - (iii) avoir obtenu un label reconnu par l'État et satisfaisant aux critères d'investissement socialement responsable selon des modalités définies par décret.
- La transférabilité des contrats d'assurance vie : les détenteurs de contrats d'assurance vie auront désormais la possibilité, si l'assureur le propose, de transférer partiellement ou totalement l'épargne de leur contrat vers un contrat permettant qu'une part ou l'intégralité des primes versées soient affectées à l'acquisition de droits exprimés en unités de compte ou de droits donnant lieu à la constitution d'une provision de diversification (contrats euro-croissance). Ce transfert, qui ne peut se faire qu'au sein du même assureur, n'a pas les conséquences fiscales d'un dénouement de contrat : l'assuré conserve donc son antériorité fiscale. Dans les faits, le transfert s'effectue soit par un avenant au contrat d'origine, soit par la souscription d'un nouveau contrat auprès de la même compagnie d'assurance.
- La mise en place d'une passerelle entre assurance vie et Plan Epargne Retraite (PER) : jusqu'au 1^{er} janvier 2023, la loi PACTE permet de transférer son épargne en assurance vie vers un PER aux conditions cumulatives suivantes :

(i) détenir un contrat d'assurance vie de plus de 8 ans ;

(ii) être à plus de 5 ans de son départ à la retraite.

Ce transfert bénéficie d'un double avantage fiscal : un abattement sur les plus-values de l'assurance vie et la déductibilité du revenu imposable des sommes investies sur le PER.

- La modernisation du fonds euro-croissance : le fonds euro-croissance a été créé en 2014 et est présenté comme un alliage entre la sécurité des fonds en euros et la performance des unités de compte. En quelques mots, le fonds euro-croissance est un fonds diversifié qui diffère du fonds en euros par le fait que l'assureur ne garantit le capital qu'au terme du contrat, dont l'échéance est fixée à 8 ans minimum. L'assureur constitue une provision mathématique pour assurer la future garantie de capital, et une provision de diversification pour assurer du rendement, chacune des parts étant exprimée dans une unité différente (euros et part de provision de diversification) et avec un rendement différent, rendant le tout difficilement lisible pour l'épargnant (ce qui explique le peu d'engouement pour ce produit, seulement 3,1 milliards d'euros d'encours fin 2019). La loi PACTE propose un nouveau fonds en euro-croissance simplifié et plus lisible pour l'assuré, avec notamment un taux de rendement unifié et un capital exprimé uniquement en part de diversification avant l'échéance (la garantie à l'échéance étant exprimée en euros).

La gestion du risque comportemental

La gestion du risque comportemental est une problématique primordiale pour l'assureur. Une mauvaise compréhension des mécanismes comportementaux de ses assurés peut en effet conduire une compagnie d'assurances à mal gérer ses flux financiers futurs et impacte donc directement sa rentabilité voire sa solvabilité.

De façon générale, l'assuré dispose d'une grande latitude pour gérer son contrat comme il le souhaite. Les risques financiers associés aux actions qu'il peut effectuer forment, pour l'assureur, le risque comportemental. L'étude des comportements assurés est à la frontière de plusieurs disciplines, et en particulier l'économie, qui s'intéresse par exemple aux biais cognitifs et comportementaux ainsi qu'à la notion d'aléa moral : la thèse de Mouminoux [2018], primée par le prix SCOR, en est une parfaite illustration. Dans cette thèse, nous adoptons le prisme actuariel dont nous présentons les principales composantes dans ce qui suit.

Rachat

Le rachat est le risque le plus fourni en termes de littérature. Il s'agit de la possibilité qu'a un assuré de récupérer une partie (on parle de rachat partiel, qui peut être programmé à l'avance ou non) ou l'intégralité (on parle de rachat total) de sa provision mathématique, éventuellement déduite de pénalités en cas de rachat anticipé.

Historiquement, deux approches ont été proposées pour expliquer le rachat³ :

- le besoin urgent de liquidité pour l'assuré (Outreville [1990]);
- l'existence d'arbitrages sur le marché : si les taux d'intérêt augmentent, des opportunités d'arbitrage apparaissent qui poussent donc les assurés à résilier leur contrat (Cummins [1975]; Pesando [1974]).

Par ailleurs, de nombreux auteurs se sont intéressés aux causes explicatives du rachat. D'un point de vue macro-économique, des variables environnementales telles que les taux d'intérêt, le taux de chômage ou encore le PIB (Produit Intérieur Brut) ou encore des caractéristiques de l'entreprise ont été testées (Cox et Lin [2006]; Kim [2005a,b]; Kuo *et al.* [2003]). Des auteurs se sont également intéressés au rachat d'un point de vue micro-économique, en intégrant notamment des variables liées aux assurés et à leur produit d'assurance comme l'âge, le sexe ou l'ancienneté par exemple (Kagraoka [2005]; Milhaud *et al.* [2011]; Renshaw et Haberman [1986]). Notons que ces approches supposent souvent l'indépendance des assurés en termes de comportement de rachat, ce qui n'est plus forcément vrai lors d'une crise économique (Loisel et Milhaud [2010]).

Un pan de la littérature s'intéresse également au rachat sous le prisme financier, en le considérant comme une option financière que l'on cherche à évaluer. Bacinello [2005] et Costabile *et al.* [2008] s'appuient par exemple sur l'utilisation du modèle Cox-Ross-Rubinstein (CRR) pour la valorisation ; Bacinello *et al.* [2009] considèrent les rachats précoces comme des options américaines ; Siu [2005] se fonde sur la théorie *American Contingent Claim* (ACC) ainsi que l'application des mouvements browniens pour décomposer les contrats avec participation aux bénéfices en une obligation couplée à une option de rachat et une option bonus ; De Giovanni [2007] interroge la théorie ACC, qui suppose l'optimalité du comportement des assurés, et la compare avec son approche dite « d'espérance rationnelle ». Ces quelques exemples, loin d'être exhaustifs, montrent l'importance accordée au rachat dans la littérature.

3. Par abus de langage, on omet de préciser qu'il s'agit du rachat total, très majoritairement étudié dans la littérature.

D'un point de vue réglementaire, le rachat est souvent différencié entre structurel et conjoncturel. La partie structurelle est liée aux caractéristiques de l'individu là où la partie conjoncturelle dépend d'éléments exogènes à l'individu. L'ACPR [2013] propose de modéliser le rachat conjoncturel comme fonction du taux servi R et du taux attendu TA par les assurés. L'idée est que si le taux servi est inférieur au taux attendu, les assurés auront tendance à racheter davantage que ce que prévoit la courbe des rachats structurels, et vice versa en cas de taux servi supérieur aux attentes. Mathématiquement, la fonction est définie comme

$$RC(R, TA) = \begin{cases} RC_{max} & \text{si } R - TA < \alpha, \\ RC_{max} \times \left(\frac{R - TA - \beta}{\alpha - \beta} \right) & \text{si } \alpha < R - TA < \beta, \\ 0 & \text{si } \beta < R - TA < \gamma, \\ RC_{min} \times \left(\frac{R - TA - \gamma}{\delta - \gamma} \right) & \text{si } \gamma < R - TA < \delta, \\ RC_{min} & \text{si } R - TA > \delta, \end{cases} \quad (1)$$

où l'on peut donner une interprétation aux différents paramètres :

- α est le seuil en-dessous duquel les rachats conjoncturels sont constants et fixés à leur niveau maximum (RC_{max}) : l'écart de taux ne joue plus sur le comportement des assurés ;
- β et γ sont les seuils d'indifférence à la hausse ou à la baisse du taux servi : entre ces seuils, le comportement de l'assuré reste identique ;
- δ est le seuil au-dessus duquel les rachats conjoncturels sont constants et fixés à leur niveau minimum (RC_{min}) : l'écart de taux ne joue plus sur le comportement des assurés.

Ces rachats conjoncturels viennent s'ajouter aux rachats structurels RS et le taux de rachat total RT s'exprime donc comme

$$RT(R, TA, .) = \min(1, \max(0, RS(.) + RC(R, TA))). \quad (2)$$

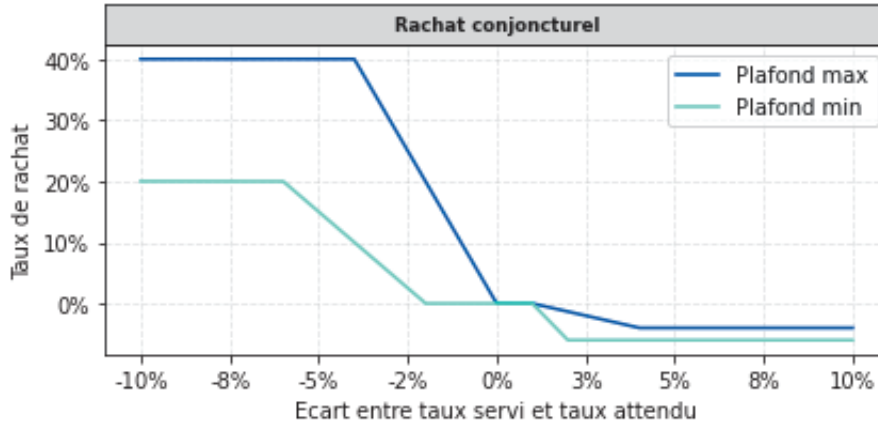
Notons que l'ACPR [2013] propose un plafond maximum et un plafond minimum pour les différents paramètres (voir Tableau 2 et Graphique 4).

Arbitrages

Les arbitrages sont la possibilité pour un assuré de modifier la répartition de son épargne entre les supports en euros et en unités de compte, moyennant éventuelle-

TABLEAU 2 – Paramètres de la loi de rachat conjoncturel.

	α	β	γ	δ	RC_{min}	RC_{max}
Plafond max	-4%	0%	1%	4%	-4%	40%
Plafond min	-6%	-2%	1%	2%	-6%	20%



GRAPHIQUE 4 – Courbes de rachat conjoncturel préconisées par l'ACPR.

ment des frais (il n'y a pas d'arbitrage possible pour les contrats monosupports). L'arbitrage peut être défini automatiquement en fonction par exemple de performances financières.

Les travaux abordant les arbitrages se basent principalement sur la théorie développée par Merton [1969, 1971] et se fondent sur une hypothèse de rationalité de l'assuré. Le principe est que l'on décompose le capital c_t investi par l'assuré sur son contrat à l'instant t comme

$$c_t = x_t + y_t, \quad (3)$$

où x_t est le montant investi sur le fonds en euros et y_t le montant investi en unités de compte. En l'absence d'arbitrage, ces deux quantités évoluent suivant

$$\begin{cases} dx_t = r \times x_t \times dt, \\ dy_t = \mu \times y_t \times dt + \sigma \times y_t \times dW_t, \end{cases} \quad (4)$$

où r désigne le rendement du fonds euros, μ le rendement des supports en unités de compte, σ la volatilité et W_t un mouvement brownien standard. Le fonds en unités de compte est ainsi modélisé via un modèle de Black-Scholes classique. En notant α_t la part du capital investie dans le fonds en unités de compte à l'instant t , l'évolution du

capital investi suit donc la dynamique

$$\frac{dc_t}{c_t} = (\alpha_t \times \mu + (1 - \alpha_t) \times r) \times dt + \alpha_t \times \sigma \times dW_t. \quad (5)$$

L'assuré, supposé rationnel, cherche à maximiser son utilité représentée par la fonction U à l'horizon de gestion de temps $T > t$ qu'il s'est fixé, la valeur du problème devenant ainsi

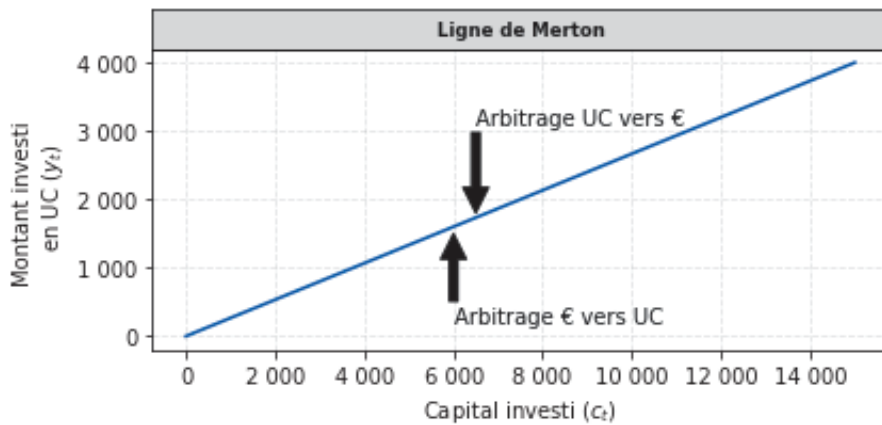
$$\sup_{\alpha \in \mathcal{A}} \mathbb{E}[U(c_T)], \quad (6)$$

$\mathcal{A}$ étant l'ensemble des stratégies d'arbitrage admissibles. Ce problème d'optimisation stochastique peut être résolu par la méthode de programmation dynamique via la résolution de l'équation d'Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB). En choisissant par exemple une fonction d'utilité CRRA (*Constant Relative Risk Aversion*) de la forme

$$U(x) = \frac{x^{1-\theta}}{1-\theta} \text{ pour } \theta \in \mathbb{R}^* - \{1\}, \quad (7)$$

on obtient une solution explicite, appelée ligne de Merton, pour la proportion d'unités de compte à investir pour l'assuré, qui ne dépend pas de l'horizon de temps d'investissement de l'assuré (voir Graphique 5) :

$$y_t = c_t \times \left(\frac{\mu - r}{\theta \sigma^2} \right). \quad (8)$$



GRAPHIQUE 5 – Ligne de Merton pour $\mu = 3\%$, $r = 1\%$, $\sigma^2 = 15\%$ et $\theta = 0,5$.

Cette approche n'est pas dénuée de limites. Outre la rationalité supposée de l'assuré, hypothèse très forte largement remise en cause en économie et à laquelle on préfère de plus en plus l'économie comportementale (e.g. Thaler [2016]), le raisonnement exclut de fait les autres événements susceptibles d'altérer le capital de l'assuré à l'instant t (rachats, versements par exemple), néglige les frais (même s'il est possible de les intégrer comme chez Brion [2009]) et simplifie la modélisation des fonds en euros et en unités de compte.

Notons enfin que certains travaux s'intéressent aux arbitrages d'un point de vue statistique et aux variables explicatives, qu'elles soient structurelles (âge, ancienneté ou niveau d'épargne par exemple) ou conjoncturelles (la variation du CAC 40 par exemple). On citera à titre d'exemple les mémoires d'Amrani [2013] ou d'Hamaoui [2012]. Des modèles de *machine learning* ont également été utilisés récemment pour modéliser les arbitrages dynamiques (voir e.g. Berrada [2017]).

Versements

Les versements sont la possibilité pour l'assuré d'investir sur son contrat d'épargne, s'il ne s'agit pas d'un contrat à cotisation unique (une seule cotisation versée au moment de la souscription). On distingue :

- Les versements réguliers, pour lesquels le montant et le cadencement des versements sont déterminés à l'avance (typiquement mensuellement, trimestriellement ou annuellement). L'assuré conserve la possibilité de modifier le montant ou le calendrier des versements, voire de les arrêter. Les versements réguliers sont liés à la capacité d'épargne de l'assuré.
- Les versements libres, pour lesquels l'assuré verse le montant de son choix (sous contrainte éventuelle des minimums à respecter pour effectuer un versement) à la date qu'il choisit.

L'investissement peut se faire sur des supports en euros ou en unités de compte et des frais de versement peuvent s'appliquer.

La norme IFRS17 et la question autour de l'intégration des versements, notamment libres, dans la frontière des contrats, ont engendré un ensemble de travaux actuariels récents sur le sujet : à titre d'exemple, les mémoires de Benabdelkrim [2017] ou Assaraf [2020] s'intéressent au *scoring* des individus intéressés à faire un versement libre via l'utilisation de techniques de *machine learning*, mettant en évidence les variables

d'intérêt sur le sujet, telle que l'ancienneté. Notons qu'un nombre important de mémoires sont encore, à ce jour, confidentiels.

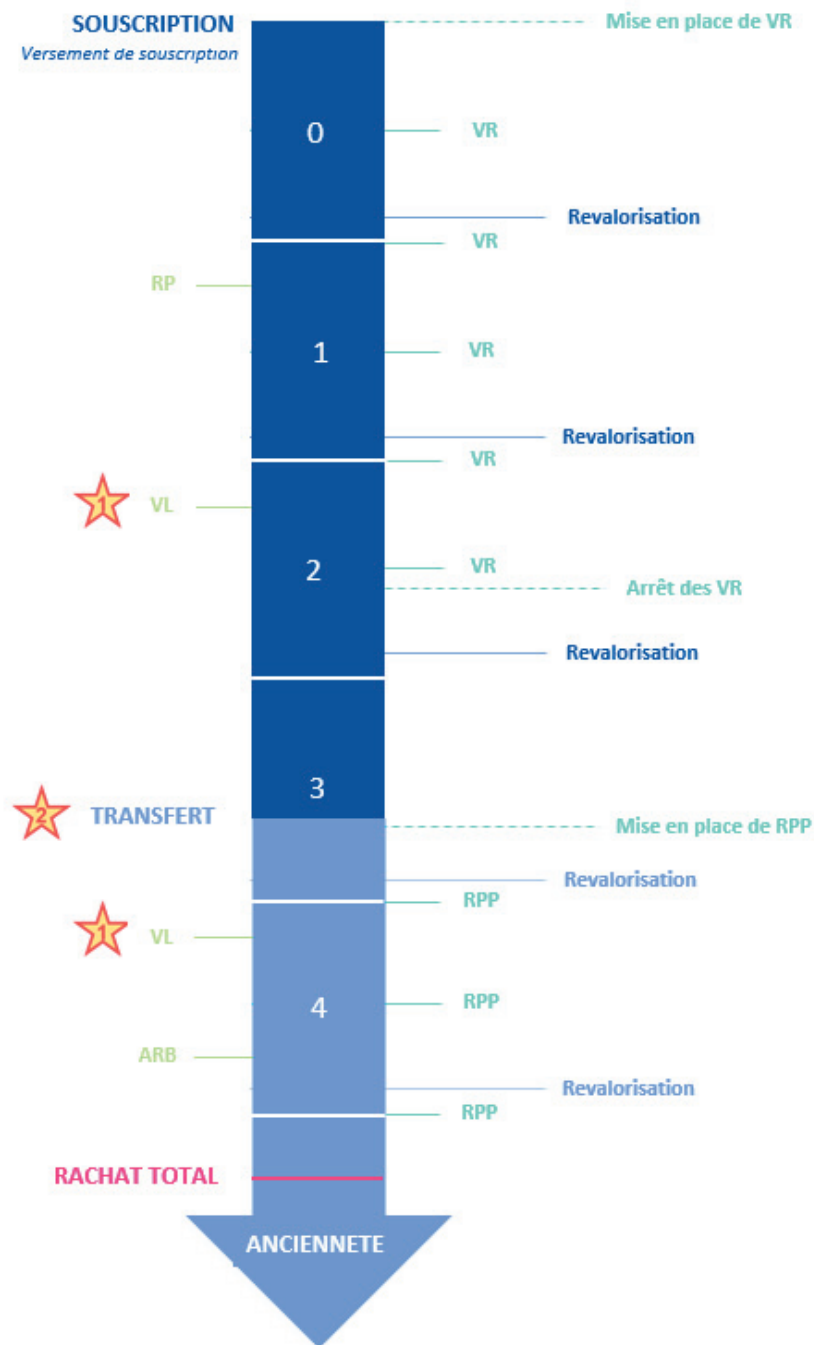
Transferts

Les transferts sont la possibilité pour un assuré de transformer son contrat d'origine pour un nouveau, potentiellement plus intéressant en terme d'investissement ou de frais, en conservant les avantages fiscaux du contrat d'origine mais potentiellement sous contrainte d'investir une partie au moins de l'épargne sur des unités de compte. Les transferts ne sont pas nécessairement définis dès la souscription du contrat : ils découlent de modifications législatives, typiquement amendement Fourgous ou loi PACTE présentés précédemment.

La littérature est très peu fournie concernant les transferts : si la notion de transférabilité a pu être étudiée dans le contexte très différent des contrats d'assurance dépendance (Beyou [2014]), si l'amendement Fourgous et la loi PACTE ont pu être étudiés à divers degrés (e.g. Briand [2019]; Malek [2020]; Stern [2019]), il n'existe pas, à notre connaissance d'étude comportementale poussée sur le sujet.

Récapitulatif

Le Graphique 6 récapitule, sous forme d'un exemple très simplifié, une grande partie des événements qui peuvent jaloner la vie d'un contrat d'assurance vie, de la souscription jusqu'au rachat total de la provision mathématique par exemple. Certains des événements ne dépendent pas directement d'une action de l'assuré : la réévaluation, les versements réguliers, les rachats partiels programmés et les arbitrages automatiques. En revanche, la mise en place des versements réguliers et des rachats programmés, de même que les arbitrages non automatiques, les rachats partiels non programmés ou encore les versements libres et le transfert sont des décisions directes de l'épargnant ; nous nous focalisons sur les deux derniers dans cette thèse.



GRAPHIQUE 6 – Exemple simplifié des évènements qui peuvent jaloner un contrat d'assurance vie.

Abréviations : VR = Versement Régulier, RPP = Rachat Partiel Programmé, RP = Rachat Partiel (non programmé), VL = Versement Libre, ARB = Arbitrage.

Gestion des risques biométriques en assurance vie

D'un point de vue assurantiel, les risques biométriques regroupent l'ensemble des risques financiers associés à des mécanismes biologiques : la longévité, l'incapacité / invalidité, la dépendance... Contrairement aux risques comportementaux issus de décisions directes de l'assuré, les risques biométriques découlent donc de phénomènes indépendants de sa volonté (même si certains comportements peuvent influencer sur les mécanismes sous-jacents, comme le fait de fumer par exemple) et posent donc un ensemble de problématiques bien distinctes. Dans cette thèse, nous nous intéressons en particulier au risque de longévité, qui peut être défini comme le risque financier associé au fait que les individus vivent en moyenne significativement plus longtemps qu'anticipé par l'assureur.

La durée de vie humaine est un phénomène étudié depuis de nombreuses années. L'un des indicateurs phares considéré lorsque l'on travaille sur ce sujet est l'espérance de vie, définie comme la durée de vie moyenne d'une génération fictive soumise aux conditions de mortalité de l'année considérée. Depuis le milieu du XVIII^{ème} siècle, son évolution est quasi linéaire en France, passant d'à peine 25 ans vers 1750 à plus de 75 ans début 2000 comme on le voit sur le Graphique 7. Les formidables progrès réalisés en science (vaccination contre la variole ouvrant la voie à la révolution pasteurienne) de même que l'amélioration des conditions de vie (espacement des famines et des épidémies, amélioration de l'hygiène) contribuent à cette évolution jusqu'au milieu du XVIII^{ème} siècle en diminuant notamment très fortement la mortalité infantile (33% vers 1740 à 3,5‰ en 2015), et ce malgré les guerres dont les impacts sont bien visibles, en particulier chez la population masculine. Depuis les années 1950, les améliorations sont principalement issues des progrès réalisés dans la lutte contre les maladies cardio-vasculaires impactant les tranches d'âge plus élevées. Notons qu'en France, c'est le travail de Vallin et Meslé [2001] qui a permis de reconstituer des tables de mortalité remontant jusqu'au milieu du XVIII^{ème} siècle.

Cette augmentation de l'espérance de vie trouve écho dans la majorité des pays développés et impose un double défi : à la fois sociétal puisqu'il ne s'agit pas seulement de vivre davantage mais surtout de rester le plus longtemps possible autonome et en bonne santé, et financier, puisque les systèmes de retraite sont confrontés à une population de retraités qui vit de plus en plus longtemps. Les enjeux sont colossaux : une année supplémentaire non anticipée d'espérance de vie à 65 ans représenterait ainsi



GRAPHIQUE 7 – Evolution de l'espérance de vie en France.

Source : INED

une hausse d'environ 5% des passifs des fonds de pension (Blake *et al.* [2018]; Michaelson et Mulholland [2014]). Pour ceux de l'Organisation de Coopération et de Développement Economique (OCDE), cela représenterait donc plus de 1 000 milliards d'euros. La compréhension des mécanismes et des anticipations qui sont faites, en partie par les actuaires, sont donc cruciales et influent directement sur les politiques menées. En France, c'est le Conseil d'Orientation des Retraites (COR) qui analyse les perspectives à moyen et long terme du système de retraites français et fournit donc des éléments de nature à nourrir le débat.

L'aspect réglementaire

Pour les assureurs, la prise en compte de la longévité dans les calculs actuariels s'effectue principalement à l'aide de tables de mortalité, souvent prospectives (Le Bras [2013]). Ces tables donnent, pour un âge x donné et une année calendaire t donnée (ou une génération donnée, moyennant une transformation simple de la table), le quotient de mortalité $q_{x,t}$ d'une population considérée, c'est-à-dire la probabilité de mourir à l'âge x lors de l'année t . Pour le provisionnement et la tarification des rentes en particulier, ils peuvent s'appuyer sur des tables réglementaires ou alors faire le choix de

calibrer leurs propres tables s'ils estiment que les tables réglementaires ne reflètent pas leur risque de longévité propre. Ils doivent dans ce cas faire certifier la table dite d'expérience par un actuaire certificateur, avec la contrainte que ladite table ne doit pas conduire à proposer un tarif inférieur à ce qui aurait été proposé en utilisant les tables réglementaires (article A132-18 du Code des Assurances).

Les tables réglementaires actuellement en vigueur pour les calculs liés aux rentes viagères sont les tables TGH05 pour la population masculine et TGF05 pour la population féminine, en remplacement de la TPG93. Ces tables ont été calibrées en 2005 sur un échantillon d'assurés via des méthodes prospectives de positionnement par rapport aux tables nationales produites par l'INSEE. Leur utilisation est imposée par l'arrêté du 01/08/2006 pour le provisionnement des rentes viagères (article A132-18 du Code des Assurances). On se référera à Planchet [2007] pour une explication détaillée de la méthodologie de construction des tables.

Les méthodologies de calibrage

Lorsque l'assureur juge préférable de calibrer ses propres tables de mortalité, il doit donc analyser et quantifier la mortalité de son portefeuille d'assurés. Cette analyse passe par la définition d'une variable aléatoire T dont on suppose qu'elle admet une densité, qui représente la durée de vie d'un individu, et qui est caractérisée par sa probabilité de survie à l'âge x :

$$S(x) = \mathbb{P}(T > x) = \exp\left(-\int_0^x \mu(y)dy\right), \quad (9)$$

où $\mu(x)$ est la force de mortalité à l'âge x , qui s'interprète comme la probabilité instantanée de décès à cet âge. Eu égard à l'évolution temporelle de la durée de vie au cours du temps, il est légitime de faire dépendre cette quantité du temps, ce qui implique la définition de $\mu(x, t)$, la force de mortalité à l'âge x au temps t . Cette fonction, continue, est cependant très difficilement estimable en pratique. De ce fait, une hypothèse simplificatrice est très souvent utilisée : pour tout âge entier x et toute année entière t et pour tout $0 \leq u, s < 1$, on suppose que $\mu(x + u, t + s) = \mu(x, t)$, c'est-à-dire que la force de mortalité est constante sur chaque âge entier et sur chaque année calendaire. L'idée est alors de travailler plutôt sur le taux central de mortalité à l'âge x pour l'année t ,

que l'on définit par $m(x, t) = \mu(x, t)$. Cette quantité peut être calculée par :

$$m(x, t) = m_{x,t} = \frac{D_{x,t}}{E_{x,t}}, \quad (10)$$

$D_{x,t}$ représentant le nombre de décès à l'âge x lors de l'année t et $E_{x,t}$ l'exposition à l'âge x lors de l'année t . Cette exposition correspond théoriquement à la durée de vie totale vécue lors de l'année t pour les individus d'âge x à leur dernier anniversaire, mais dans la pratique, des hypothèses sont nécessaires pour la calculer, même si elles ne sont pas nécessairement dénuées d'impact (Cairns *et al.* [2016]). Sous les hypothèses précédentes classiquement prises en actuariat, notons enfin que le taux central de mortalité est relié au quotient de mortalité $q_{x,t}$ via la formule :

$$q_{x,t} = 1 - \exp(-m_{x,t}). \quad (11)$$

Pour les actuaires, la question de l'analyse de la mortalité ne date pas d'hier puisqu'en 1860 déjà, Makeham [1860] propose son célèbre modèle, dans lequel il ajoute une composante A liée à la mortalité accidentelle au modèle proposé par Gompertz [1825] 35 ans plus tôt :

$$\ln(m_x) = A + Bc^x. \quad (12)$$

D'autres modèles ont également été proposés par la suite, plus ou moins paramétriques (e.g. Heligman et Pollard [1980]; Weibull [1951]) et si ces modèles restent très populaires de nos jours, en atteste leur présence dans les *guidelines* de mortalité de l'Institut des actuaires (voir la note de la Commission d'Agrément [2005]), ils ne sont pas les plus utilisés pour projeter l'évolution future de la mortalité. En effet, ils n'incluent pas de dimension temporelle, pourtant nécessaire pour capter l'évolution dans le temps du risque, et même si estimer les paramètres pour chaque année puis les projeter dans le futur via une série temporelle reste possible (Missov *et al.* [2015]), les actuaires privilégient l'utilisation de modèles plus récents et issus du modèle de référence en longévité (dans le sens où tous les modèles postérieurs se comparent à lui) proposé par Lee et Carter [1992] :

$$\ln(m_{x,t}) = \alpha_x + \beta_x \kappa_t + \epsilon_{x,t}. \quad (13)$$

Dans ce modèle, $\epsilon_{x,t}$ correspond à un bruit blanc. Ce modèle tel quel pose des problèmes d'identifiabilité puisque si les séries α_x , β_x et κ_t sont solutions, alors pour

toute constante c non nulle les séries définies par

$$\begin{cases} \alpha_x - c \times \beta_x, \\ \beta_x, \\ \kappa_t + c, \end{cases} \quad (14)$$

sont également solutions du modèle. Pour résoudre ces problèmes d'identifiabilité, les contraintes suivantes sont donc imposées :

$$\begin{cases} \sum_t \kappa_t = 0, \\ \sum_x \beta_x = 1. \end{cases} \quad (15)$$

Cela permet de donner une interprétation aux paramètres du modèle : ainsi définis, la série α_x représente le niveau moyen de mortalité à chaque âge x , la série κ_t représente l'évolution temporelle de la mortalité au cours du temps et la série β_x la sensibilité de la mortalité à chaque âge par rapport à κ_t . Le modèle de Lee-Carter a été le modèle de base de nombreux modèles qui se proposent de l'étendre en incluant un effet cohorte (e.g. Currie [2006]; Renshaw et Haberman [2006]) par exemple, en cherchant à s'affranchir de ses limites, en particulier l'hétéroscédasticité des résidus (e.g. Alho [2000]; Brouhns *et al.* [2002]), ou en généralisant le modèle dans un cadre multi-population (e.g. Enchev *et al.* [2016]; Li et Lee [2005]; Villegas *et al.* [2017]).

En pratique, les volumes de données et / ou l'historique sont cependant souvent insuffisants pour l'utilisation de telles méthodes, et l'assureur a recours à des méthodologies de positionnement plus ou moins sophistiquées, en témoigne la note rédigée par l'Institut des actuaires à ce sujet (voir Planchet et Tomas). L'approche la plus simple possible consiste à calculer un coefficient de réduction ou de majoration aux quotients de mortalité d'une table de référence :

$$q_{x,t} = SMR \times q_{x,t}^{\text{référence}}, \quad (16)$$

où $q_{x,t}^{\text{référence}}$ représente le quotient de mortalité à l'âge x durant l'année t d'une table de référence (par exemple calibrée sur la population nationale) et SMR est le *Standardised Mortality Ratio* de Liddell [1984].

Des lissages non paramétriques, de type Whittaker-Henderson (Whittaker [1922]), peuvent également parfois être appliqués sur les quotients bruts de mortalité, même si

cette pratique est peu répandue pour le calibrage de tables prospectives de mortalité.

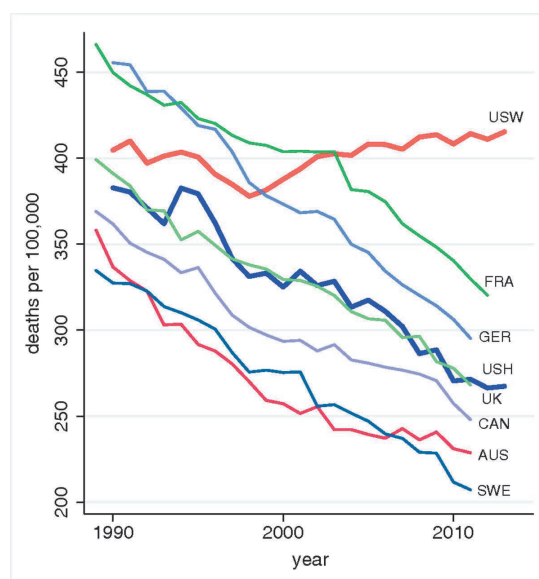
La fermeture des tables de mortalité est également une problématique complexe pour les assureurs. En effet, les volumes de données concernant les assurés centenaires sont faibles et ne permettent pas de calibrer des taux de mortalité aux âges élevés avec un niveau de certitude statistique suffisant. Dès lors, la question d'un éventuel âge limite et de la modélisation de la mortalité jusqu'à cet âge se pose. De nombreux auteurs ont travaillé sur le sujet et ont proposé des méthodes variées de fermeture de table (Coale et Kisker [1990]; Denuit et Goderniaux [2005] par exemple). Quashie et Denuit [2005] présentent un panorama assez vaste des modèles de fermeture de tables développés et mesurent l'impact du choix méthodologique sur la tarification des rentes viagères.

Les limites des tables prospectives

Les tables prospectives, bien que très utilisées, ne sont pas dénuées de limites. Elles sont construites sur des modèles qui, pour la grande majorité, se contentent d'extrapoler le passé pour en déduire le futur, sans considérer les mécanismes sous-jacents, ce qui a poussé certains auteurs (comme Guterman et Vanderhoof [1998]) à s'interroger sur l'utilisation de ces modèles.

Certains auteurs ont d'ailleurs pu mettre en évidence des comportements individuels susceptibles d'altérer l'augmentation de l'espérance de vie dans le futur. Olshansky *et al.* [2005] considèrent que cette augmentation devrait bientôt prendre fin, sur la base de leurs observations concernant l'analyse de l'obésité aux Etats-Unis. Case et Deaton [2015, 2017] ont mis en évidence, de leur côté, ce qu'ils appellent les « *deaths of despair* » chez les Américains non-Hispaniques blancs de 45-54 ans, c'est-à-dire le surplus de décès liés à l'abus de drogues et d'alcool et aux suicides, visible sur la Figure 8 où la courbe en rouge représente le taux de mortalité pour les Américains non-Hispaniques blancs de 45-54 ans.

A ces comportements individuels s'ajoutent des facteurs de risque sociétaux, dont l'épidémie de SIDA est l'exemple récent le plus marquant, ou environnementaux. Si l'épidémie de SIDA est aujourd'hui jugulée à défaut d'être vaincue (en France tout du moins, ce n'est pas le cas partout dans le monde), l'apparition de nouvelles épidémies, pourrait, en l'absence de réponse médicale immédiate, venir impacter durablement la mortalité d'une population donnée. De façon générale, la modélisation et la gestion du risque de pandémie fait l'objet de nombreux travaux (Carrat *et al.*



GRAPHIQUE 8 – Taux de mortalité pour quelques pays.

Source : Case et Deaton [2015]

[2006]; Habart Corlosquet *et al.* [2012]; Kermack et McKendrick [1927]). D'un point de vue environnemental, les activités de l'Homme peuvent également avoir des conséquences sur sa santé et, par extension, sa durée de vie. Les impacts de l'utilisation dans le passé de l'amiante, matériau hautement toxique, sont ainsi toujours bien visibles à l'heure actuelle, plus de 20 ans après son interdiction en France. En particulier, aujourd'hui, ce sont les effets de la pollution qui inquiètent les chercheurs (Brunekreef *et al.* [2009]; Sanyal *et al.* [2018] pour quelques exemples). Par ailleurs, la multiplicité des événements extrêmes liés au changement climatique, telle que la canicule de 2003 en France, ou des événements géologiques, type séisme / tsunami, sont également susceptibles d'altérer la tendance de longévité observée pour le moment. A ce tableau déjà bien noirci, il convient enfin d'ajouter les guerres et le terrorisme, dont les impacts, bien qu'a priori plus limités dans le temps, pourraient avoir des effets visibles et durables, notamment en cas d'utilisation d'armes nucléaires ou bactériologiques.

Outre les aspects évoqués ci-dessus, la question d'un éventuel âge limite se pose. Si un tel âge existe, si la durée de vie humaine ne peut excéder un âge biologique donné, alors l'espérance de vie finira nécessairement, dans le meilleur des cas, par atteindre une asymptote verticale. Hayflick [1965] a mis en évidence la limite (en termes de division cellulaire), qui porte depuis son nom, au-delà de laquelle une cellule normale cesse de se diviser et meurt. Ce mécanisme de division cellulaire peut donc être vu

comme un vieillissement au niveau cellulaire et semblerait aller dans le sens d'un âge biologique maximum, mais l'existence de « cellules immortelles » (cellules HeLa), qui se divisent indéfiniment, pourrait remettre en cause cette assertion. Chez les démographes, le débat est ouvert et loin d'aboutir à un consensus. Pour certains, une telle limite existe (Dong *et al.* [2016]; Gavrilova et Gavrilov [2019]) qui serait située autour de 125 ans, alors que d'autres réfutent son existence et certains travaux indiquent que le taux de mortalité après 110 ans serait situé autour de 50% indépendamment du sexe (Gampe [2010]; Robine et Vaupel [2001]). Si Jeanne Calment reste aujourd'hui officiellement l'être humain ayant vécu le plus longtemps avec une longévité de 122 ans, ce serait ainsi plus dû au faible nombre de supercentenaires à l'heure actuelle qu'à une limite biologique humaine. Si la question de l'âge limite est ainsi loin d'être tranchée à ce jour, l'utilisation des avancées technologiques actuelles et à venir dans la lutte contre le vieillissement est susceptible de complexifier encore les travaux autour de la longévité; cette utilisation est portée notamment par un courant de pensée, le transhumanisme.

Le transhumanisme peut se définir comme « une approche interdisciplinaire qui nous amène à comprendre et à évaluer les avenues qui nous permettront de surmonter nos limites biologiques par des progrès technologiques »⁴ : une des visées du mouvement porte donc naturellement sur un accroissement considérable de la durée de vie. C'est une hypothèse extrême, peu voire pas considérée par les actuaires, à laquelle nous avons donc cherché à apporter un éclairage sous le prisme de la gestion des risques.

Principaux outils mathématiques utilisés

Dans cette partie, nous explicitons les principaux outils mathématiques utilisés dans cette thèse. Les Chapitres 1 et 2, traitant des problématiques comportementales, s'appuient principalement sur des méthodes d'apprentissage automatique.

Algorithmes de *machine learning* utilisés

Régression logistique

La régression logistique, ou modèle logit, est un modèle de régression binomiale qui constitue un cas particulier de modèle linéaire généralisé.

4. Définition de Nick Bostrom, <https://iatranshumanisme.com>

On dispose d'un échantillon d'entraînement de taille N , $\{y_i, \mathbf{x}_i\}_{i=1}^N$, où les y_i sont les réalisations de variables aléatoires indépendantes qui suivent chacune une loi de Bernoulli de paramètres $\pi_i \in]0, 1[$ (ils prennent donc leurs valeurs dans $\{0, 1\}$) et les $\mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^n$ sont les n variables explicatives. L'idée de la régression logistique consiste, plutôt que de travailler sur les y_i non continus, à se concentrer sur les π_i sur lesquels on effectue une régression linéaire après transformation par une fonction monotone g opérant de $]0, 1[$ dans $\mathbb{R}$. On pose donc :

$$g(\pi_i) = \mathbf{x}_i' \beta, \quad (17)$$

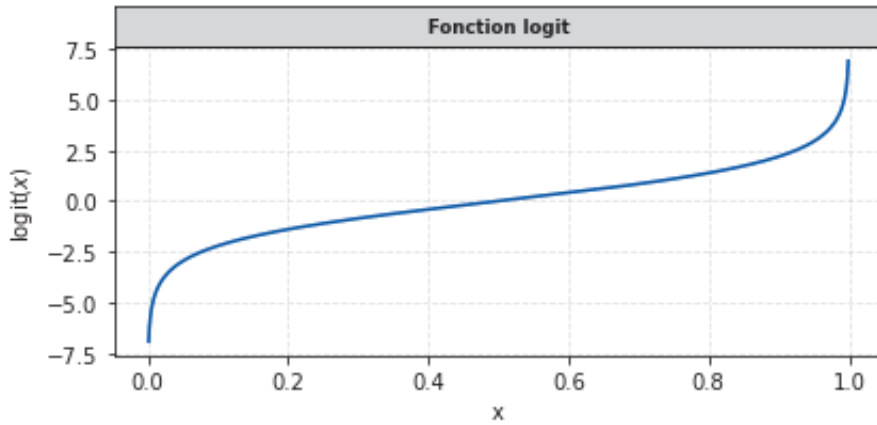
les β étant les paramètres de la régression à estimer. Dans le cas de la régression logistique, la fonction g en question est la fonction logit représentée par le Graphique 9 et définie par

$$g(\pi) = \text{logit}(\pi) = \ln\left(\frac{\pi}{1-\pi}\right); \quad (18)$$

sa fonction inverse étant la fonction sigmoïde définie par

$$g^{-1}(\pi) = \frac{\exp(\pi)}{1 + \exp(\pi)}. \quad (19)$$

Les paramètres optimaux β sont obtenus en maximisant la fonction de vraisemblance



GRAPHIQUE 9 – Fonction logit.

définie par

$$L(\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_N; \beta) = \prod_{i=1}^N \pi_i^{y_i} (1 - \pi_i)^{1-y_i}, \quad (20)$$

avec $\pi_i = g^{-1}(\mathbf{x}_i' \beta)$, ou plus généralement sa version logarithmique, la log-vraisemblance,

plus simple à maximiser

$$l(\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_N; \beta) = \sum_{i=1}^N y_i \log(\pi_i) + (1 - y_i) \log(1 - \pi_i). \quad (21)$$

Gradient Boosted Regression Trees

L'idée générale de cet algorithme de *machine learning*, proposé par Friedman [2001], est d'assembler un grand nombre d'estimateurs avec de faibles performances, appelés apprenants faibles, pour créer un estimateur beaucoup plus précis appelé apprenant fort. La présentation qui suit est tirée de Friedman [2002].

Concrètement, on souhaite prédire une variable réponse y à partir de variables explicatives $\mathbf{x} = \{x_1, \dots, x_n\}$. Etant donné un échantillon d'entraînement $\{y_i, \mathbf{x}_i\}_1^N$ de ces valeurs, l'objectif est de trouver une fonction $F^*(\mathbf{x})$ qui à $\mathbf{x}$ associe y de sorte à minimiser une fonction de perte spécifiée $\Psi(y, F(\mathbf{x}))$ pour tout couple $(y, \mathbf{x})$, conformément au principe de minimisation du risque empirique :

$$F^*(x) = \arg \min_{F(\mathbf{x})} \mathbb{E}_{y, \mathbf{x}}(\Psi(y, F(\mathbf{x}))). \quad (22)$$

Le *boosting* consiste à approximer $F^*(x)$ sous forme d'un développement additif de la forme :

$$F(x) = \sum_{m=0}^M \beta_m h(\mathbf{x}; \mathbf{a}_m), \quad (23)$$

où les fonctions $h(\mathbf{x}; \mathbf{a})$ sont les apprenants faibles, généralement choisis comme simples fonctions de $\mathbf{x}$ avec pour paramètres $\mathbf{a} = \{a_1, \dots, a_M\}$. Les coefficients de dilatation $\{\beta_m\}_0^M$ et les paramètres $\{\mathbf{a}_m\}_0^M$ sont ajustés conjointement par itérations successives grâce aux données d'entraînement, en initiant une fonction constante $F_0(\mathbf{x})$ puis en trouvant, pour $m = 1, 2, \dots, M$

$$(\beta_m, \mathbf{a}_m) = \arg \min_{\beta, \mathbf{a}} \sum_{i=1}^N \Psi(y_i, F_{m-1}(\mathbf{x}_i) + \beta h(\mathbf{x}_i; \mathbf{a})), \quad (24)$$

et

$$F_m(\mathbf{x}) = F_{m-1}(\mathbf{x}) + \beta_m h(\mathbf{x}; \mathbf{a}_m). \quad (25)$$

L'algorithme *Gradient Boosting* résout (24) via une procédure en deux étapes :

1. Ajustement de la fonction $h(\mathbf{x}; \mathbf{a})$ par moindres carrés :

$$\mathbf{a}_m = \arg \min_{\mathbf{a}, \rho} \sum_{i=1}^N [\tilde{y}_{im} - \rho h(\mathbf{x}_i; \mathbf{a})]^2, \quad (26)$$

où $\tilde{y}_{im}$ est la dérivée de la fonction de perte par rapport à sa seconde variable

$$\tilde{y}_{im} = - \left[\frac{\partial \Psi(y_i, F(\mathbf{x}_i))}{\partial F(\mathbf{x}_i)} \right]_{F(\mathbf{x})=F_{m-1}(\mathbf{x})}. \quad (27)$$

2. Détermination de la valeur optimale pour le coefficient β_m :

$$\beta_m = \arg \min_{\beta} \sum_{i=1}^N \Psi(y_i, F_{m-1}(\mathbf{x}_i + \beta h(\mathbf{x}_i; \mathbf{a}_m))) \quad (28)$$

Cette stratégie remplace un problème d'optimisation complexe (24) en un problème d'optimisation par moindres carrés (26) suivi d'un problème d'optimisation à un seul paramètre (28) basé sur la fonction de perte spécifiée Ψ .

L'algorithme *Gradient Tree Boosting* est un cas particulier pour lequel l'apprenant faible $h(\mathbf{x}; \mathbf{a})$ est un arbre de décision à L nœuds terminaux. A chaque itération m , un arbre de régression sépare l'espace des variables explicatives $\mathbf{x}$ en L régions disjointes $\{R_{lm}\}_1^L$ et prédit une valeur constante pour chaque région

$$h(\mathbf{x}; \{R_{lm}\}_1^L) = \sum_{l=1}^L \tilde{y}_{lm} \mathbb{1}_{\mathbf{x} \in R_{lm}}, \quad (29)$$

où $\tilde{y}_{lm} = \text{mean}_{\mathbf{x}_i \in R_{lm}}(\tilde{y}_{im})$ est la moyenne de (27) pour chaque région R_{lm} . Puisque l'arbre (29) prédit une valeur constante, on peut réduire (28) à

$$\gamma_{lm} = \arg \min_{\gamma} \sum_{\mathbf{x}_i \in R_{lm}} \Psi(y_i, F_{m-1}(\mathbf{x}_i) + \gamma). \quad (30)$$

L'approximation $F_{m-1}(\mathbf{x})$ est ensuite mise à jour séparément dans chaque région correspondante

$$F_m(\mathbf{x}) = F_{m-1}(\mathbf{x}) + \nu \gamma_{lm} \mathbb{1}_{\mathbf{x} \in R_{lm}}, \quad (31)$$

où $0 < \nu \leq 1$ est un paramètre de rétrécissement qui contrôle le taux d'apprentissage de la procédure. De façon empirique, Friedman [2001] montre qu'un paramètre faible

de ν permet une meilleure généralisation du modèle.

L'algorithme formalisé sous forme de pseudo-code est donné dans le Graphique 10. Notons que Chen et Guestrin [2016] ont récemment proposé une version améliorée, le *eXtreme Gradient Boosting* ou XGBoost.

	Algorithm 1: Gradient_TreeBoost
1	$F_0(\mathbf{x}) = \arg \min_{\gamma} \sum_{i=1}^N \Psi(y_i, \gamma)$
2	For $m = 1$ to M do:
3	$\tilde{y}_{im} = - \left[\frac{\partial \Psi(y_i, F_{m-1}(\mathbf{x}_i))}{\partial F(\mathbf{x}_i)} \right]_{F(\mathbf{x})=F_{m-1}(\mathbf{x})}, i = 1, N$
4	$\{R_{lm}\}_1^L = L - \text{terminal node } tree(\{\tilde{y}_{im}, \mathbf{x}_i\}_1^N)$
5	$\gamma_{lm} = \arg \min_{\gamma} \sum_{\mathbf{x}_i \in R_{lm}} \Psi(y_i, F_{m-1}(\mathbf{x}_i) + \gamma)$
6	$F_m(\mathbf{x}) = F_{m-1}(\mathbf{x}) + \nu \cdot \gamma_{lm} 1(\mathbf{x} \in R_{lm})$
7	endFor

GRAPHIQUE 10 – Algorithme de Gradient Boosting.

Source : Friedman [2002]

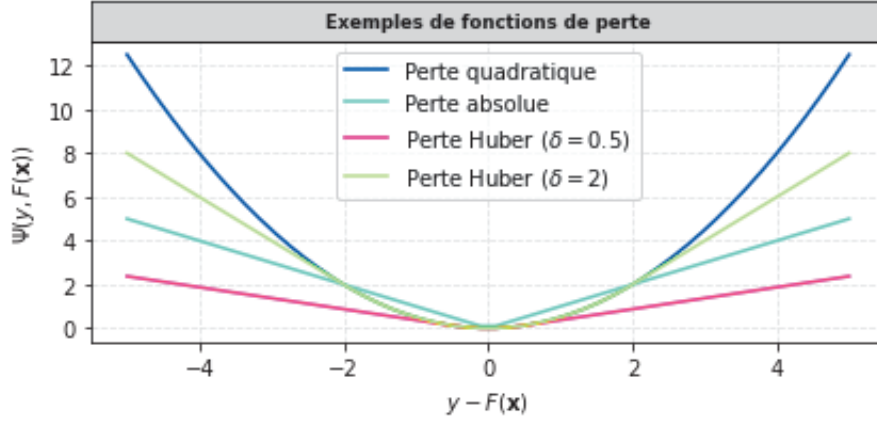
Différentes fonctions de perte Ψ peuvent être utilisées. Dans la pratique, pour les problèmes de régression, on considère souvent l'une des trois fonctions définies ci-après :

1. Fonction de perte quadratique : $\Psi(y, F(\mathbf{x})) = \frac{1}{2}(y - F(\mathbf{x}))^2$.
2. Fonction de perte valeur absolue : $\Psi(y, F(\mathbf{x})) = |y - F(\mathbf{x})|$.
3. Fonction de perte Huber : $\Psi(y, F(\mathbf{x})) = \begin{cases} \frac{1}{2}(y - F(\mathbf{x}))^2 & \text{si } |y - F(\mathbf{x})| \leq \delta \\ \delta|y - F(\mathbf{x})| - \frac{1}{2}\delta^2 & \text{sinon.} \end{cases}$

Le Graphique 11 représente les trois fonctions décrites. La fonction de perte quadratique est couramment utilisée mais elle est sensible aux valeurs aberrantes (la valeur de la fonction est élevée si $y - F(\mathbf{x})$ est élevé, ce qui est le cas si y est une valeur aberrante), ce qui amène parfois à choisir la fonction de perte absolue ou la fonction Huber, qui via l'ajout d'un métaparamètre δ , permet de gérer cette problématique.

Modèle explicatif SHAP

La problématique de la plupart des algorithmes de *machine learning* réside dans l'opacité de la prédiction : on parle très souvent de « boîte noire » parce qu'il est très diffi-



GRAPHIQUE 11 – Principales fonctions de perte.

cile d'expliquer pour quelle raison l'algorithme classe dans telle ou telle catégorie, ou pourquoi la valeur prédite atteint tel niveau. Or la gestion des risques en assurance passe au moins autant par la compréhension du phénomène que par la prédiction de l'algorithme. D'un point de vue législatif, le nouveau Règlement Général sur la Protection des Données (RGPD) prévoit d'ailleurs des règles pour éviter que des décisions soient prises uniquement par des machines sans compréhension humaine. Cet écueil a donc été pris à bras le corps par de nombreux *data scientists* et des algorithmes et méthodologies ont été proposés pour l'éviter. La présentation qui suit s'inspire de Lundberg et Lee [2017].

L'idée de base est de créer un modèle d'explication qui soit une version simplifiée du modèle d'origine : notons f le modèle de prédiction d'origine et g le modèle explicatif. On considère en particulier des méthodes locales, définies de sorte à expliquer une prédiction $f(x)$ à partir d'une donnée en entrée x . Les modèles explicatifs utilisent souvent des données d'entrée simplifiées x' reliées aux données d'entrée via une fonction de *mapping* $x = h_x(x')$. Les méthodes locales essaient de garantir que $g(z') = f(h_x(z'))$ dès lors que $z' \approx x'$. Les méthodes d'attribution dites « additives » (*additive feature attribution methods*) ont un modèle explicatif qui est une fonction linéaire de variables binaires :

$$g(z') = \phi_0 + \sum_{i=1}^M \phi_i z'_i, \quad (32)$$

où $z' \in \{0, 1\}^M$ (les z'_i représentent typiquement le fait que la variable considérée soit observée ou inconnue), M étant le nombre de données d'entrée simplifiées, et $\phi_i \in \mathbb{R}$.

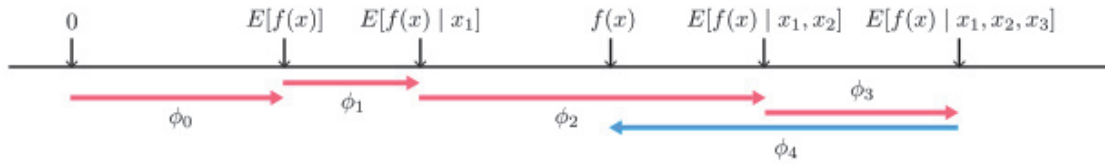
Ainsi, les méthodes additives attribuent un effet ϕ_i à chaque variable explicative, et le modèle d'origine $f(x)$ est approximé en sommant les contributions de chaque effet.

Si plusieurs méthodes ont été proposées pour calculer les ϕ_i (voir e.g. Ribeiro *et al.* [2016]), dans cette thèse nous utilisons en particulier le cadre proposé par Lundberg *et al.* [2018], appelé SHAP (pour SHapley Additive exPlanation).

Le principe général de SHAP est issu de la théorie des jeux : il s'agit de calculer la valeur de Shapley pour chacune des variables à chaque exemple du dataset. Pour calculer cette valeur, on définit $f_x(S) = f(h_x(z')) = \mathbb{E}(f(x)|x_S)$ où S est le sous-ensemble des z' non nuls et $\mathbb{E}(f(x)|x_S)$ est l'espérance du modèle f en conditionnant sur un sous-ensemble S de toutes les variables explicatives. L'expression de la valeur Shapley ϕ_i pour la variable X_i est alors donnée par

$$\phi_i = \sum_{S \subseteq N \setminus \{i\}} \frac{|S|!(M - |S| - 1)!}{M!} [f_x(S \cup \{i\}) - f_x(S)], \quad (33)$$

où N est l'ensemble de toutes les variables. Le Graphique 12 décrit le processus.



GRAPHIQUE 12 – Cadre SHAP pour l'explicabilité des modèles de *machine learning*.

Source : Lundberg et Lee [2017] or Lundberg *et al.* [2018].

La théorie des jeux fournit des éléments prouvant que cette approche est la seule consistante, c'est-à-dire qu'elle permet de s'assurer que si le modèle est modifié de telle sorte qu'il s'appuie davantage sur une donnée d'entrée, alors l'importance accordée à cette donnée ne décroît pas.

Principales contributions

En conclusion de cette introduction générale, nous présentons les principales contributions de cette thèse qui seront ensuite développées dans les Chapitres 1 à 3.

Chapitre 1 : Éléments d'analyse des versements libres à l'aide de *machine learning*

Ce Chapitre est tiré de l'article "*Understanding and managing free payments with a machine learning approach*". Il s'intéresse aux versements libres sur les contrats d'épargne.

Après une partie introductive suivie d'une présentation des données sur lesquelles se base l'étude, à savoir un ensemble de produits d'assurance vie commercialisés en France par différents partenaires, nous proposons une première approche basée sur les séries temporelles. Nous nous intéressons en effet au montant global de versements libres effectués par les assurés pour chacun des produits considérés ; pour chaque produit, nous appliquons un modèle de type SARIMA. En analysant deux produits en particulier, nous montrons que si cette approche donne des résultats satisfaisants dans certains cas, elle ne permet pas d'anticiper des changements brutaux dans les séries.

Pour remédier aux inconvénients des séries temporelles, nous proposons d'utiliser une méthodologie basée sur le *machine learning* : en particulier, nous nous focalisons sur l'algorithme du *Gradient Boosting*. En incluant des variables exogènes telles que les périodes de campagnes commerciales ou le nombre de souscriptions par exemple, nous montrons que le modèle ainsi construit donne de meilleures projections que les séries temporelles. La métrique utilisée pour la comparaisons des deux méthodologies est le *Root Mean Square Log Error* (RMSLE).

Nous analysons ensuite le modèle en nous appuyant sur le cadre proposé par l'approche SHAP (SHapley Additive exPlanations) et mettons en exergue certains points cohérents avec l'intuition métier, par exemple le fait que le campagnes commerciales jouent à la hausse, ou encore qu'un seuil de versement minimum élevé joue à la baisse sur la prédiction. Nous approfondissons notre analyse à un niveau plus micro, en détaillant le comportement lié aux versements libres au regard d'autres comportements tels que le rachat ou l'arbitrage par exemple, et mettons en avant quelques éléments susceptibles d'éclairer la problématique comportementale.

Chapitre 2 : Evolution réglementaire et modélisation des transferts

Ce Chapitre est tiré de l'article « Evolution réglementaire et modélisation des transferts », co-écrit avec Josselin Kalifa, Stéphane Loisel et Anani Olympio. Il aborde la notion de transferts dans les contrats d'assurance vie, en s'intéressant en particulier à

ceux rendus possibles par l'amendement Fourgous il y a plusieurs années, et par la loi PACTE plus récemment.

Dans une première partie, nous présentons les deux législations et ce qu'elles autorisent en termes de transferts pour mettre en évidence leurs principaux points communs et leurs différences majeures. Dans un deuxième temps, nous analysons les enseignements à tirer de l'amendement Fourgous sur deux portefeuilles différents gérés par une compagnie d'assurance française. Nous mettons particulièrement en évidence les structures particulières des taux de transferts selon différentes variables telles que l'âge, l'ancienneté ou la provision mathématique.

À la suite de cette analyse, nous proposons une modélisation prospective des transferts : en nous plaçant au début la mise en place de l'amendement et en considérant un pas de temps trimestriel, nous proposons une méthode qui cible les individus susceptibles d'effectuer un transfert dans les périodes à venir. Nous utilisons pour cela la régression logistique qui inclut une dimension structurelle et une autre dite « conjoncturelle », qui varie pour chaque période. Cette modélisation donne des résultats satisfaisants sur la base de test considérée.

Nous discutons ensuite de cette approche et appliquons le modèle calibré avec les transferts Fourgous sur des portefeuilles concernés par la loi PACTE dont nous tirons de premiers éléments d'analyse, pour observer dans quelle mesure il s'adapte bien à ce type de transferts. Nous observons alors des résultats différents pour chacun des portefeuilles, ce qui semble mettre en évidence l'hétérogénéité des comportements face aux transferts. Enfin, nous discutons de l'évolution réglementaire, en dressant en particulier un parallèle avec l'assurance emprunteur.

Chapitre 3 : Hypothèses extrêmes en longévité : le cas du transhumanisme

Ce Chapitre est tiré de l'article "*Longevity and extreme assumptions: some insights on transhumanism*" , co-écrit avec Anne Eyraud-Loisel et Anani Olympio. Il s'intéresse à l'hypothèse transhumaniste concernant la longévité : l'objectif n'est pas de se positionner pour ou contre ni de discuter des aspects éthiques qu'elle induit, mais plutôt de discuter de ses tenants et aboutissants dans un objectif d'exhaustivité.

Dans une première partie, nous dressons un état des lieux des connaissances et déve-

loppements actuels dans le domaine de la longévité. Comme explicité précédemment dans cette introduction, nous mettons en particulier en évidence l'absence de consensus concernant l'évolution future de la longévité et proposons alors d'étudier une troisième hypothèse, encore peu considérée à ce jour (du moins en démographie et en actuariat), qui anticipe une amélioration exceptionnelle de la longévité dans les années à venir, grâce à l'apport de la science notamment. En interrogeant un panel d'actuaire experts ERM CERA français, nous avons pu mettre en évidence que, loin d'attribuer une crédibilité nulle à l'hypothèse transhumaniste, ils semblent au contraire la prendre en considération, ainsi que mis en évidence dans le Tableau 3.

TABLEAU 3 – Crédibilité donnée à l'hypothèse transhumaniste.

Min	Max	Moyenne	Médiane	Écart-type
0.00%	80.00%	10.91%	2.50%	17.04%

Après avoir détaillé les données utilisées dans une deuxième partie, nous détaillons ensuite l'hypothèse, à ce jour très qualitative (et souvent reliée à l'assertion « l'homme qui vivra 1 000 ans est né »), par le biais de quelques simulations. En particulier, nous analysons les gains en mortalité observés aujourd'hui, et montrons qu'en les poursuivant dans le futur, ils sont cohérents avec l'hypothèse telle que précisée par de Grey [2004]. Nous discutons aussi de l'hypothèse des « cures de jouvence », qui permettraient de créer un décalage entre l'âge biologique et l'âge réel via des techniques médicales jouant sur les télomères par exemple.

La dernière partie discute de la manière dont cette hypothèse pourrait être prise en compte, sachant que ses effets purement statistiques ne se verraient pas avant plusieurs années ; cela démontre l'importance de l'inter-disciplinarité dans l'analyse et la compréhension de la longévité.

Bibliographie

- ACPR : Orientations Nationales Complémentaires aux Spécifications Techniques pour l'exercice 2013 de préparation à Solvabilité II. 2013.
- J. M. Alho : “The Lee-Carter Method for Forecasting Mortality, with Various Extensions and Applications”, Ronald Lee, January 2000. *North American Actuarial Journal*, 4(1):91–93, 2000.
- B. Amrani : L'arbitrage dans les contrats d'épargne multi-support, 2013. Mémoire d'actuaire, CNAM.
- K. Assaraf : Modélisation de versements libres sous IFRS 17 par des méthodes de machine learning. Mémoire de D.E.A., Université Paris Dauphine, 2020.
- A. R. Bacinello : Endogenous model of surrender conditions in equity-linked life insurance. *Insurance : Mathematics and Economics*, 37(2):270–296, 2005.
- A. R. Bacinello, E. Biffis et P. Millossovich : Pricing life insurance contracts with early exercise features. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 233(1):27–35, 2009. ISSN 0377-0427. Risk Measures and Solvency.
- F. Z. Benabdelkrim : Modélisation des versements libres en assurance-vie : utilisation de méthodes de scoring. Mémoire de D.E.A., ISUP, 2017.
- O. Berrada : Modélisation des arbitrages dynamiques par approche machine learning et étude du comportement client sur un portefeuille d'épargne. Mémoire de D.E.A., Université Paris Dauphine, 2017.
- M. Beyou : La transférabilité dans les constats d'assurance dépendance. Mémoire de D.E.A., CNAM, 2014.
- D. Blake, A. J. G. Cairns, K. Dowd et A. R. Kessler : Still living with mortality : the longevity risk transfer market after one decade. *British Actuarial Journal*, 24, 2018. ISSN 1357-3217, 2044-0456.
- C. Briand : Fonds euro-croissance : perspectives offertes par la loi PACTE au marché de l'assurance-épargne. Mémoire de D.E.A., ENSAE, 2019.

- T. Brion : Modèles d'arbitrages dynamiques : Valorisation d'une option d'arbitrage dans le cadre de la Market Consistent Embedded Value, 2009. Mémoire d'actuaire, EURIA.
- N. Brouhns, M. Denuit et J. Vermunt : A Poisson Log-Bilinear Regression Approach to the Construction of Projected Life Tables. *Insurance : Mathematics and Economics*, 31:373–393, 12 2002.
- B. Brunekreef, R. Beelen, G. Hoek, L. Schouten, S. Bausch-Goldbohm, P. Fischer, B. Armstrong, E. Hughes, M. Jerrett et P. Brandt : Effects of long-term exposure to traffic-related air pollution on respiratory and cardiovascular mortality in The Netherlands : The NLCS-AIR study. *Research report (Health Effects Institute)*, 139:5–71 ; discussion 73, 03 2009.
- A. J. G. Cairns, D. Blake, K. Dowd et A. R. Kessler : Phantoms never die : living with unreliable population data. *Journal of the Royal Statistical Society : Series A (Statistics in Society)*, 179(4):975–1005, 2016.
- F. Carrat, J. Luong, H. Lao, A.-V. Sallé, C. Lajaunie et H. Wackernagel : A 'small-world-like' model for comparing interventions aimed at preventing and controlling influenza pandemics. *BMC medicine*, 4:26, 02 2006.
- A. Case et A. Deaton : Rising morbidity and mortality in midlife among white non-Hispanic Americans in the 21st century. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(49):15078–15083, 2015. ISSN 0027-8424.
- A. Case et A. Deaton : Mortality and Morbidity in the 21st Century. *Brookings Papers on Economic Activity, Spring 2017*, 2017.
- T. Chen et C. Guestrin : XGBoost : A Scalable Tree Boosting System. *In Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, KDD '16, page 785–794, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery. ISBN 9781450342322.
- A. Coale et E.E Kisker : Defects in data on old age mortality in the United States : New procedures for calculating approximatively accurate mortality schedules and life tables at the highest ages. *Asian and Pacific Population Forum*, (4):1–31, 1990.
- Commission d'Agrément : Guideline mortalité. Rapport technique, Institut des actuaires, 2005.

- M. Costabile, I. Massabó et E. Russo : A binomial model for valuing equity-linked policies embedding surrender options. *Insurance : Mathematics and Economics*, 42 (3):873–886, 06 2008.
- S. H. Cox et Y. Lin : Annuity Lapse Rate Modeling : Tobit or not Tobit ? 2006.
- J. D. Cummins : *An econometric model of the life insurance sector of the U.S. economy*. Lexington Books, 1975.
- I. D. Currie : Smoothing and forecasting mortality rates with P-splines, 06 2006.
- D. De Giovanni : Lapse Rate Modeling : A Rational Expectation Approach. Finance Research Group Working Papers F-2007-03, University of Aarhus, Aarhus School of Business, Department of Business Studies, 2007.
- A. de Grey : Escape Velocity : Why the Prospect of Extreme Human Life Extension Matters Now. *PLoS Biology*, 2, 06 2004.
- M. Denuit et A.-C. Goderniaux : Closing and projecting lifetables using log-linear models. *Bulletin of the Swiss Association of Actuaries*, pages 29–49, 2005.
- X. Dong, B. Milholland et J. Vijg : Evidence for a limit to human lifespan. *Nature*, 538:257–259, 10 2016.
- V. Enchev, T. Kleinow et A. Cairns : Multi-population mortality models : fitting, forecasting and comparisons. *Scandinavian Actuarial Journal*, 2017:1–24, 01 2016.
- J. Friedman : Greedy function approximation : A gradient boosting machine. *Annals of Statistics*, 29:1189–1232, 2001.
- J. Friedman : Stochastic Gradient Boosting. *Computational Statistics & Data Analysis*, 38:367–378, 02 2002.
- J. Gampe : *Human mortality beyond age 110*, pages 219–230. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2010. ISBN 978-3-642-11520-2.
- R. Gauchon, S. Loisel et J.-L. Rulhière : Health-policyholder clustering using health consumption : a useful tool for targeting prevention plans. *European Actuarial Journal*, 10, 08 2020.

- N. S. Gavrilova et L. A. Gavrilov : Are We Approaching a Biological Limit to Human Longevity? *The Journals of Gerontology : Series A*, 06 2019. ISSN 1079-5006. glz164.
- B. Gompertz : 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*, 115:513–583, 1825. ISSN 02610523.
- S. Gutterman et I. T. Vanderhoof : Forecasting Changes in Mortality. *North American Actuarial Journal*, 2(4):135–138, 1998.
- M. Habart Corlosquet, J. Janssen et R. Manca : *Modélisation stochastique du risque de pandémie, Stratégie de couvertures et d'assurance*. Collection Méthodes Stochastiques Appliquées. Hermès/Lavoisier, 2012.
- O. Hamaoui : Modélisation du portefeuille de la gestion privée sous Solvabilité 2, 2012. Mémoire d'actuaire, CNAM.
- L. Hayflick : The limited in vitro lifetime of human diploid cell strains. *Experimental Cell Research*, 37(3):614 – 636, 1965. ISSN 0014-4827.
- L. Heligman et J. H. Pollard : The age pattern of mortality. *Journal of the Institute of Actuaries*, 107(1):49–80, 1980.
- Y. Kagraoka : Modeling Insurance Surrenders by the Negative Binomial Model. 01 2005.
- W. O. Kermack et A. G. McKendrick : A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 115(772):700–721, 1927. ISSN 09501207.
- C. Kim : Modeling Surrender and Lapse Rates With Economic Variables. *North American Actuarial Journal*, 9, 10 2005a.
- C. Kim : Report to the Policyholder Behavior in the Tail Subgroups Project. 01 2005b.
- W. Kuo, C. Tsai et W.-K. Chen : An Empirical Study on the Lapse Rate : The Cointegration Approach. *Journal of Risk and Insurance*, 70(3):489–508, 2003.
- H. Le Bras : *Naissance de la mortalité. L'origine politique de la statistique et de la démographie*. Seuil, 10 2013. ISBN 978-2-02-101512-6. Google-Books-ID : kU2tAQAAQBAJ.

- R. D. Lee et L. R. Carter : Modeling and Forecasting U.S. Mortality. *Journal of the American Statistical Association*, 87(419):659–671, 1992.
- N. Li et R. Lee : Coherent Mortality Forecasts for a Group of Population : An Extension of the Lee–Carter Method. *Demography*, 42:575–94, 09 2005.
- F. D. K. Liddell : Simple exact analysis of the standardised mortality ratio. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 38:85–88, 1984.
- S. Loisel et X. Milhaud : From deterministic to stochastic surrender risk models : Impact of correlation crises on economic capital. *HAL, Working Papers*, 214, 01 2010.
- S. Loisel, P. Piette et J. Tsai : Applying economic measures to lapse risk management with machine learning approaches. working paper or preprint, 06 2019.
- O. Lopez, X. Milhaud et P.-E. Thérond : Tree-based censored regression with applications in insurance. *Electronic journal of statistics*, 10(2):2685–2716, 09 2016.
- S. M. Lundberg, G. G. Erion et S.-I. Lee : Consistent individualized feature attribution for tree ensembles. *arXiv preprint arXiv :1802.03888*, 2018.
- S. M. Lundberg et S.-I. Lee : A Unified Approach to Interpreting Model Predictions. In I. Guyon, U. V. Luxburg, S. Bengio, H. Wallach, R. Fergus, S. Vishwanathan et R. Garnett, éditeurs : *Advances in Neural Information Processing Systems 30*, pages 4765–4774. Curran Associates, Inc., 2017.
- W. M. Makeham : On the Law of Mortality and the Construction of Annuity Tables. *The Assurance Magazine, and Journal of the Institute of Actuaries*, 8(6):301–310, 1860. ISSN 20461658.
- S. Makki : *An Efficient Classification Model for Analyzing Skewed Data to Detect Frauds in the Financial Sector*. Theses, Université de Lyon ; Université libanaise, 12 2019.
- S. Malek : Impact de la loi Pacte sur le couple rendement/risque du support Croissance. Mémoire de D.E.A., ISFA, 2020.
- R. C. Merton : Lifetime Portfolio Selection under Uncertainty : The Continuous-Time Case. *The Review of Economics and Statistics*, 51(3):247–257, 1969. ISSN 00346535, 15309142.

- R. C. Merton : Optimum consumption and portfolio rules in a continuous-time model. *Journal of Economic Theory*, 3(4):373 – 413, 1971. ISSN 0022-0531.
- A. Michaelson et J. Mulholland : Strategy for Increasing the Global Capacity for Longevity Risk Transfer : Developing Transactions That Attract Capital Markets Investors. *The Journal of Alternative Investments*, 17(1):18–27, 06 2014. ISSN 1520-3255, 2168-8435.
- X. Milhaud, S. Loisel et V. Maume-Deschamps : Surrender triggers in Life Insurance : what main features affect the surrender behavior in a classical economic context? 11, 12 2011.
- T. I. Missov, A. Lenart, L. Nemeth, V. Canudas-Romo et J. W. Vaupel : The Gompertz force of mortality in terms of the modal age at death. *Demographic Research*, S8 (36):1031–1048, 2015.
- C. Mouminoux : *Behavioral Biases and Strategies of Insurance Market Players*. Theses, Université Lyon 1 - Claude Bernard, 10 2018.
- S. J. Olshansky, D. J. Passaro, R. C. Hershow, J. Layden, B. A. Carnes, J. Brody, L. Hayflick, R. N. Butler, D. B. Allison et D. S. Ludwig : A Potential Decline in Life Expectancy in the United States in the 21st Century. *New England Journal of Medicine*, 352 (11):1138–1145, 2005. PMID : 15784668.
- J. F. Outreville : Whole-life insurance lapse rates and the emergency fund hypothesis. *Insurance : Mathematics and Economics*, 9(4):249 – 255, 1990. ISSN 0167-6687.
- E. J. Pesando : The Interest Sensitivity of the Flow of Funds Through Life Insurance Companies : An Econometric Analysis. *The Journal of finance*, 29(4):11105–1121, 1974.
- F. Planchet : Tables de mortalité d'expérience pour les portefeuilles de rentiers (Tables TGH 05 et TGF 05), 2007. Notice de présentation.
- F. Planchet et J. Tomas : Méthodes de positionnement : aspects méthodologiques. Rapport technique, Institut des actuaires. Note de travail II1291-12 v1.5.
- A. Quashie et M. Denuit : Modèles d'extrapolation de la mortalité aux grands âges. *ACTU Working Paper*, 2004-13, 02 2005.

- A. E. Renshaw et S. Haberman : Statistical analysis of life assurance lapses. *Journal of the Institute of Actuaries (1886-1994)*, 113(3):459–497, 1986. ISSN 00202681.
- A.E. Renshaw et S. Haberman : A cohort-based extension to the Lee-Carter model for mortality reduction factors. *Insurance : Mathematics and Economics*, 38(3):556–570, 06 2006.
- M. T. Ribeiro, S. Singh et C. Guestrin : "Why Should I Trust You?" : Explaining the Predictions of Any Classifier, 2016.
- J.-M. Robine et J.W. Vaupel : Supercentenarians : slower ageing individuals or senile elderly? *Experimental Gerontology*, 36(4):915 – 930, 2001. ISSN 0531-5565. Slowly Aging Organisms.
- S. Sanyal, T. Rochereau, C. N. Maesano, L. Com-Ruelle et I. Annesi-Maesano : Long-Term Effect of Outdoor Air Pollution on Mortality and Morbidity : A 12-Year Follow-Up Study for Metropolitan France. *In International journal of environmental research and public health*, 2018.
- T. K. Siu : Fair valuation of participating policies with surrender options and regime switching. *Insurance : Mathematics and Economics*, 37(3):533–552, 2005. ISSN 0167-6687.
- M. Stern : Euro-croissance : Analyse de la transformation du produit prévue par la loi PACTE. Mémoire de D.E.A., Université Paris Dauphine, 2019.
- R. H. Thaler : *Misbehaving : The Making of Behavioral Economics*. W. W. Norton Company, 06 2016. ISBN 978-0-393-35279-5.
- J. Vallin et F. Meslé : Tables de mortalité françaises pour les XIXe et XXe siècles et projections pour le XXIe siècle. *Institut national d'études démographiques*, 2001.
- A. M. Villegas, S. Haberman, V. K. Kaishev et P. Millossovich : A comparative study of two-population models for the assessment of basis risk in longevity hedges. *ASTIN Bulletin*, 47(3):631–679, 2017.
- W. Weibull : A Statistical Distribution Function of Wide Applicability. *Journal of Applied Mechanics*, 18:293–297, 1951.
- E. T. Whittaker : On a New Method of Graduation. *Proceedings of the Edinburgh Mathematical Society*, 41:63–75, 1922.

M. Wüthrich : Neural networks applied to chain–ladder reserving. *European Actuarial Journal*, 8, 10 2018.

Chapitre 1

Éléments d'analyse des versements libres à l'aide de *machine learning*

“ One important idea is that science is a means whereby learning is achieved, not by mere theoretical speculation on the one hand, nor by the undirected accumulation of practical facts on the other, but rather by a motivated iteration between theory and practice. ”

George E. P. Box

Sommaire

Résumé	46
Abstract	46
1.1 Introduction	47
1.2 Data	48
1.3 First approach	49
1.4 Improvement via a machine learning methodology	52
1.4.1 The methodology	53
1.4.2 The results	55
1.4.3 Dynamic performance of the model	55
1.4.4 Sensitivity to features	57
1.5 Risk Management oriented analysis	59
1.5.1 Model analysis	59
1.5.2 Micro level analysis	61
1.5.3 Risk management perspective	64
1.6 Conclusion	65
1.7 Appendix	67
Bibliography	102

Ce chapitre est tiré de l'article « Understanding and managing free payments with a machine learning approach ».

Résumé

Comprendre et modéliser les comportements est une tâche complexe et difficile, mais d'une grande importance pour les compagnies d'assurance car elle a un impact fort sur leur gestion des risques. Dans cet article, nous considérons le cas des versements libres sur les produits d'épargne et nous proposons une méthodologie basée sur l'apprentissage automatique pour les modéliser efficacement. Le modèle testé, basé sur des arbres de régression (GBRT), utilise des variables liées au produit ainsi que les paiements passés pour caractériser le risque, et nous montrons qu'il donne de meilleurs résultats au global qu'une modélisation plus classique fondée sur les séries temporelles. En outre, notre approche permet de comprendre certains des facteurs du risque grâce à l'analyse des prédictions du modèle que nous effectuons via le cadre proposé par SHAP (Shapley Additive Explanations). Nous analysons en outre le lien entre les versements, les rachats et les arbitrages à une maille plus fine.

Mots-clés : Versements libres ; Séries temporelles ; Gradient Boosting ; Gestion du risque.

Abstract

Understanding and modeling behaviours is a complex and challenging task, yet of particular importance for insurers as it deeply impacts their risk management. In this paper, we consider the case of free payments on saving products and we propose a methodology based on machine learning to oversee them efficiently. The model tested, based on Gradient Boosted Regression Trees (GBRT), uses product-related variables as well as past payments to monitor the risk, and we show that it outperforms a more classical time series modeling. In addition, our approach helps understand some of the drivers of the risk through the analysis of the model predictions that we perform with the Shapley Additive Explanations (SHAP) framework. We further analyze the link between payments, surrenders and arbitrages at a finer level.

Keywords: Free payments; Time series; Gradient Boosting; Risk management.

1.1 Introduction

In life insurance, being able to anticipate insured behaviours is probably one of the key aspects to risk management. Facing a challenging financial environment, insurance companies need to understand the drivers that encourage their insured to make a contract-linked decision. We can divide behaviours into three main categories: surrenders, which correspond to the possibility for the insured to retrieve all (total surrender) or some (partial surrender) of their savings; payments, which correspond to the possibility for the insured to add income to their savings, on a regular schedule (programmed payments) or not (free payments); and arbitrages which correspond to the possibility for the insured to change the allocation of their savings between euro-linked and unit-linked vehicles.

Most works concentrate on total surrenders, with different approaches and different objectives. The first papers considered them either as the indication of an urgent need for cash flow (Outreville [1990]) or as the indication of the existence of arbitrages in favour of the insured (Cummins [1973]; Pesando [1974]). More recent papers focus on how macro-economic variables such as interest rates, unemployment rates or gross domestic products affect lapse rates (Cox and Lin [2006]; Dar and Dodds [1989]; Kim [2005a,b]; Kuo et al. [2003] for some references). Another widespread approach, probabilistic, focuses on individual decisions. It uses personal characteristics to predict if a policyholder is going to surrender or not (Milhaud [2012]; Renshaw and Haberman [1986] for instance). Finally, some authors work on the financial evaluation of the surrender option in a life insurance contract, deriving methodologies from the finance field, like the Cox-Ross-Rubinstein model (Bacinello [2005]; Costabile et al. [2008]) or the American Contingent Claim theory (Siu [2005]) for instance.

Some recent works, especially actuarial theses, focus on arbitrages. The approaches rely either on linear models (see e.g. Hamaoui [2012] or Arquembourg [2014]) sometimes with an analysis of important variables (see e.g. Amrani [2013] or Folgoas [2017]), on the hypothesis of rationality to derive a methodology from the work of Merton [1969, 1971] (e.g. Brion [2009]) or more recently on the use of machine learning algorithms (e.g. Berrada [2017]).

However, regarding the modeling of payments, the literature is not very extensive. The recent IFRS 17 standard and the questioning around the frontier of contracts has led some actuaries to work on the subject, mostly at an individual level through the

scoring of people likely to make a free payment, putting to light some drivers such as seniority for instance (see e.g. Assaraf [2020]; Benabdelkrim [2017]).

Our contribution is threefold. Firstly, we use data from a real french insurance company to show that an approach relying on GBRT (Gradient Boosted Regression Trees) performs better than a time series approach to predict free payments at a macro level. Secondly, we highlight some important features brought out by the study: in particular, variables related to the dynamic led by the contract such as commercial campaigns or new subscriptions help improve the predictions mostly based on past payments. We further analyze the link between behaviours for two products at a micro level, and show that free payers constitute a specific population. Thirdly, we propose a framework to monitor behaviours in a risk management perspective that can in particular be applied for free payments.

The remainder of this paper is organized as follows: in Section 1.2, we briefly present the data used for this paper. For confidentiality reasons, we will not give numerical results regarding free payments nor give precise statistical elements regarding the data. In Section 1.3, we discuss a first approach to monitor free payments. This approach is based on classical time series modeling and will give us a comparison point for the methodology we consider. In Section 1.4, we detail this methodology, based on a machine learning technique: Gradient Boosted Regression Trees. We present the results obtained and compare them with those from the previous section. To objectify the comparison, we use a common criterion, the Root Mean Squared Logarithmic Error (RMSLE). In Section 1.5 we analyze the drivers of free payments and propose a methodology for risk management. Section 3.5 concludes our paper.

1.2 Data

The data used in this paper come from a french insurance company and are composed of 38 life insurance products marketed by three different partners. Figure 1.1 displays some statistics regarding the number of contracts, the provisions associated, the age of the insured and the seniority of the contracts (calculated as at January, 1st 2010).

The main information can be summarized in the following statements: most products are composed of a few tens of thousands of contracts (the median being 43,000) with a few exceeding the million; most products are similar in terms of provisions with some products being more important: our analysis will focus on 10 of those products

in the rest of the paper (6 of which are distributed by partner 1, 3 by partner 2 and 1 by partner 3); the mean age of the insured stays around 60 for all products (ranging from 40 to 80 depending on the product, with a peak for the range 75-80) except for 2 naturally younger because of their aim (transfer of capital / donation); most products have a low average seniority with many recent products but nonetheless some are really old (up to 20 years).

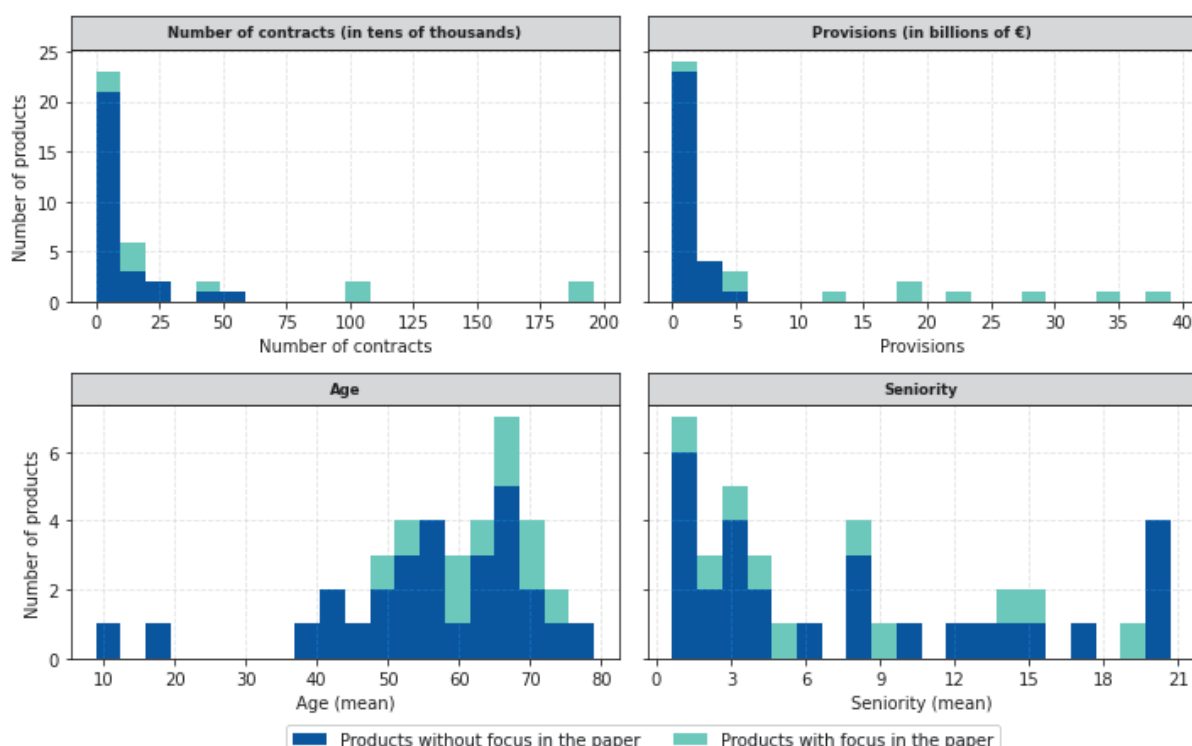


Figure 1.1 – Frequences with respect to the number of contracts, the amount of provisions, the mean age and the mean seniority.

We further indicate the most products impose an amount minimum to make a free payment: the quantile at 25% is 75€ , the median is 150€ and the quantile at 75% is 812,5€.

1.3 First approach

In this section, we consider a first classical approach to monitor the amount of free payments for different products of an insurance company using time series.

Concretely, we apply the Box-Jenkins method (see Box and Jenkins [1990]) to each

($FP_{i,t}$) series, where $FP_{i,t}$ is the amount of free payments of product i at time t . A general overview of time series models is given in Marquez [1995] or Box et al. [1994] for instance. For each of the products considered, we fit a SARIMA process with historical points from January 2009 to December 2015. The Akaike's Information Criterion (AIC, see Akaike [1973]) was used to select the best model. Appendix 1.7 provides information about the calibrations. Once selected, we use the model to forecast for years 2016 and 2017. In the following, we display two types of forecasts: one-step ahead, for which observed past free payments are used to predict new free payments, and dynamic forecast, for which predicted past free payments are used. This last one corresponds to the predictions made if we used the model not knowing actual values for years 2016 and 2017 so it appears to be more relevant to analyze. Computations were carried out with the package *statmodels* (Seabold and Perktold [2010]).

Let us study two products in particular, from two different partners. Those products are similar in terms of amount of free payments. We observe that for product 1, displayed on Figure 1.2a, the goodness of fit is very satisfactory even for dynamic forecasts. There is no particular change in the trend, so the model is basically sufficient. However, for product 2, whose result is shown on Figure 1.2b, the conclusions largely differ: the dynamic forecast clearly diverges from the real observations and even one-step ahead forecast seems to perform poorly compared to product 1. In this case, there is an abrupt change in the trend that is expectedly not captured by the model.

Those two examples highlight the fact that this approach cannot anticipate a sudden change in the series, and thus is not well suited to monitor behaviours that are by nature subject to brutal changes. Some other drawbacks are worth noticing to this point. Firstly, the number of models to build depends on the number of products. This can lead to a great deal of models to build and maintain and therefore increases the risk of operational error. Secondly, each model is built independently and does not exploit information from other series. Yet, there can be a real gain in using information from similar series: in our case, Figure 1.3 shows that series distributed by a same partner tend to be more correlated than series coming from different partners. This leans towards the use of such a variable in a model. Thirdly, using a time series modeling imposes a latency time as it is not possible to calibrate the model without some information (usually at least one year of observations) so it cannot be used to monitor recent products. Lastly, the parametric form of the models is a constraint one might want to free themselves from.



(a) Forecasts for product 1 with a classical time series model.



(b) Forecasts for product 2 with a classical time series model.

Figure 1.2 – Forecasts for products 1 and 2 with the time series methodology.

One way of overcoming the issue raised by brutal changes not taken into account could be to use other models proposed in the literature, for instance a SARIMAX process as in Arunraj et al. [2016]. Basically, a SARIMAX process is a classical SARIMA process that includes external variables. If $X_{1,t}, X_{2,t}, \dots, X_{k,t}$ denote k external variables observed at time t and Y_t is the target observed at time t , then the model is given by

$$Y_t = \alpha_0 + \alpha_1 X_{1,t} + \alpha_2 X_{2,t} + \dots + \alpha_k X_{k,t} + \epsilon_t, \quad (1.1)$$

where $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$ are the regression coefficients for the external variables and ϵ_t is the stochastic residual that depends on the initial series and which is supposed to be a SARIMA process. Dynamic Factor Models (DFM) seem to be a potential tool too (see e.g. Barhoumi et al. [2012]; Forni et al. [2000]; Stock and Watson [2006]) as well as new

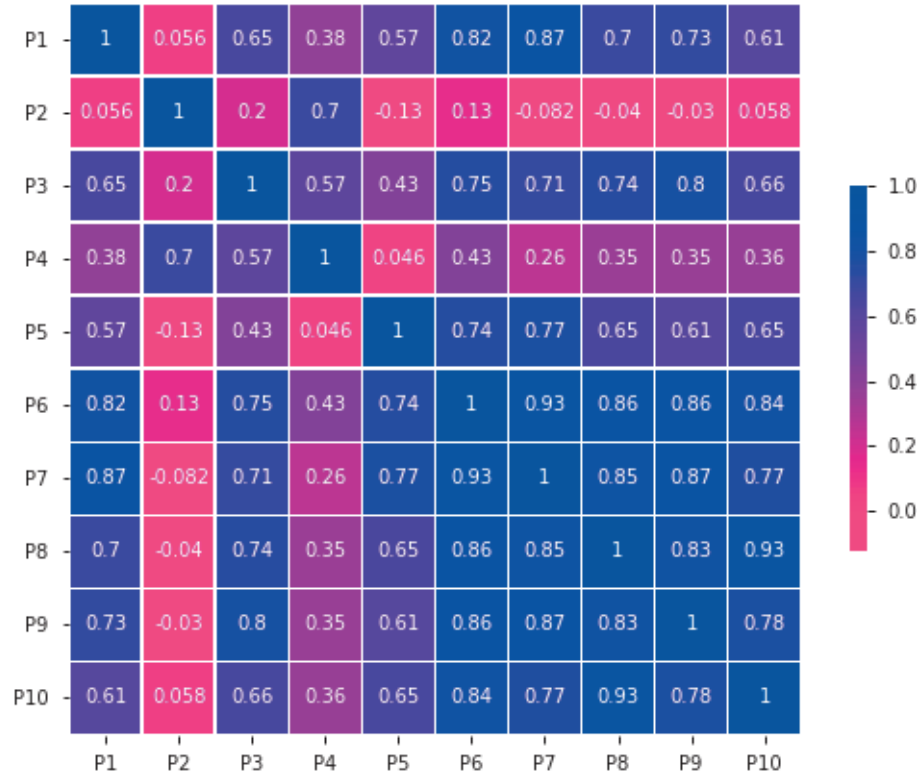


Figure 1.3 – Correlations of free payments for 10 main products.
P1-P5-P6-P7-P8-P10 are distributed by partner 1, P2-P3-P4 are distributed by partner 2 and P9 is distributed by partner 3.

development of classical VAR models (see e.g. Guritno and Sujuti [2020]; Swanson and White [1997]). In this paper, we prefer to focus on pure machine learning techniques so that we do not need to impose a specific form for our model, and so that we be able to embed future products as our modeling can be used even with new products.

1.4 Improvement via a machine learning methodology

As mentioned in the previous section, classical time series methods sometimes fail to forecast correctly the evolution of the future amount of free payments. We try to tackle this issue by proposing another methodology in Section 1.4.1. It is based on machine learning techniques and takes external or product-based information into account to improve forecasts. We then apply it to the data in Section 1.4.2. We compare the goodness in forecasts between this methodology and the time series methodology in Section 1.4.3 and conduct some sensitivity tests in Section 1.4.4.

1.4.1 The methodology

We continue here to reason at a macro level: in our methodology, the target variable is $y_{i,t} = \ln(FP_{i,t} + 1)$. We aim at predicting this target given different types of explanatory variables: past free payments, as in the classical time series approach, product-related variables and external variables. In doing so, we seem to tackle efficiently most of the drawbacks of the classical time series approach. Firstly, we build a single model, which alleviates the process on the one hand, and which exploit information from all series at the same time on the other hand. Secondly, we do not rely only on the past, so we better anticipate brutal changes in the trend of a series, often due to external causes. Obviously, using such a methodology requires enough data, and it might perform badly when there is not enough products or when there is only a few historical points. In our case, we gathered the products described in Section 1.2, and observe the free payments monthly from January 2009 to December 2015 as in Section 1.3, which gives us a database with approximately 3300 lines.

Concretely, for each date and each product, the base constructed contains a line with the features given in Table 1.1. We can divide those features in 4 categories. We named FP_1 , FP_2 , FP_3 , FP_MEAN_3 , FP_MEAN_6 , FP_MEAN_12 the variables related to past free payments, $FIRST_COM$, $LAST_COM$, FP_MIN , $PART_1$, $PART_2$ the variables related to the product, NEW_SUB , UL_RATE , $CAMP_1$, $CAMP_2$ ¹ the variables related to the dynamic led by the contracts and $MONTH$ the variable related to the time of the year. Not all the features were used in our final model, some were used for sensitivity tests, as clarified in Section 1.4.4.

For this study, we chose to work with Gradient Boosted Regression Trees (see Friedman [2001] for a detailed presentation of the algorithm) which have a good predictive power and have empirically proven their efficiency for solving many problems. In particular, the algorithm seems very qualified for web search ranking (Mohan et al. [2011]; Zheng et al. [2008]) or in the ecology field (Persson et al. [2017]; Pittman et al. [2009]). Throughout this work, computations were carried out with the *GradientBoostingRegressor* function available with the package *scikit-learn* (see Pedregosa et al. [2011] for a detailed information on the package).

Solving a machine learning problem needs to define a loss function to be optimized. Usually when working on regression problems, the squared loss is used, but it tends

1. The commercial campaigns considered provide an income supplement if a free payment is made.

Table 1.1 – Features and their meaning.

Feature	Meaning
FP_1	amount of free payments from past month
FP_2	amount of free payments from two months ago
FP_3	amount of free payments from three months ago
FP_MEAN_3	mean amount of free payments from past three months
FP_MEAN_6	mean amount of free payments from past six months
FP_MEAN_12	mean amount of free payments from past year
FIRST_COM	time since first commercialization
LAST_COM	time since last commercialization (0 if still commercialized)
FP_MIN	minimum amount to make a free payment
PART_1	1 if partner 1 commercializes the product
PART_2	1 if partner 2 commercializes the product
NEW_SUB	number of new subscriptions
UL_RATE	part of provision in unit-linked liabilities
CAMP_1	amount of time with commercial campaign from partner 1
CAMP_2	amount of time with commercial campaign from partner 2
CONF_MEAN_3	mean consumer confidence for past three months
INFLATION_MEAN_3	mean inflation for past three months
MONTH	month considered

to be dominated by outliers. Therefore, we chose to use the Huber loss function,

$$L_\delta(y, f(x)) = \begin{cases} \frac{1}{2}(y - f(x))^2 & \text{for } |y - f(x)| \leq \delta, \\ \delta|y - f(x)| - \frac{1}{2}\delta^2 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1.2)$$

As shown in Figure 1.4, the Huber loss function is quadratic around 0 and becomes linear for large values. In a nutshell, it combines the advantages of the squared loss function (mean-unbiased estimator) and absolute loss (median-unbiased estimator), but it adds an extra parameter δ to the model.

In accordance with classical methods in data science, our base was split into a train set and a test set. Just like in Section 1.3, observations after January 2016 (included) consist in our test set. The search for the best parameters was performed by cross validation on the train set using the mean squared error function as a validation metric. We used the *cross_val_score* function available with the package *scikit-learn* for computational purposes. The search for the optimal hyper-parameters was performed with the *hyperopt* package (Bergstra et al. [2013]). In particular, we optimized the following parameters:

- the maximum depth of the individual regression estimators;

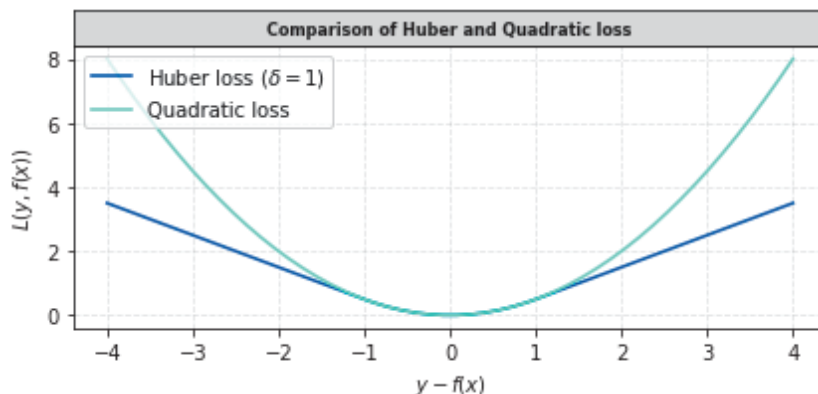


Figure 1.4 – Comparison between quadratic loss and Huber loss for $\delta = 1$.

- the number of features to consider when looking for the best split;
- the delta of Equation 1.2.

1.4.2 The results

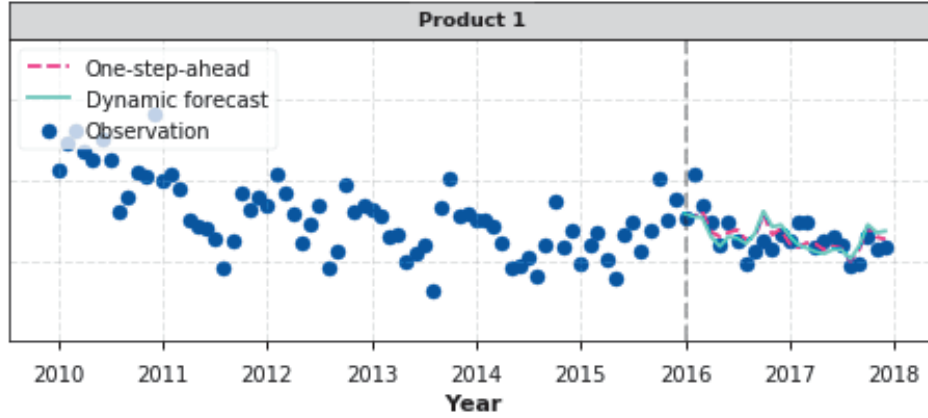
We display the graphical results we obtain after fitting the model in Figure 1.5 with the same products presented in Section 1.3. In particular, the model considered here is the GBRT 3 (see Table 1.3 for the variables used). For product 1, our model seems to be at least as promising as the classical time series approach. The real gain is obtained for product 2, where our model manages to capture the decrease in the amount of free payments after 2016, even dynamically. The most reasonable explanation for this improvement lies in the variables used in the model. We give some insights of why it is able to adapt quite well in Section 1.5.1.

1.4.3 Dynamic performance of the model

In this section, we compare the predictive power of the different models in Table 1.2 for the 10 main products, using the RMSLE (Root Mean Squared Logarithmic Error)

$$RMSLE_i = \sqrt{\frac{1}{T - t_0} \sum_{t=t_0}^T (\log(FP_{i,t} + 1) - \log(\hat{FP}_{i,t} + 1))^2}, \quad (1.3)$$

where $RMSLE_i$ is the RMSLE for product i , $\hat{FP}_{i,t}$ is the predicted free payments for product i at time t , t_0 is January 2016, that is the first date in our validation set, and T is December 2017, that is the last date in our validation set. The global RMSLE



(a) Forecasts for product 1 with the GBRT model.



(b) Forecasts for product 2 with the GBRT model.

Figure 1.5 – Forecasts for products 1 and 2 with the machine learning methodology.

is calculated with the sum of free payments from all products, that is by replacing $FP_{i,t}$ and $\hat{FP}_{i,t}$ in Equation 1.3 by $FP_t = \sum_i FP_{i,t}$ and $\hat{FP}_t = \sum_i \hat{FP}_{i,t}$ respectively. The performance is evaluated for the dynamic forecast which is the real matter for this study.

It is straightforward that the machine learning based approach outperforms the time series approach. For product 2, it ameliorates the RMSLE by more than 65%. When the machine learning approach underperforms the classical methodology (products 4 and 10) the absolute results stay somewhat acceptable. Overall, the gain is really important (about 60%) and seems to validate the methodology. The graphical results for the 10 main products are given in Appendix 1.7.

This conclusion finds echo in the graphical representation of the time series, given in

Table 1.2 – The RMSLE for the classical time series methodology and our methodology (model GBRT 3).

Product	RMSLE	
	<i>Times Series approach</i>	<i>Machine Learning approach</i>
1	0.15	0.15
2	0.93	0.30
3	0.76	0.24
4	0.23	0.64
5	0.29	0.17
6	0.50	0.22
7	0.27	0.26
8	0.26	0.15
9	0.78	0.71
10	0.26	0.33
<i>Main products</i>	0.39	0.15

Figure 1.6. The GBRT forecast is clearly better than the time series one. Note however that the overall time series forecasts are obtained by summing the predictions given by the time series models for each product; a global model may have performed better. Nonetheless, this overall result, combined with all the drawbacks that the machine learning methodology contributes to overcome, advocates for its use.



Figure 1.6 – Comparison of the dynamic forecast for the 10 main products.

1.4.4 Sensitivity to features

Choosing the right features to forecast free payments is tricky and the choices made in the previous sections can legitimately be challenged. This is the reason why we

conducted sensitivity tests on the features.

Given the aim of this paper, we are not in a perspective of creating unexplainable features that might help improve the predictions a little, but rather in a perspective of creating a good model with a reasonable number of understandable features. Concretely, we calibrated different models with different sets of features. The first set of features corresponds to temporal variables, the second set corresponds to variables linked with the dynamic led by the contracts (new subscriptions, marketing campaigns...) while the third set are product-linked variables (time since first commercialization, minimum for free payments, ...). We also considered external variables such as inflation or the consumer confidence: we acknowledge the fact that this is a real source for further investigation as we did not search for the macroeconomic variables that might have a real positive impact for the model. Table 1.3 recapitulates the different combinations tested (our final model is the GBRT 3).

Table 1.3 – Sensitivity tests conducted on features.

Features		GBRT 1	GBRT 2	GBRT 3	GBRT 4
Temporal variables	FP_1				
	FP_2				
	FP_3				
	FP_MEAN_3	✓	✓	✓	✓
	FP_MEAN_6				
	FP_MEAN_12				
	MONTH				
Dynamic led by the contracts variables	NEW_SUB				
	UL_RATE	✗	✓	✓	✓
	CAMP_1				
	CAMP_2				
Product-linked variables	FIRST_COM				
	LAST_COM				
	FP_MIN	✗	✗	✓	✓
	PART_1				
	PART_2				
External variables	CONF_MEAN_3	✗	✗	✗	✓
	INFLATION_MEAN_3				
RMSLE		0.22	0.19	0.15	0.20

The conclusions to this sensitivity analysis are threefold: overall, all models are better than the time series models (whose RMSLE is 0.39); adding variables linked with the dynamic led by the contracts and product-linked variables improves the predictions as

it decreases by 30% the RMSLE; adding variables does not always improve the model: in our particular case, the external variables used deteriorate the RMSLE. Let us insist here on the fact that the third point does not mean that macroeconomic variables can not help build a model, but rather that the specific variables tested here do not provide any signal for it and seem, on the contrary, to interfere with it. The RMSLE for the 10 main products for all 4 GBRT models is given in Appendix 1.7.

1.5 Risk Management oriented analysis

In the following section, we investigate the drivers of free payments. Precisely, we discuss the impact of the variables used in our model in Section 1.5.1, then dive deeper via the analysis at an individual level in Section 1.5.2, and we propose a risk monitoring protocol in Section 1.5.3.

1.5.1 Model analysis

One of the important drawbacks of machine learning algorithms is their lack of interpretability: they are often referred to as “black boxes”. It is particularly an issue in insurance since the comprehension of the phenomena is as important as the prediction itself. This issue has recently been tackled by data scientists that has come up with different solutions (see e.g. Chen et al. [2018]; Hu et al. [2018]; Shakerin and Gupta [2019]; Shrikumar et al. [2016]; Štrumbelj and Kononenko [2014]). For our analysis, we will rely on the SHAP framework (SHAP stands for SHapley Additive exPlanations) proposed by Lundberg et al. [2018]. Basically, the framework consists in summing the effects ϕ_i of each of the M features introduced in conditional expectations to explain the output of the function f exhibited via the machine learning process, that is to say

$$f(x) = \sum_{i=0}^M \phi_i, \quad (1.4)$$

where ϕ_i borrows from the classic Shapley values from the game theory

$$\phi_i = \sum_{S \subseteq N \setminus \{i\}} \frac{|S|!(M - |S| - 1)!}{M!} [f_x(S \cup \{i\}) - f_x(S)], \quad (1.5)$$

where N is the set of all input features and $f_x(S) = \mathbb{E}[f(x)|x_S]$ is the expected value of the function conditioned on a subset S of the input features. Computations were carried out with the python package *shap* (see Lundberg and Lee [2017] for a general use of *shap*).

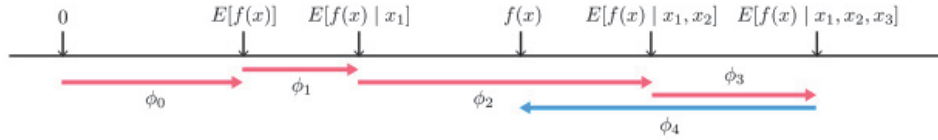


Figure 1.7 – How to get the output of a function in the SHAP framework. Extracted from Lundberg and Lee [2017] or Lundberg et al. [2018].

Note that the assumption made here, which consists in considering that we can sum the contribution of the features is certainly questionable but remains coherent altogether: we guess, for instance, that the impact of a commercial campaign should somehow add to the global amount of free payments made on a particular month.

Figure 1.8 displays importance of the features we kept in the final model. In particular, the Subfigure 1.8a presents the average impact of each feature used on the GBRT model. Not surprisingly, the features related to past free payments have the most important impact on the model: in particular, we note how flexible it is since it allows taking combinations of features into consideration such as mean free payments over the past months, whereas the traditional time series models do not. We also remark that variables linked to the dynamic led by the contracts (typically new subscriptions) play a role that is not to be neglected. Product-related variables also bring information, even if less important: typically, the partner plays a role as well as commercial campaigns that help the model.

Subfigure 1.8b displays the impact of the features on the model output for each prediction (represented as a dot), the color bar on the right indicating the value of the feature considered for that particular prediction (the redder it is, the higher the feature value is). As a consequence, we deduce that for the model calibrated, the fact that the mean of the free payments made in the past 6 months is high increases the prediction of the amount of free payment for the following month. The result is similar for all features linked with past payments, which seems logical and corresponds to what drives the results overall. The other variables help refine the model: we note in particular that increasing the minimum amount of free payment compulsory to

make a payment plays a negative role as it decreases the prediction. We also notice that increasing the amount of time with commercial campaign in a month increases the prediction, same thing with the new subscriptions. If those results seem logical, they show that it is possible to rely on machine learning to improve forecasts and help understand or validate the underlying mechanisms to a certain extent.

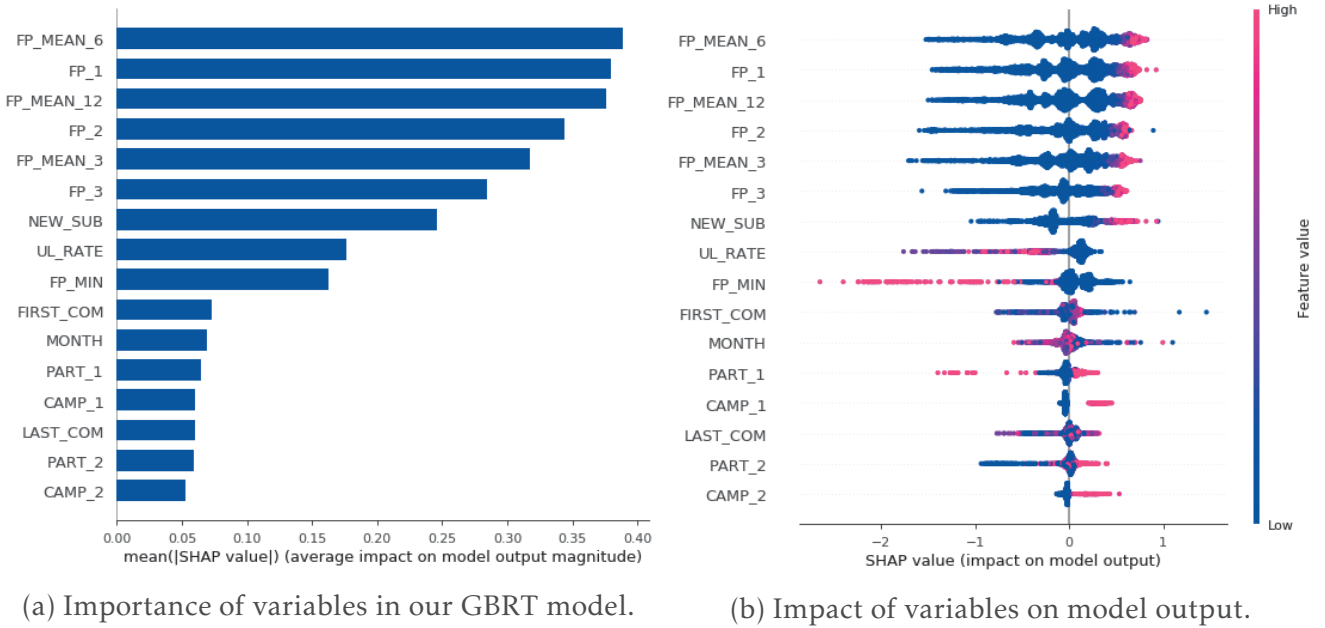


Figure 1.8 – Analysis of variable importance.

The analysis can be made for a specific month: for product 2 for example, the change of trend in the predictions is due to the changing value of commercial campaign features as well as new subscriptions to a certain extent.

1.5.2 Micro level analysis

The previous section has shown that past payments drive predictions for future payments at a macro level, but it does not provide any information about behaviours at a micro level, which we consider in this section. In particular we are interested in the link between payments, surrenders and arbitrages.

Let us denote by P_i the indicator of free payments made at seniority i , R_i the indicator of partial surrenders made at seniority i , A_i^{UC} the indicator of arbitrages from unit-linked to euro-linked vehicles made at seniority i and $A_i^{\in}$ the indicator of arbitrages from euro-linked to unit-linked vehicles made at seniority i . For each seniority i , we

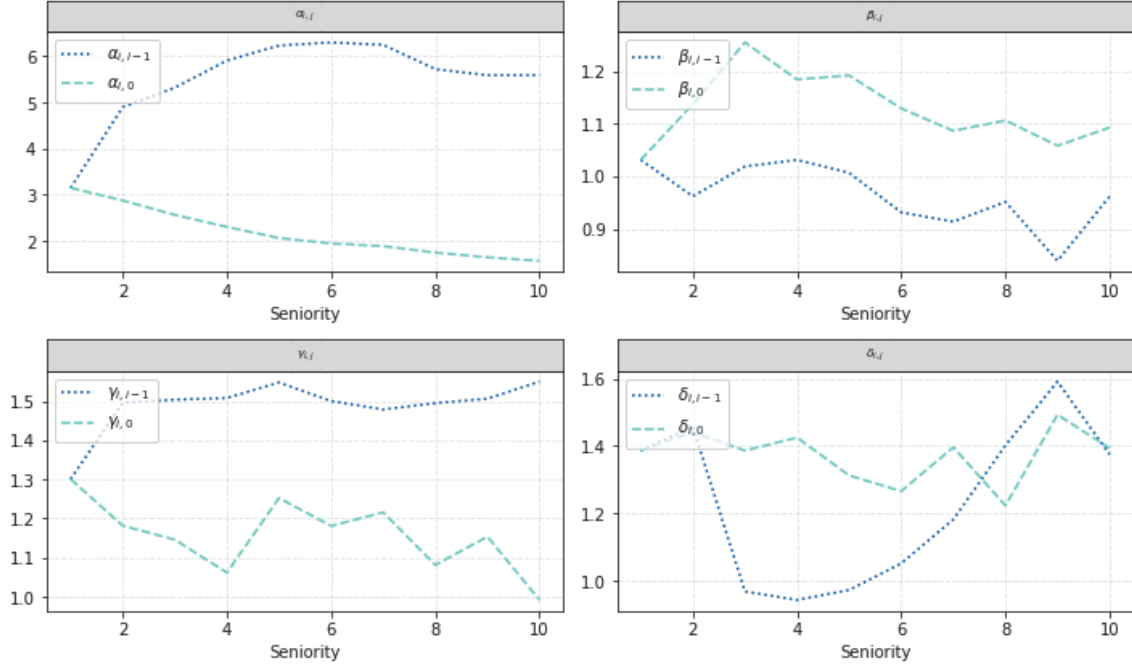
observe a sample $(P_i^1, \dots, P_i^{n_i}), (R_i^1, \dots, R_i^{n_i}), (A_i^{\text{UC},1}, \dots, A_i^{\text{UC},n_i})$ and $(A_i^{\text{€},1}, \dots, A_i^{\text{€},n_i})$ of those variables (for each individual present). Then, we can calculate

$$\begin{cases} \alpha_{i,j} = \frac{\mathbb{P}(P_i = 1|P_j = 1)}{\mathbb{P}(P_i = 1|P_j = 0)}, & \beta_{i,j} = \frac{\mathbb{P}(P_i = 1|R_j = 1)}{\mathbb{P}(P_i = 1|R_j = 0)}, \\ \gamma_{i,j} = \frac{\mathbb{P}(P_i = 1|A_j^{\text{€}} = 1)}{\mathbb{P}(P_i = 1|A_j^{\text{€}} = 0)}, & \delta_{i,j} = \frac{\mathbb{P}(P_i = 1|A_j^{\text{UC}} = 1)}{\mathbb{P}(P_i = 1|A_j^{\text{UC}} = 0)}, \end{cases} \quad (1.6)$$

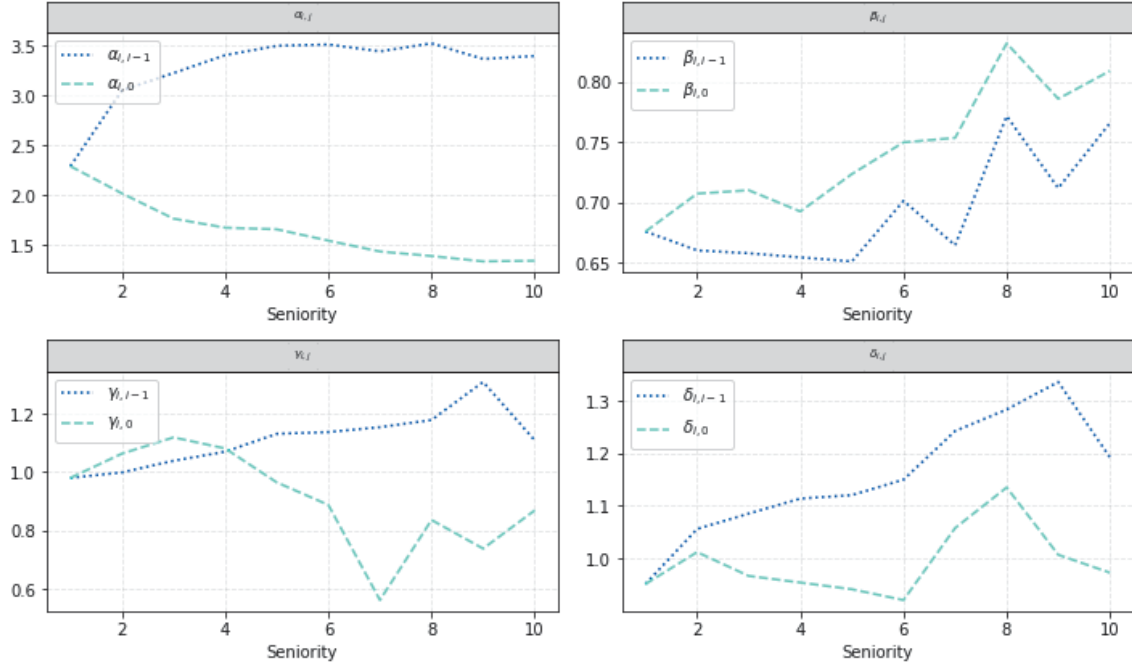
with $\mathbb{P}(P_i = 1|X_j = \bullet) = \frac{\text{Card}\{k \text{ s.t. } (X_j^k = \bullet) \cap (P_i^k = 1)\}}{\text{Card}\{k \text{ s.t. } (X_j^k = \bullet)\}}$, where $X_j^k = P_j^k, R_j^k, A_j^{\text{€},k} \text{ or } A_j^{\text{UC},k}$ 2.

Through those quantities, we can analyze the relation between past behaviours and future payments. In particular, we are interested in $(\alpha_{i,0}, \beta_{i,0}, \gamma_{i,0}, \delta_{i,0})_{i \geq 1}$, that is to say the link between behaviours in the first year of the contract and posterior payments, and $(\alpha_{i,i-1}, \beta_{i,i-1}, \gamma_{i,i-1}, \delta_{i,i-1})_{i \geq 1}$, that is to say the link between behaviours and payments for two consecutive year. Figure 1.9 presents the results we obtained when calculating those quantities for product 1 and 2; we derive four key points from it. For both products, people who make a free payment at a particular date are way more susceptible to make a free payment the following year than those who do not, and those who make a free payment at the beginning of the contract globally make more free payments throughout the life of the contract. This seems to indicate that free payers constitute a particular subpopulation with an investment profile. For product 1 and 2, people who make partial surrenders at a certain date invest less the following year than those who do not, which could indicate a disinvestment behaviour. For product 1, a partial surrender at the beginning of the contract lead to a higher probability of free payments for some time afterwards: this may indicate an urgent need for cash (as in Outreville [1990]) followed by a reconstitution of the capital. This is not however not the case with product 2, whose entry fee is way higher (75€ vs. 25,000€); thus, the surrender would have another meaning and could result of the realization of an important project (purchase of a house) rather than an urgent need for cash. The link between arbitrages and free payments may be a bit more difficult to extrapolate, even though those who arbitrage at a certain date tend to be more susceptible to make a free payment the following year. We see that even though behaviours differ between the 2 products, free payers appear to constitute a specific subpopulation within the insured. We provide additional elements in Appendix 1.7.

2. Sensitivity tests conducted to calculate this quantity did not change the results.



(a) Product 1.



(b) Product 2.

Figure 1.9 – $\alpha_{i,j}$, $\beta_{i,j}$, $\gamma_{i,j}$ and $\delta_{i,j}$ for product 1 and 2.

1.5.3 Risk management perspective

In the previous section, we proposed to use machine learning to monitor free payments and then we analyzed the drivers of the model. In this section, we propose to encapsulate this work within a framework for risk management, applicable in particular to free payments. It consists in 3 steps detailed hereafter.

(i) Model calibration.

The first statistics, complementary to the business expertise should help select some features to model the risk considered. With those element, the model can be built carefully, with classical machine learning techniques (cross-validation, train/test split, ...). It needs to be analyzed attentively in order to confirm or refute the prior vision of the risk, thus calling for an in-depth study.

(ii) Model use.

This part requires to define a business plan and hypotheses (homogeneous with the data used for the calibration; the misuse of a model is an important part of model risk and therefore an important point to keep in mind). Indeed, among the variables chosen to calibrate the model, some may be linked with management decisions. In our free payments example, this is in particular the case of the commercial campaigns: the periods are defined upwind by the top management. We also need to make assumptions as some variables may themselves need to be forecast: this is generally the case of external variables and/or linked to the dynamic of the product. In our example, the number of new subscriptions cannot be known in advance, but scenarios and objectives can be made, in adequacy with the business plan. Reasoning with different scenarios (a low one, a central one and a high one) seems a reasonable approach.

(iii) Model analysis.

With the results, fully informed decisions can be made in adequacy with the risk appetite of the company that can adjust its strategy, regarding commercial campaigns for instance. This analysis step also innervates the business expertise so that somehow the loop is closed. In a sense, our work models the notion of expert opinion: indeed, when given some inputs, an expert is roughly able to anticipate the behaviour of their portfolio. Here, we show how machine learning tools can broaden this expertise.

This methodology is not too heavy in terms of processes and can therefore easily be

implemented and executed on a regular schedule, for example each trimester or each semester. A focus can be made on key products and KPI (Key Performance Indicators) can be designed from this. In our free payments application, a KPI could be set up by comparing the effective efficiency of a commercial campaign (extra payments due to the campaign $FP_{\text{commercial campaign}}$, calculated for example as the payments made by people contacted during the campaign) to the projected efficiency of the campaign given by the model (extra payments deducted from the model $\hat{FP}_{\text{commercial campaign}}$):

$$KPI_{\text{commercial campaign}} = \frac{FP_{\text{commercial campaign}}}{\hat{FP}_{\text{commercial campaign}}}. \quad (1.7)$$

Obviously, the higher this indicator is, the better the campaign was. The cost for implementing the business plan (marketing campaigns, expenses to achieve the new subscriptions target...) can be related to the expected earnings, therefore producing an anticipated ROI (Return On Investment) useful to drive the business.

1.6 Conclusion

Understanding and monitoring behaviours is a key task for insurance companies. It has a direct impact on their management and their appetite to the risk.

In this paper, we have proposed a new methodology to monitor and forecast free payments in an insurance company. Our methodology, based on machine learning techniques (namely Gradient Boosted Regression Trees), was applied to real products and led to three key results. Firstly, this approach outperforms a classical methodology based on times series. Not only does it alleviate the process by reducing the number of models to an only one, but it also takes external and product-based information into account, which allows for better forecasts. Secondly, it gives some insights on variables playing an important role to understand and thus monitor free payments. In our case, the partner as well as the commercial campaigns seem to help capture changes in the trends. An analysis at an individual level confirms that that free payers constitute a specific population within the holders of a life insurance product. Thirdly, we show that our methodology belongs in a risk management framework and is suitable to monitor any behavioural risk, whether it be in number or in amount.

Nevertheless, some elements may be improved and challenged in future researches. Obviously, the choice of variables used in the model has a huge impact on the results

and might differ from one study to another. Intuition as well as technical constraints could lead to another choice of variables. In the same vein, we focused in this paper on GBRT, but other algorithms could perform as well or even better: we think here about neural networks, powerful tool but difficult to train in practice. Finally, the construction of the confidence intervals for the tree-based algorithm is a pending question, yet of importance in a risk management point of view.

1.7 Appendix

Time series calibration for 10 most important products

The time series modeling relies on SARIMA processes. We call SARIMA_s[(p, d, q)(P, D, Q)] process any process (X_t) such that

$$Y_t = (I - L)^d (I - L^s)^D X_t$$

is an ARMA process

$$\Phi(L)\phi(L^s)Y_t = \Theta(L)\theta(L^s)\epsilon_t,$$

where ϵ_t is gaussian noise, Φ , ϕ , Θ and θ are polynomials with degree p, P, q and Q respectively, I is the identity operator defined as

$$IX_t = X_t$$

and L the lag operator defined as

$$LX_t = X_{t-1}.$$

For each of the 10 most important products, we provide :

- the additive decomposition of the time series, in the form $y_t = t_t + s_t + r_t$, where y_t is the observed data, t_t is the trend component, s_t is the trend-cycle component and r_t is the remainder component;
- the year-wise and month-wise box plots;
- the auto-correlation function (ACF) plot and the partial auto-correlation function (PACF) plot of the initial series;
- the p-values for KPSS and augmented Dickey-Fuller (ADF) tests;
- the diagnostics plots of the SARIMA model fitted : standardized residuals, histogram plus estimated density, Q-Q plot and correlogram.

The null hypothesis (H0) of the KPSS test is that the time series is stationary.

The null hypothesis (H0) of the augmented Dickey-Fuller test is that a unit root is present in the time series (therefore, that it is not stationary).

Product 1

The elements regarding product 1 are given in Figures 1.10 and 1.11.

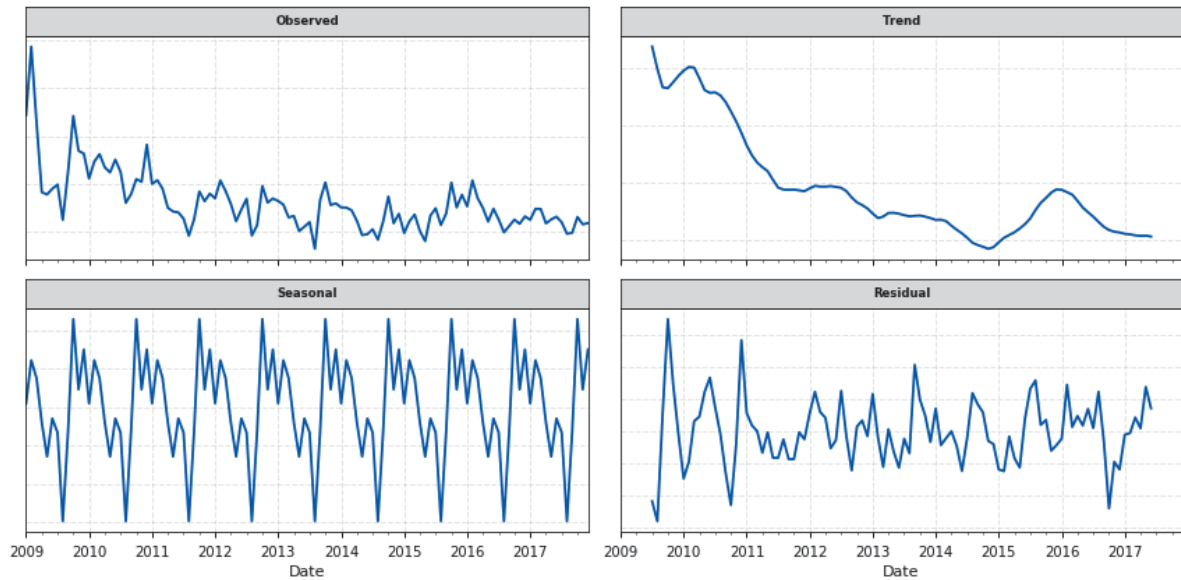


Figure 1.10 – Additive decomposition.

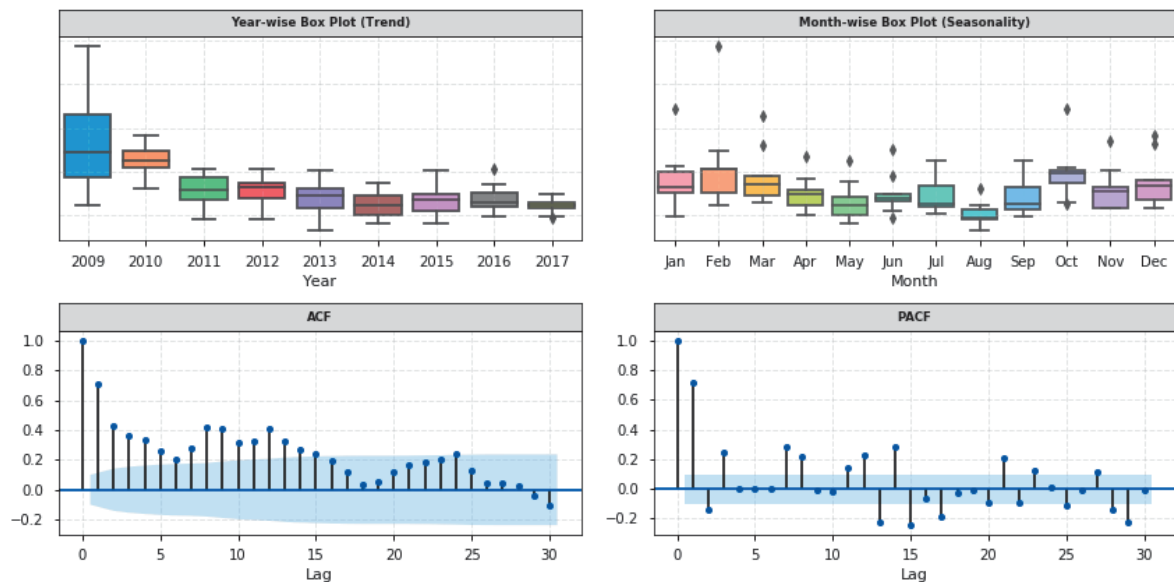


Figure 1.11 – Correlation and box plots.

The results of the stationarity tests performed are given in Table 1.4.

Table 1.4 – Results (p-values) of KPSS and ADF tests.

Series	KPSS	ADF
X_t	0.012	0.374
$\log(X_t + 1)$	0.013	0.472
$X_t - X_{t-1}$	> 0.1	< 0.001
$X_t - X_{t-12}$	0.088	0.161
$\log(X_t + 1) - \log(X_{t-1} + 1)$	> 0.1	0.004
$\log(X_t + 1) - \log(X_{t-12} + 1)$	> 0.1	< 0.001

The process fitted is a $\text{SARIMA}_{12}[(2,1,2)(1,0,1)]$. The diagnostics plots of the model are given in Figure 1.12.

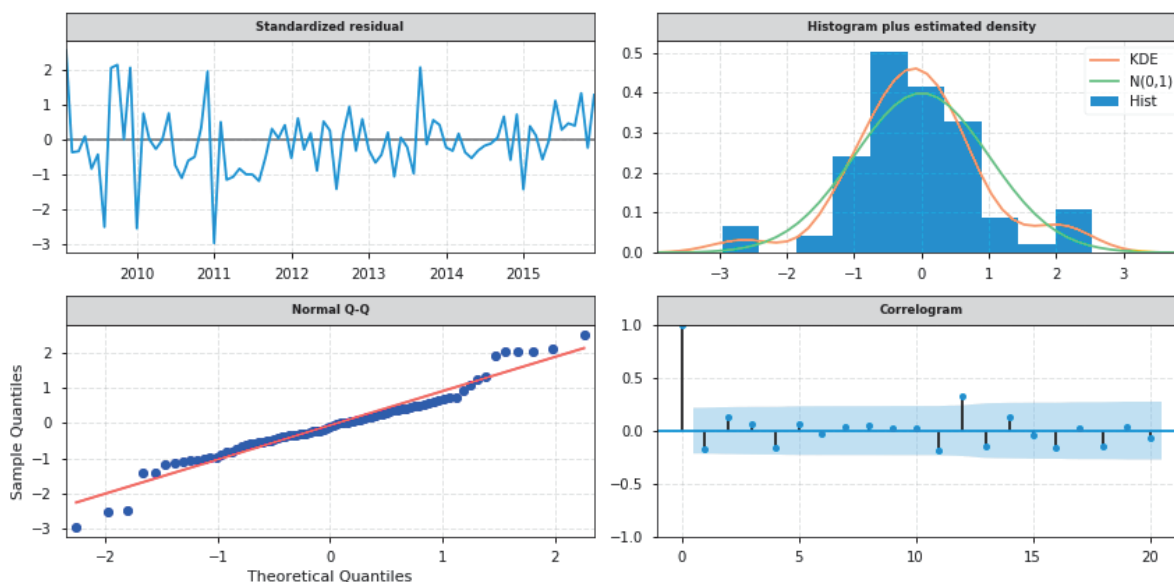


Figure 1.12 – Diagnostics plots.

The analysis of the diagnostics plots show a good fit with the data.

Product 2

The elements regarding product 2 are given in Figures 1.13 and 1.14.

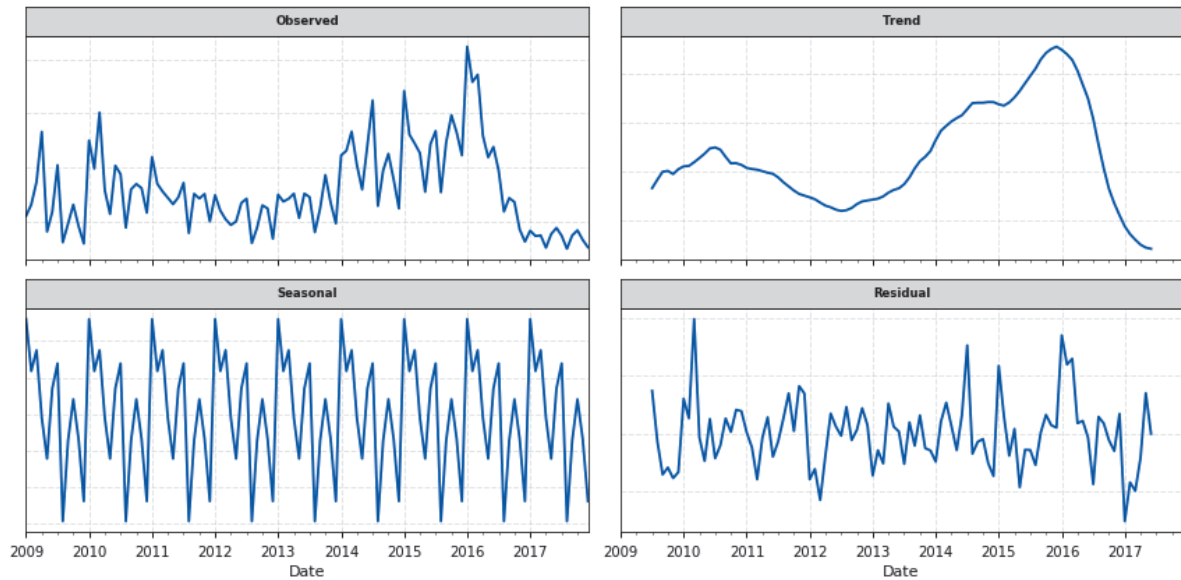


Figure 1.13 – Additive decomposition.

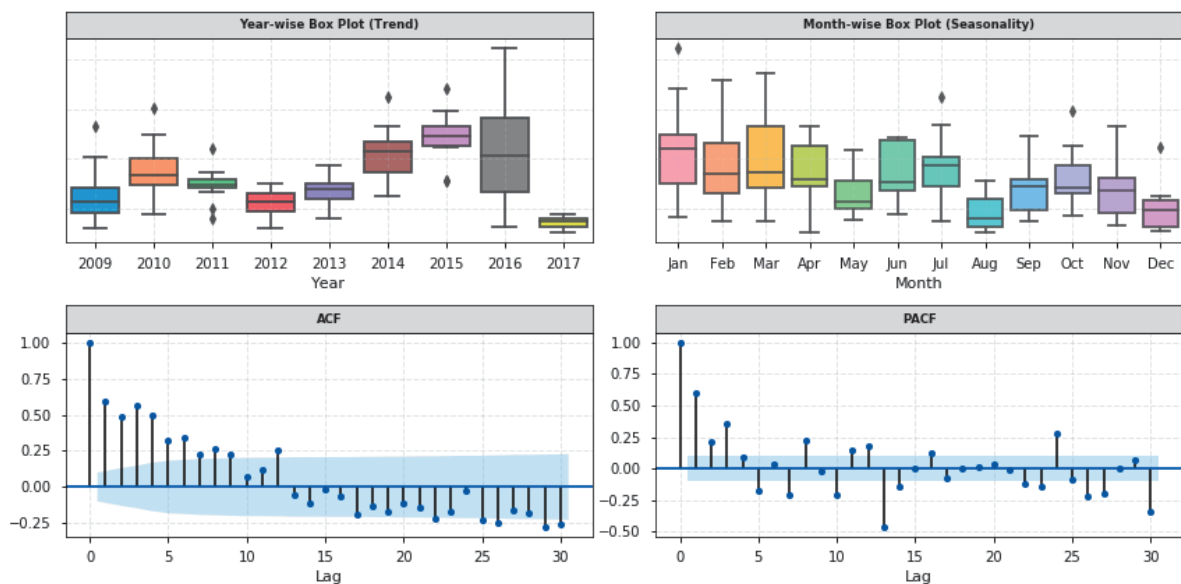


Figure 1.14 – Correlation plots and box plots.

The results of the stationarity tests performed are given in Table 1.5.

Table 1.5 – Results (p-values) of KPSS and ADF tests.

Series	KPSS	ADF
X_t	> 0.1	0.154
$\log(X_t + 1)$	> 0.1	0.116
$X_t - X_{t-1}$	> 0.1	0.08
$X_t - X_{t-12}$	> 0.1	0.135
$\log(X_t + 1) - \log(X_{t-1} + 1)$	> 0.1	0.203
$\log(X_t + 1) - \log(X_{t-12} + 1)$	> 0.1	0.042

The process fitted is a $SARIMA_{12}[(1,0,1)(3,1,1)]$. The diagnostics plots of the model are given in Figure 1.15.

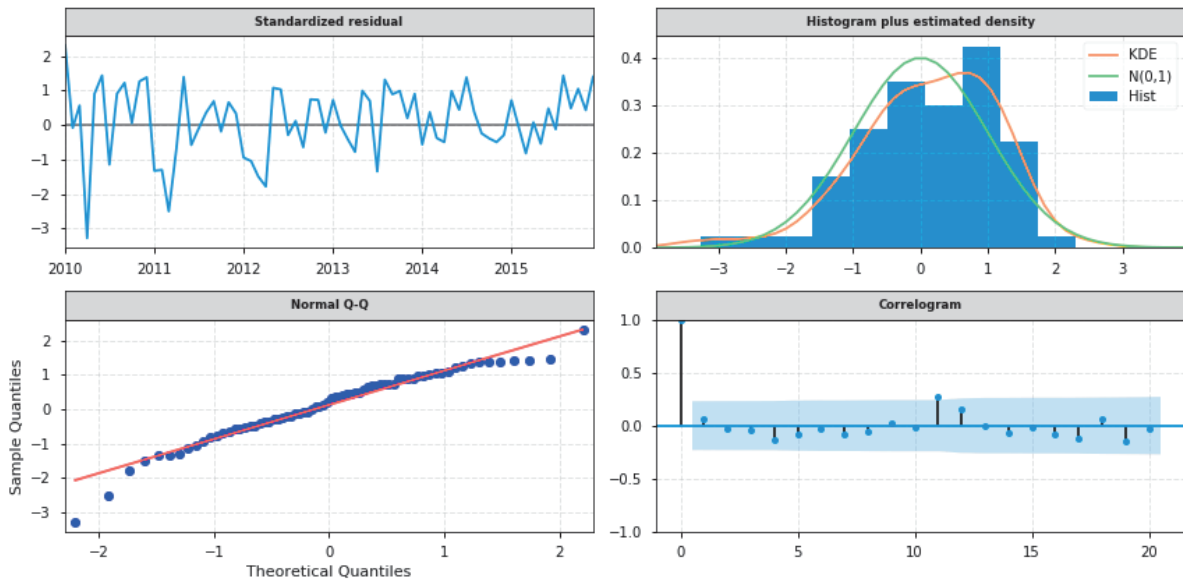


Figure 1.15 – Diagnostics plots.

The analysis of the diagnostics plots show a good fit with the data.

Product 3

The elements regarding product 3 are given in Figures 1.16 and 1.17.

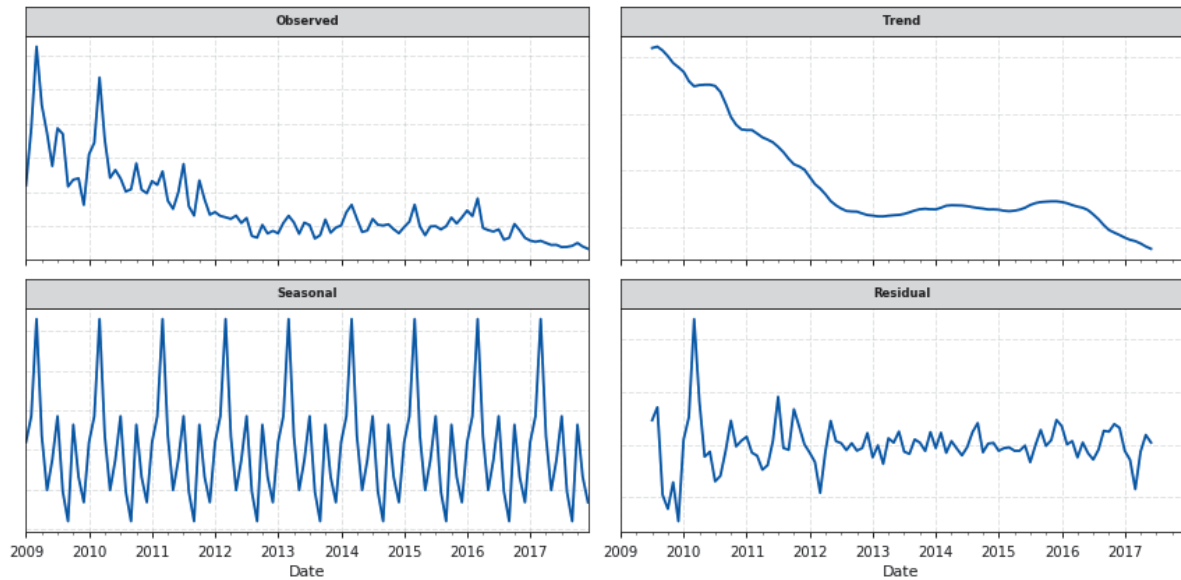


Figure 1.16 – Additive decomposition.

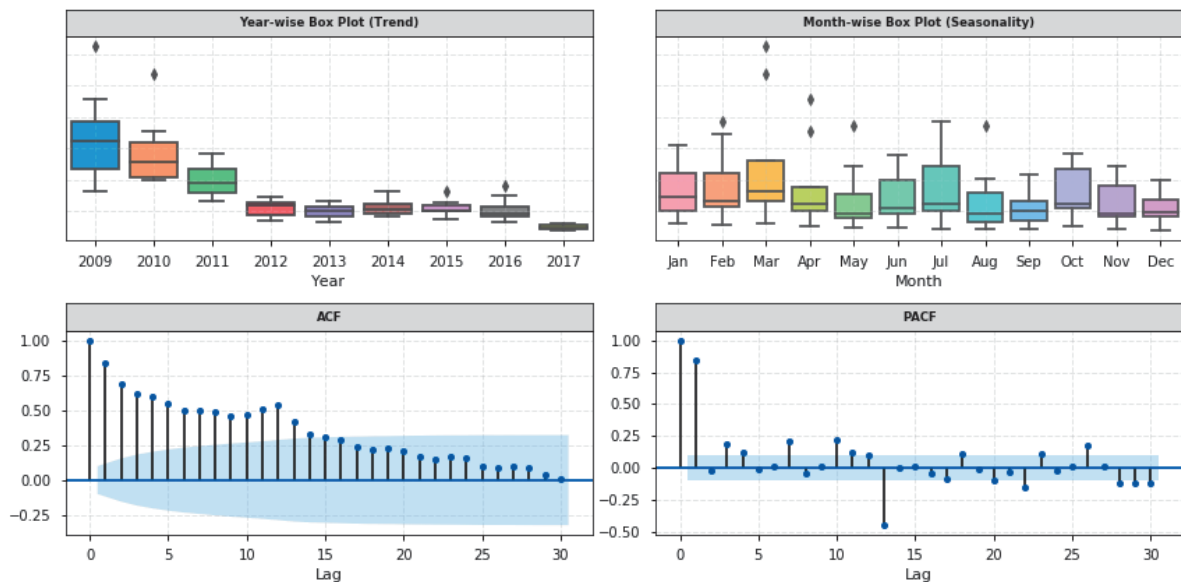


Figure 1.17 – Correlation plots and box plots.

The results of the stationarity tests performed are given in Table 1.6.

Table 1.6 – Results (p-values) of KPSS and ADF tests.

Series	KPSS	ADF
X_t	0.011	0.408
$\log(X_t + 1)$	< 0,01	0.882
$X_t - X_{t-1}$	> 0.1	0.015
$X_t - X_{t-12}$	> 0.1	0.572
$\log(X_t + 1) - \log(X_{t-1} + 1)$	> 0.1	0.118
$\log(X_t + 1) - \log(X_{t-12} + 1)$	> 0.1	0.232

The process fitted is a $\text{SARIMA}_{12}[(2,1,2)(1,0,0)]$. The diagnostics plots of the model are given in Figure 1.18.

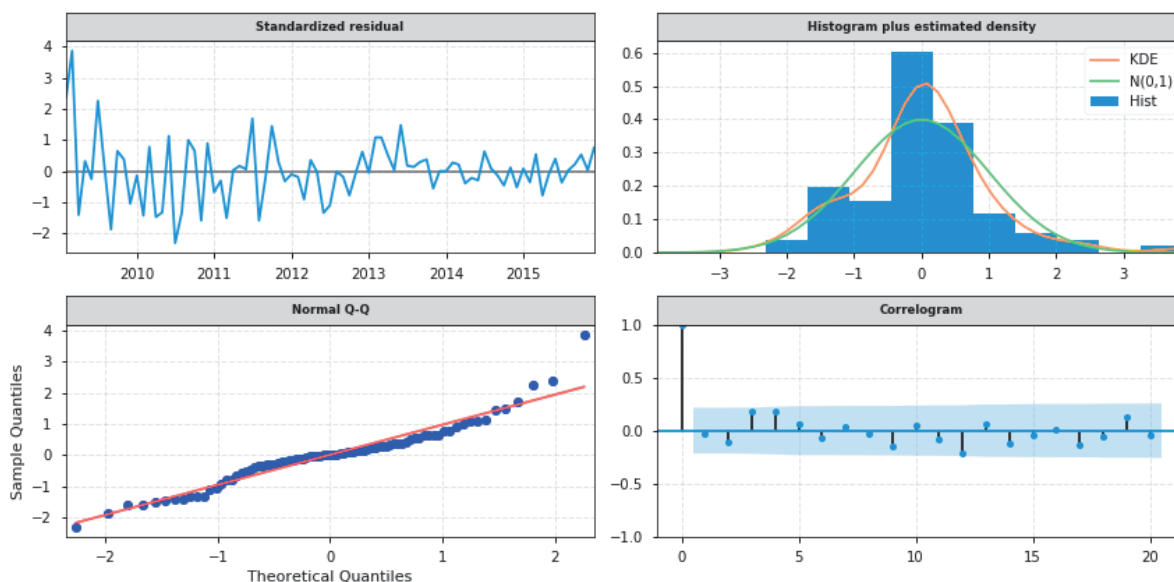


Figure 1.18 – Diagnostics plots.

The analysis of the diagnostics plots show a good fit with the data.

Product 4

The elements regarding product 4 are given in Figures 1.19 and 1.20.

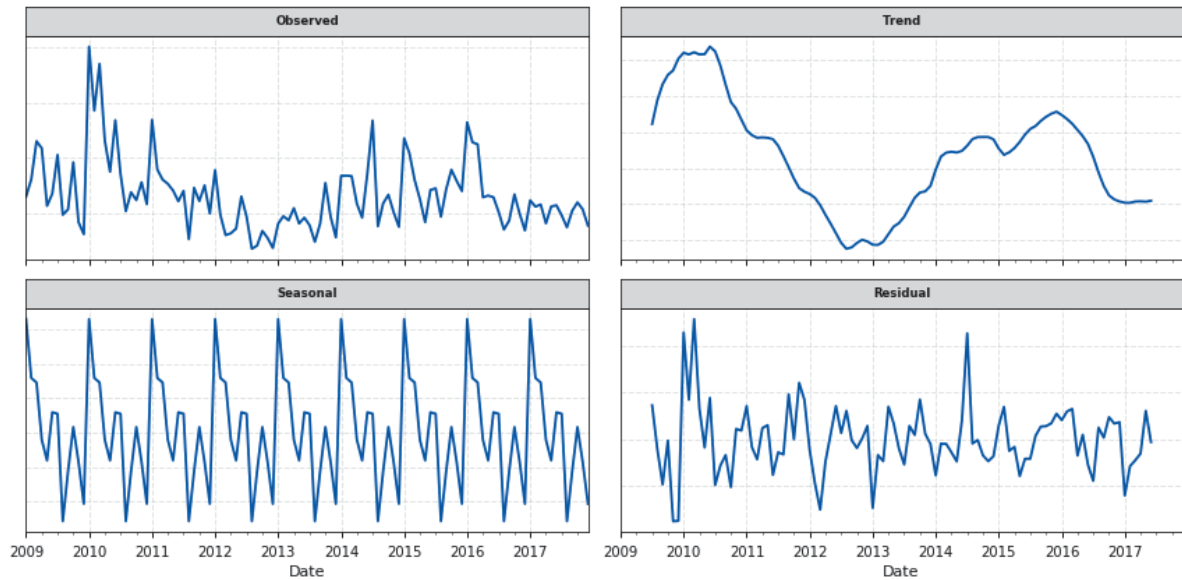


Figure 1.19 – Additive decomposition.

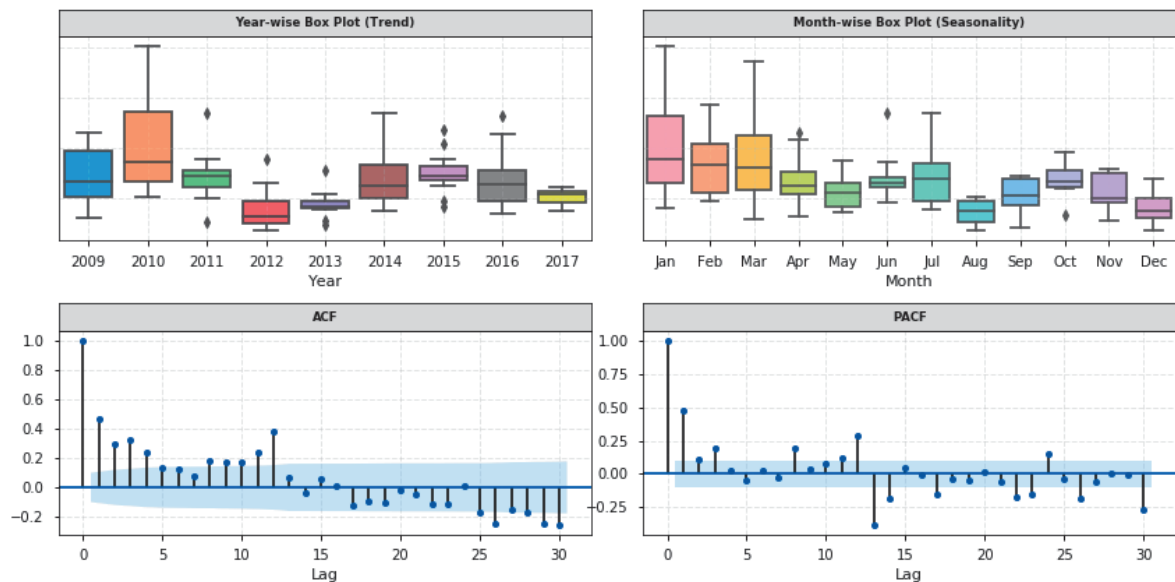


Figure 1.20 – Correlation plots and box plots.

The results of the stationarity tests performed are given in Table 1.7.

Table 1.7 – Results (p-values) of KPSS and ADF tests.

Series	KPSS	ADF
X_t	> 0.1	0.072
$\log(X_t + 1)$	> 0.1	0.222
$X_t - X_{t-1}$	> 0.1	0.001
$X_t - X_{t-12}$	> 0.1	< 0.001
$\log(X_t + 1) - \log(X_{t-1} + 1)$	> 0.1	0.014
$\log(X_t + 1) - \log(X_{t-12} + 1)$	> 0.1	0.150

The process fitted is a $\text{SARIMA}_{12}[(1,0,3)(3,1,1)]$. The diagnostics plots of the model are given in Figure 1.21.

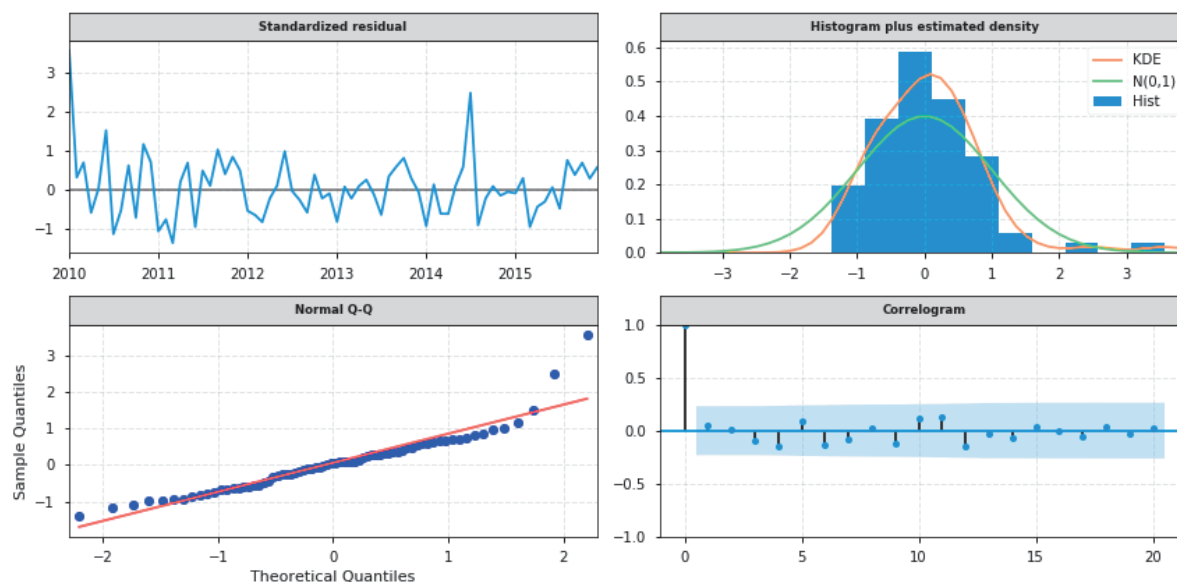


Figure 1.21 – Diagnostics plots.

The analysis of the diagnostics plots show a good fit with the data.

Product 5

The elements regarding product 5 are given in Figures 1.22 and 1.23.

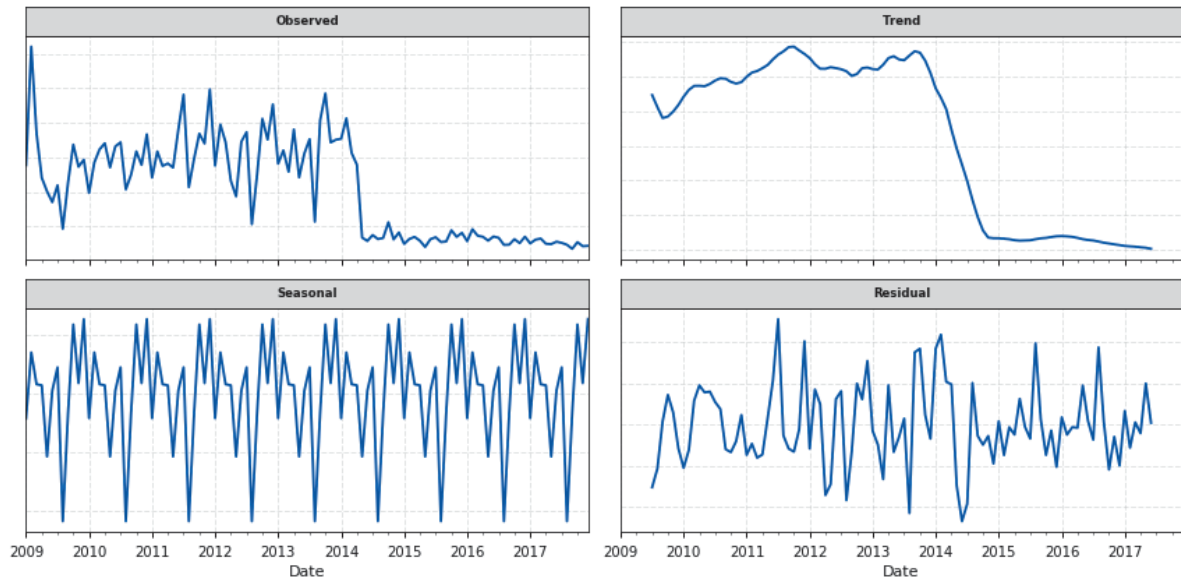


Figure 1.22 – Additive decomposition.

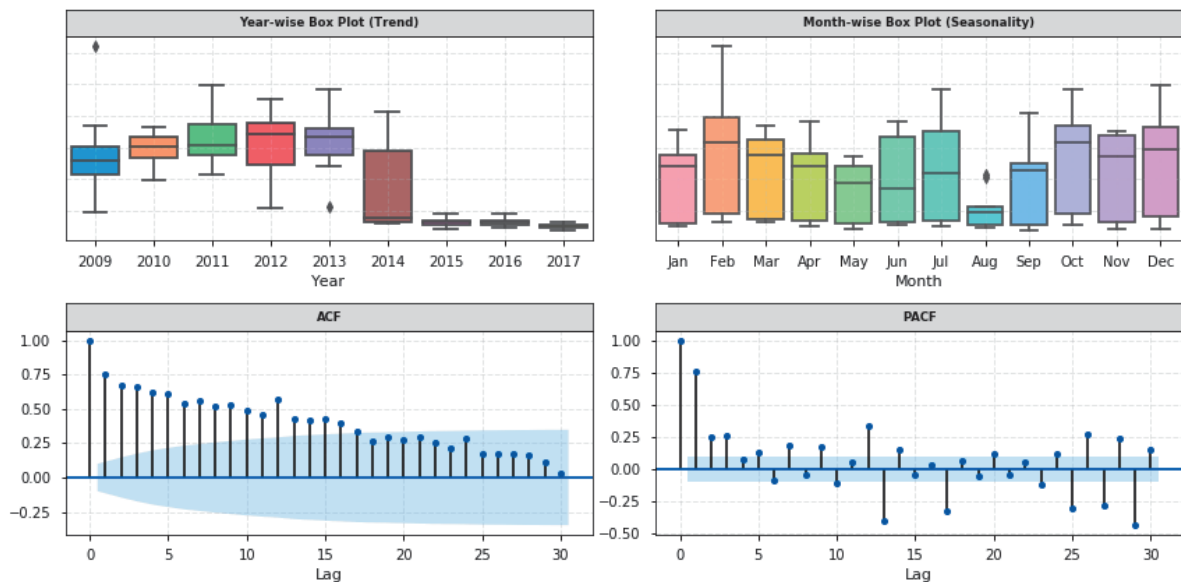


Figure 1.23 – Correlation plots and box plots.

The results of the stationarity tests performed are given in Table 1.8.

Table 1.8 – Results (p-values) of KPSS and ADF tests.

Series	KPSS	ADF
X_t	0.017	0.840
$\log(X_t + 1)$	0.013	0.884
$X_t - X_{t-1}$	> 0.1	0.025
$X_t - X_{t-12}$	> 0.1	0.255
$\log(X_t + 1) - \log(X_{t-1} + 1)$	> 0.1	0.103
$\log(X_t + 1) - \log(X_{t-12} + 1)$	> 0.1	0.036

The process fitted is a $\text{SARIMA}_{12}[(0,1,2)(1,0,0)]$. The diagnostics plots of the model are given in Figure 1.24.

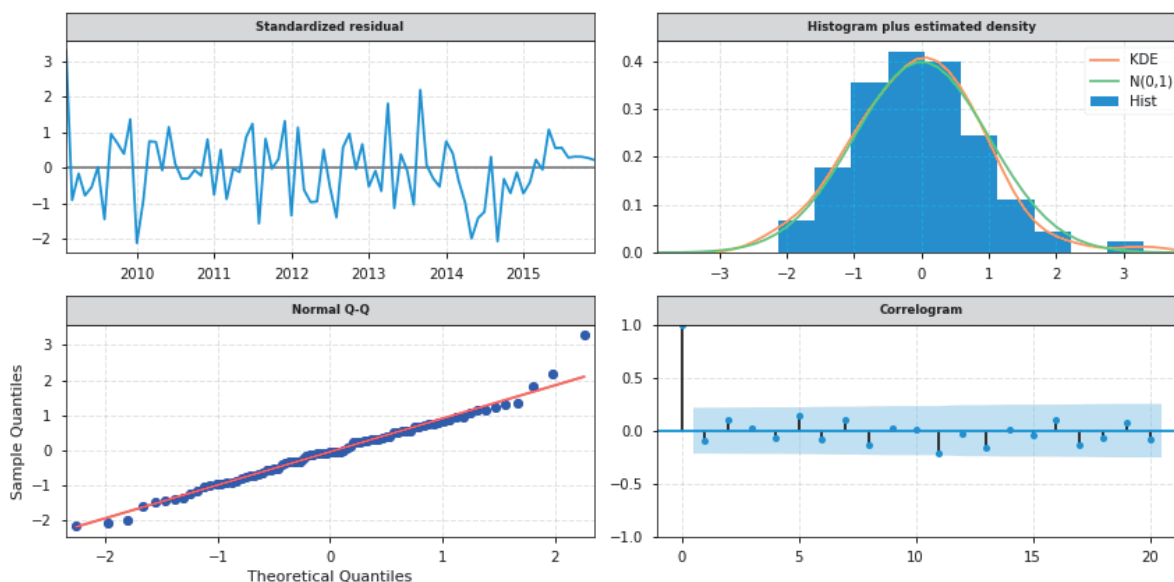


Figure 1.24 – Diagnostics plots.

The analysis of the diagnostics plots show a good fit with the data.

Product 6

The elements regarding product 6 are given in Figures 1.25 and 1.26.

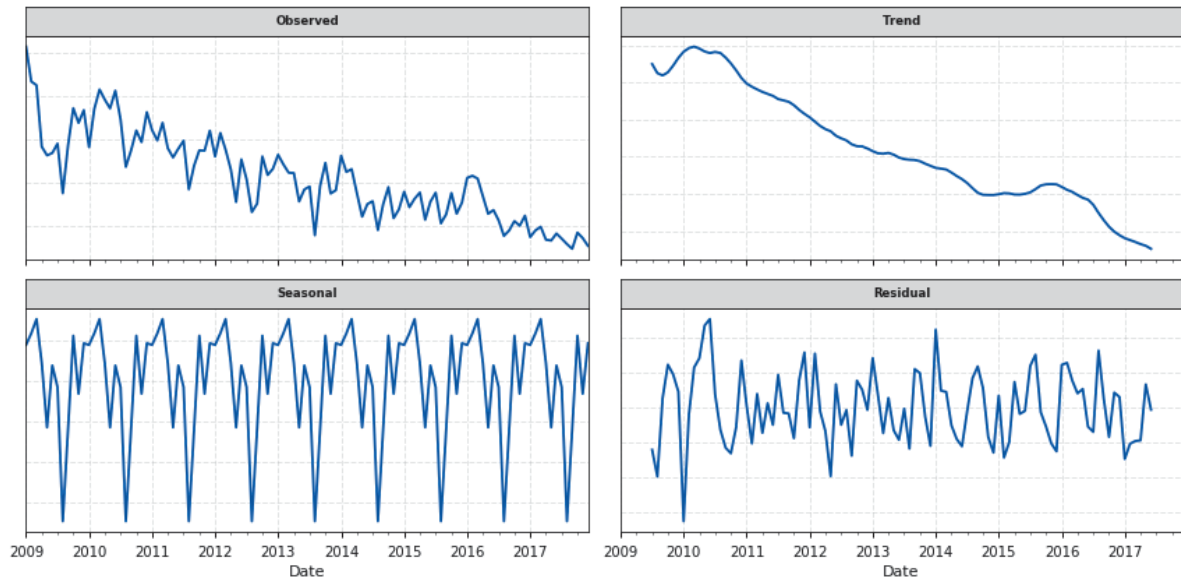


Figure 1.25 – Additive decomposition.

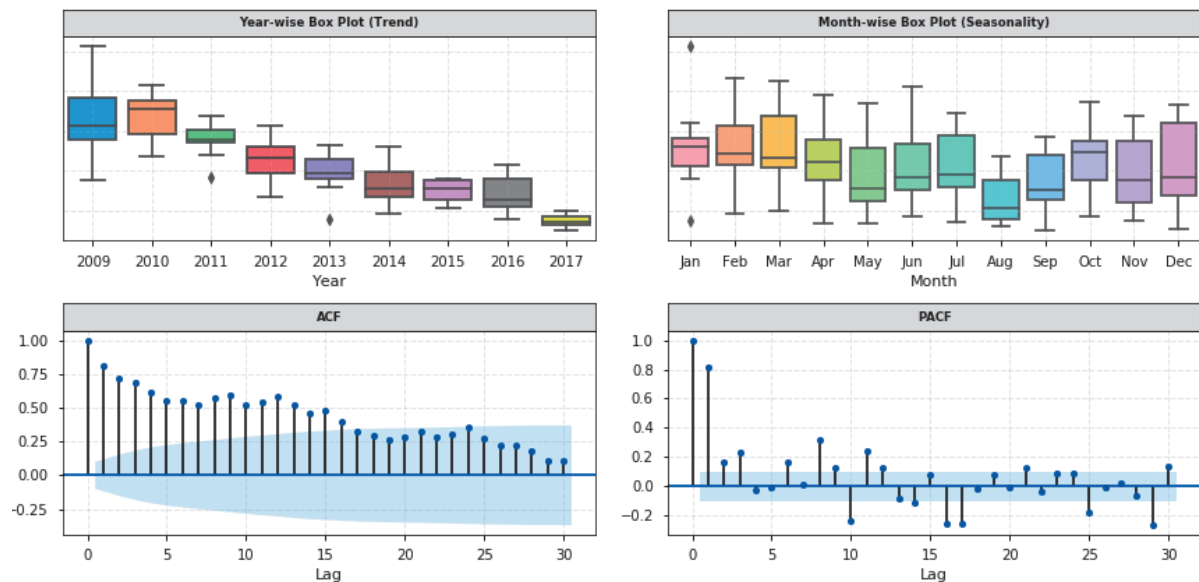


Figure 1.26 – Correlation plots and box plots.

The results of the stationarity tests performed are given in Table 1.9.

Table 1.9 – Results (p-values) of KPSS and ADF tests.

Series	KPSS	ADF
X_t	< 0.01	0.982
$\log(X_t + 1)$	< 0.01	0.995
$X_t - X_{t-1}$	> 0.1	< 0.001
$X_t - X_{t-12}$	> 0.1	0.036
$\log(X_t + 1) - \log(X_{t-1} + 1)$	> 0.1	0.060
$\log(X_t + 1) - \log(X_{t-12} + 1)$	> 0.1	0.002

The process fitted is a $\text{SARIMA}_{12}[(3,1,3)(1,0,1)]$. The diagnostics plots of the model are given in Figure 1.27.

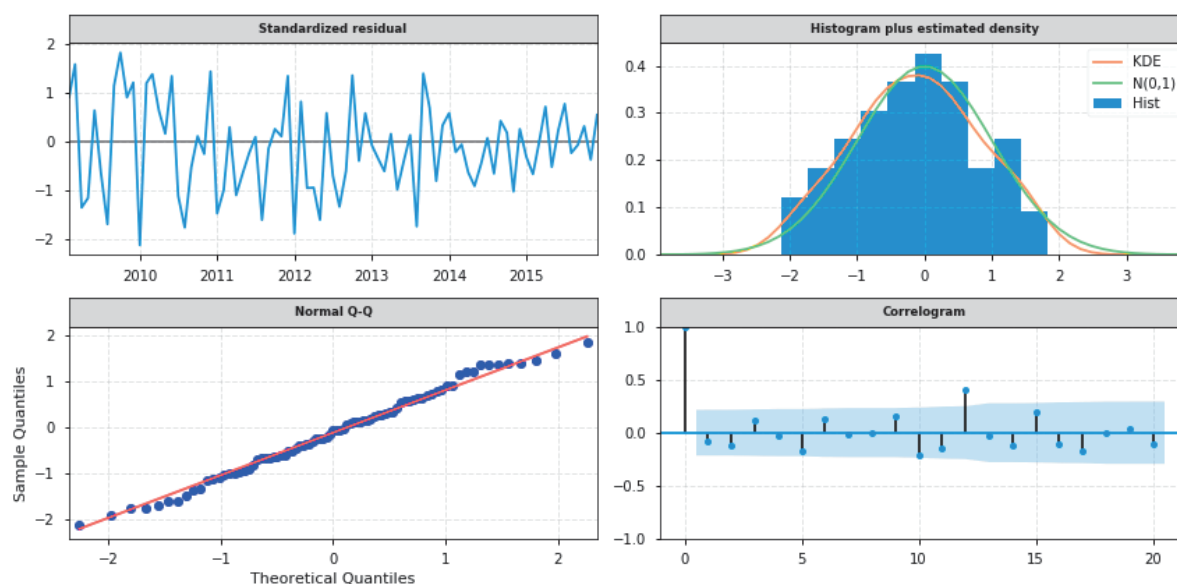


Figure 1.27 – Diagnostics plots.

The analysis of the diagnostics plots show a good fit with the data.

Product 7

The elements regarding product 7 are given in Figures 1.28 and 1.29.

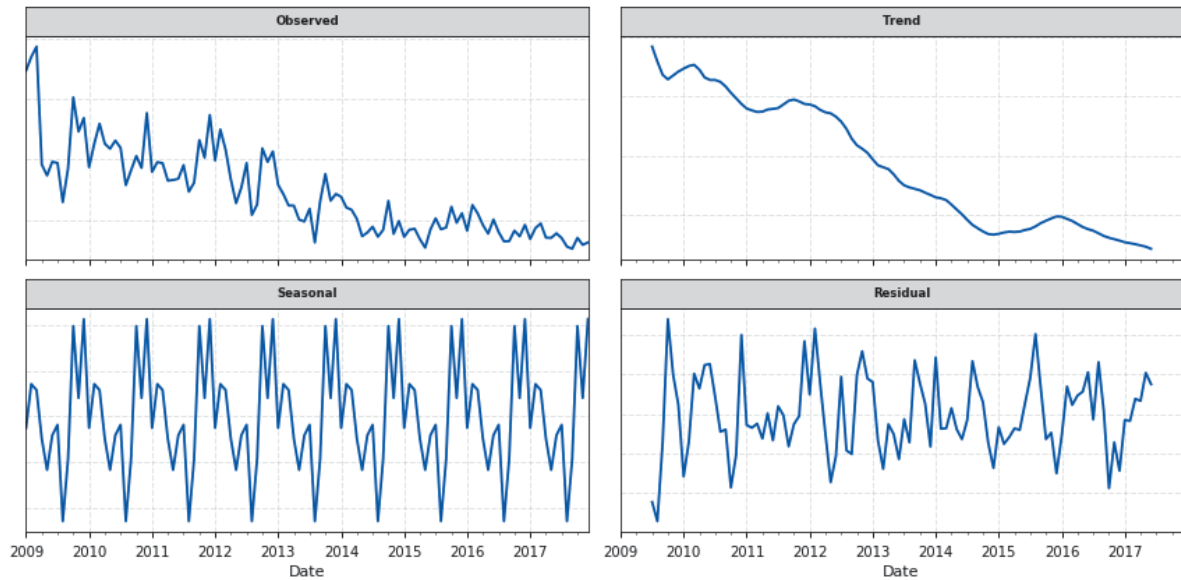


Figure 1.28 – Additive decomposition.

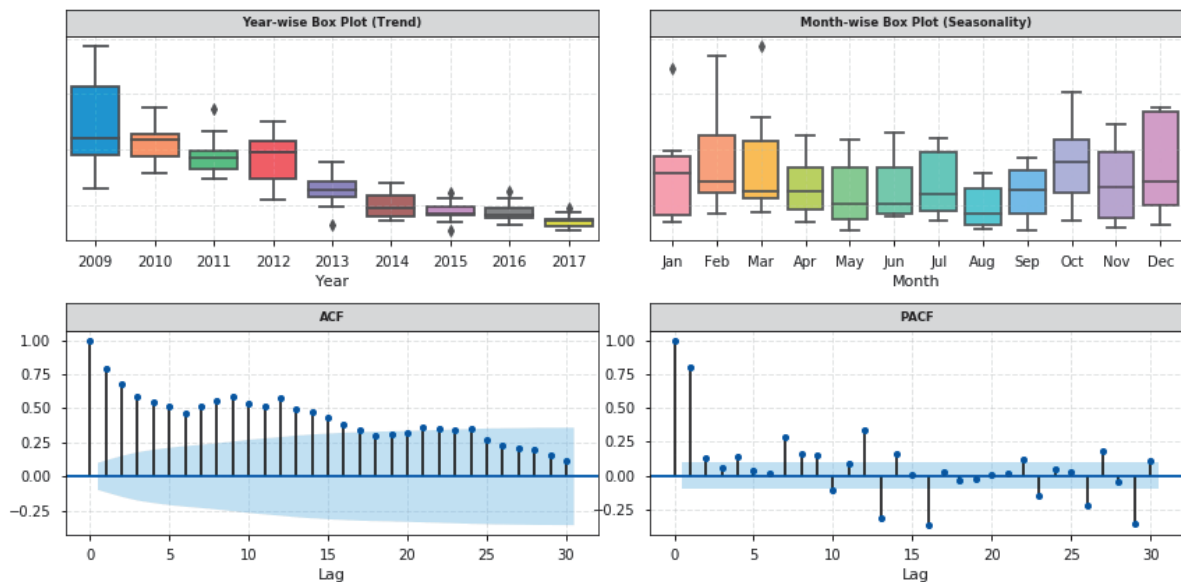


Figure 1.29 – Correlation plots and box plots.

The results of the stationarity tests performed are given in Table 1.10.

Table 1.10 – Results (p-values) of KPSS and ADF tests.

Series	KPSS	ADF
X_t	< 0.01	0.834
$\log(X_t + 1)$	< 0.01	0.955
$X_t - X_{t-1}$	> 0.1	< 0.001
$X_t - X_{t-12}$	> 0.1	< 0.001
$\log(X_t + 1) - \log(X_{t-1} + 1)$	> 0.1	0.005
$\log(X_t + 1) - \log(X_{t-12} + 1)$	> 0.1	< 0.001

The process fitted is a $\text{SARIMA}_{12}[(3,0,3)(1,1,1)]$. The diagnostics plots of the model are given in Figure 1.30.

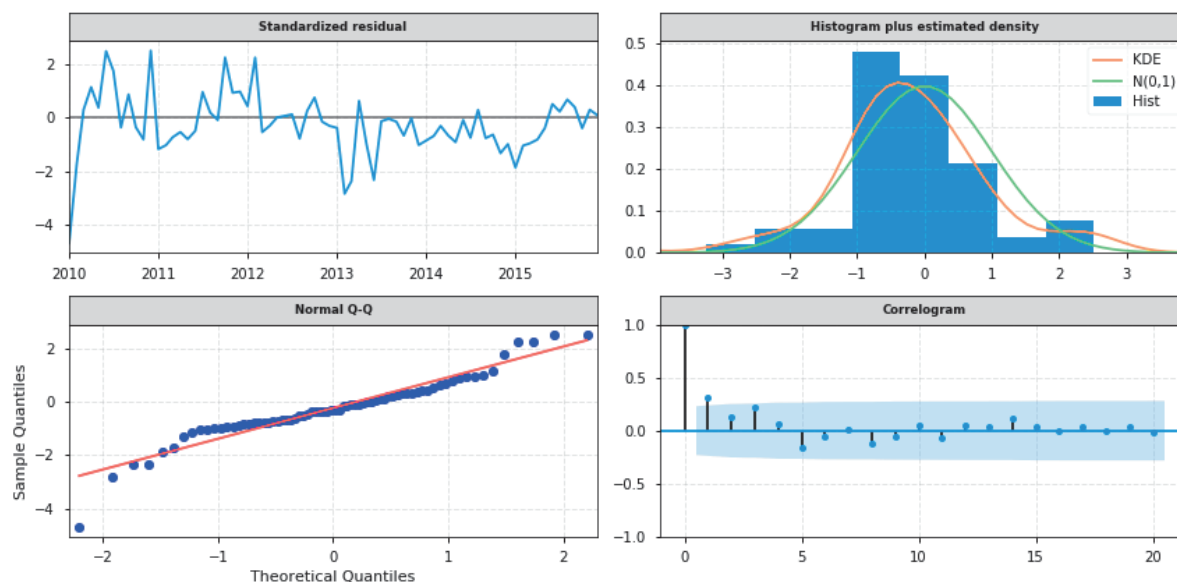


Figure 1.30 – Diagnostics plots.

The analysis of the diagnostics plots show a good fit with the data.

Product 8

The elements regarding product 8 are given in Figures 1.31 and 1.32.

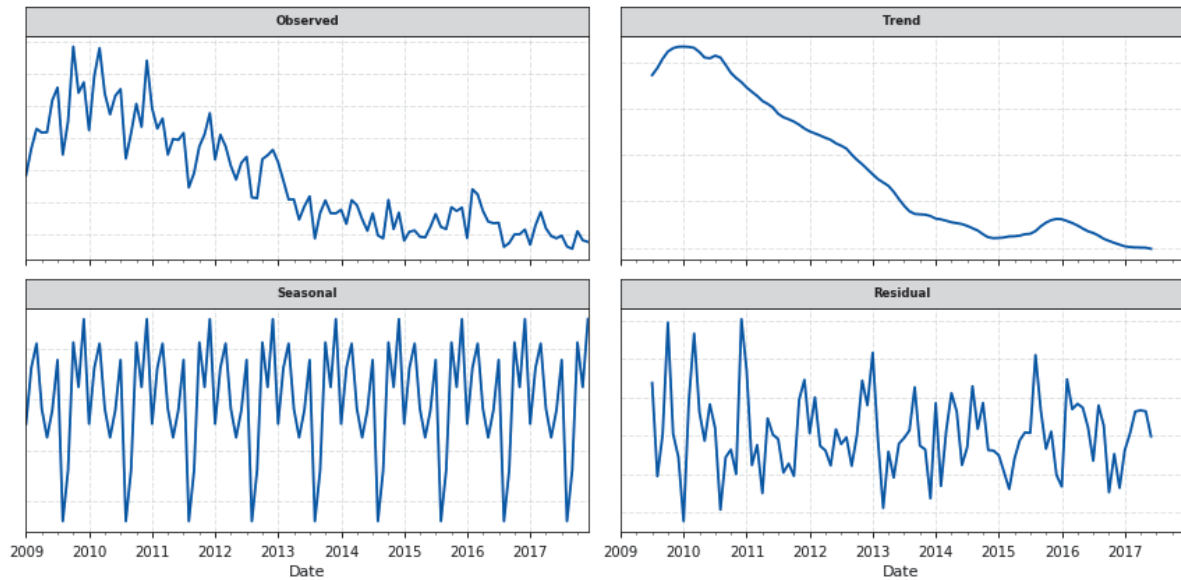


Figure 1.31 – Additive decomposition.

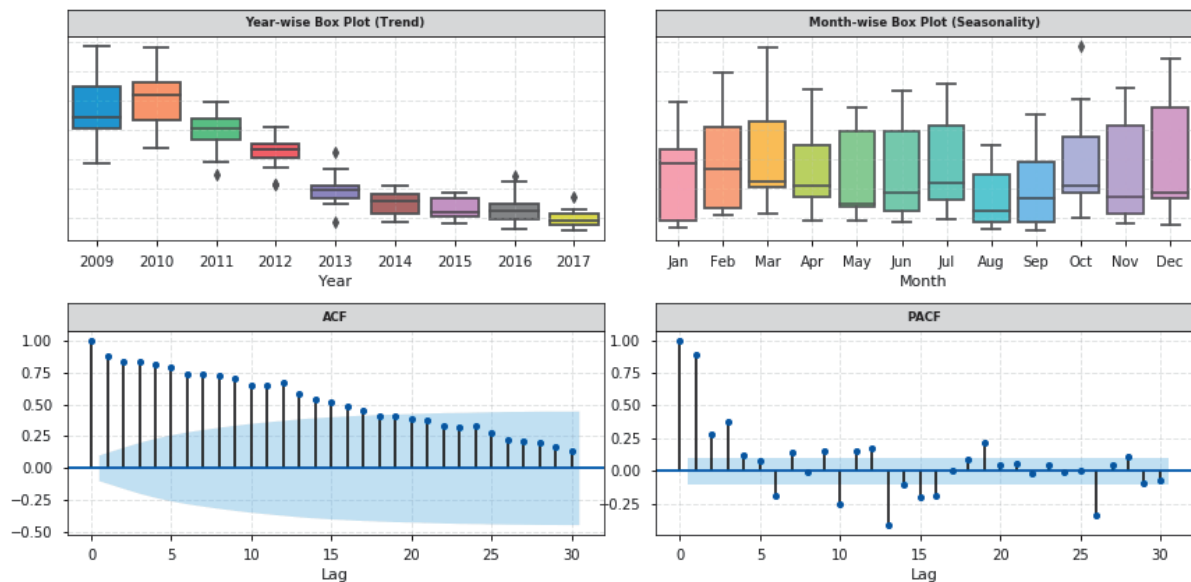


Figure 1.32 – Correlation plots and box plots.

The results of the stationarity tests performed are given in Table 1.11.

Table 1.11 – Results (p-values) of KPSS and ADF tests.

Series	KPSS	ADF
X_t	< 0.01	0.607
$\log(X_t + 1)$	< 0.01	0.723
$X_t - X_{t-1}$	> 0.1	0.011
$X_t - X_{t-12}$	> 0.1	0.033
$\log(X_t + 1) - \log(X_{t-1} + 1)$	> 0.1	0.018
$\log(X_t + 1) - \log(X_{t-12} + 1)$	> 0.1	0.005

The process fitted is a $\text{SARIMA}_{12}[(1,0,1)(0,1,1)]$. The diagnostics plots of the model are given in Figure 1.33.

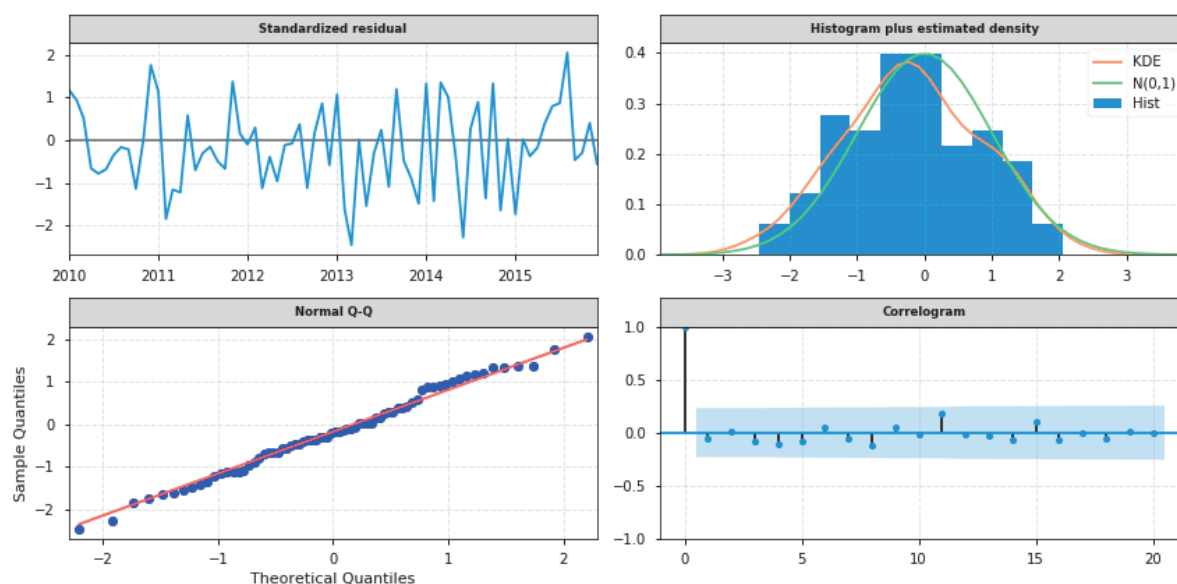


Figure 1.33 – Diagnostics plots.

The analysis of the diagnostics plots show a good fit with the data.

Product 9

The elements regarding product 9 are given in Figures 1.34 and 1.35.

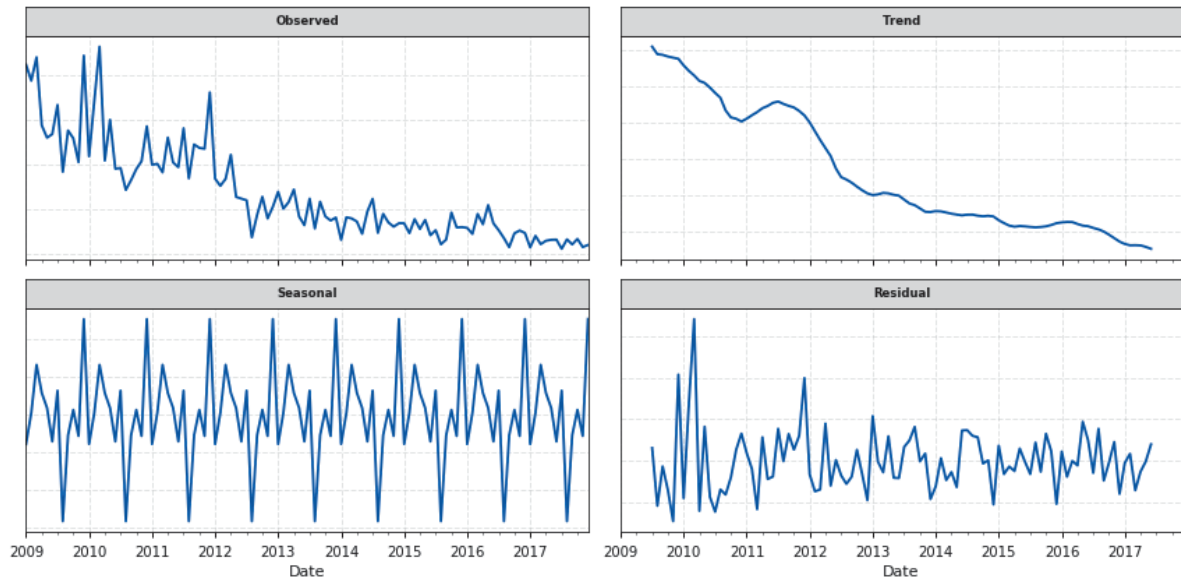


Figure 1.34 – Additive decomposition.

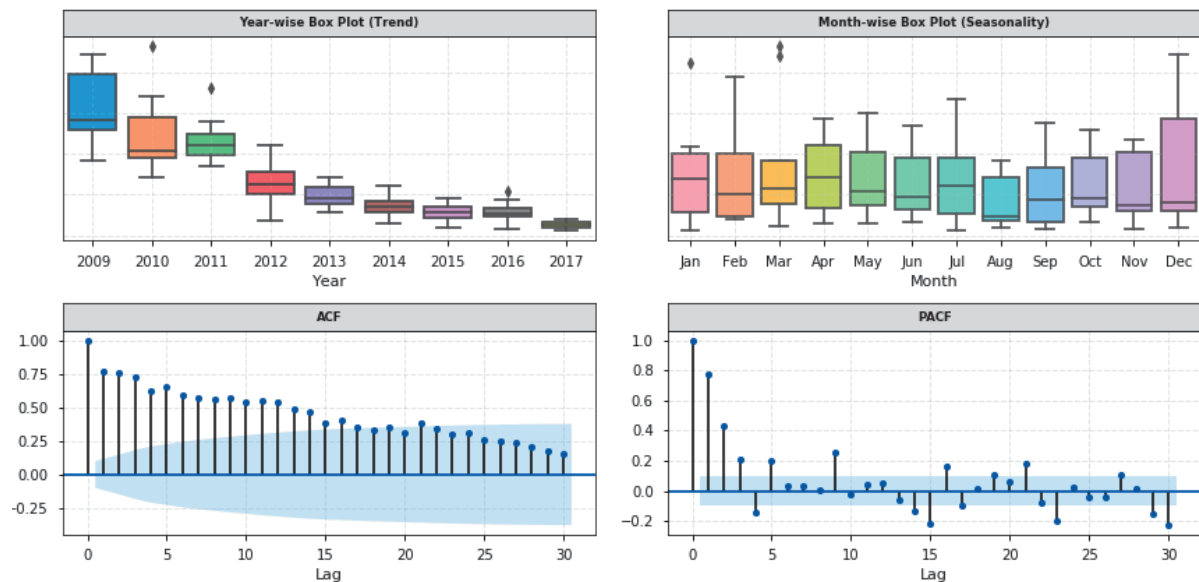


Figure 1.35 – Correlation plots and box plots.

The results of the stationarity tests performed are given in Table 1.12.

Table 1.12 – Results (p-values) of KPSS and ADF tests.

Series	KPSS	ADF
X_t	< 0.01	0.244
$\log(X_t + 1)$	< 0.01	0.974
$X_t - X_{t-1}$	> 0.1	< 0.001
$X_t - X_{t-12}$	> 0.1	0.006
$\log(X_t + 1) - \log(X_{t-1} + 1)$	> 0.1	< 0,001
$\log(X_t + 1) - \log(X_{t-12} + 1)$	> 0.1	< 0.001

The process fitted is a $\text{SARIMA}_{12}[(0,1,1)(0,0,0)]$. The diagnostics plots of the model are given in Figure 1.36.

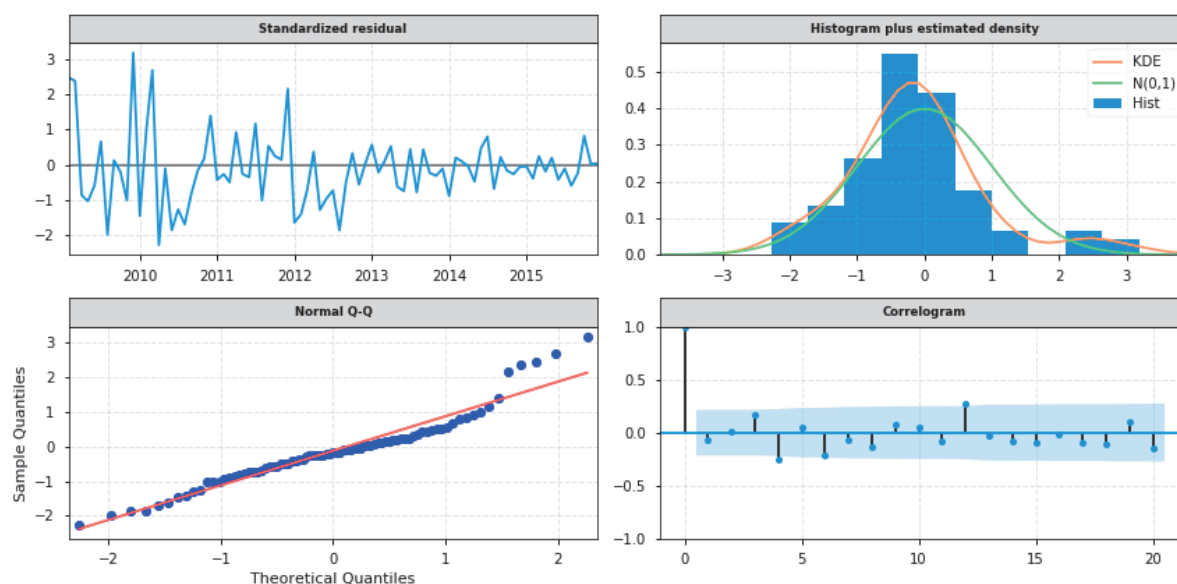


Figure 1.36 – Diagnostics plots.

The analysis of the diagnostics plots show a good fit with the data.

Product 10

The elements regarding product 10 are given in Figures 1.37 and 1.38.

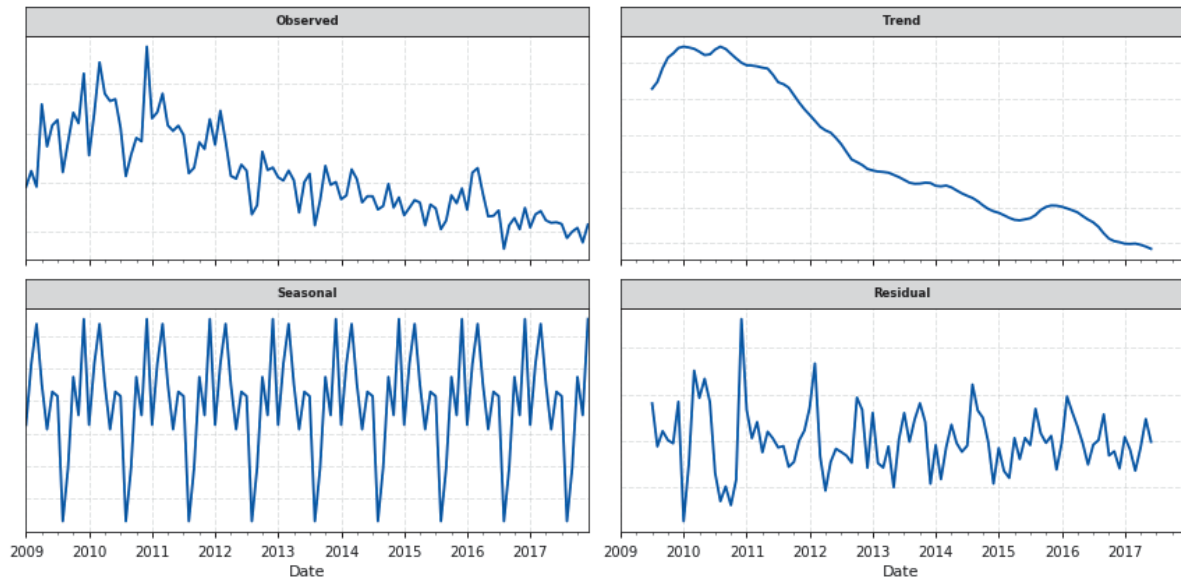


Figure 1.37 – Additive decomposition.

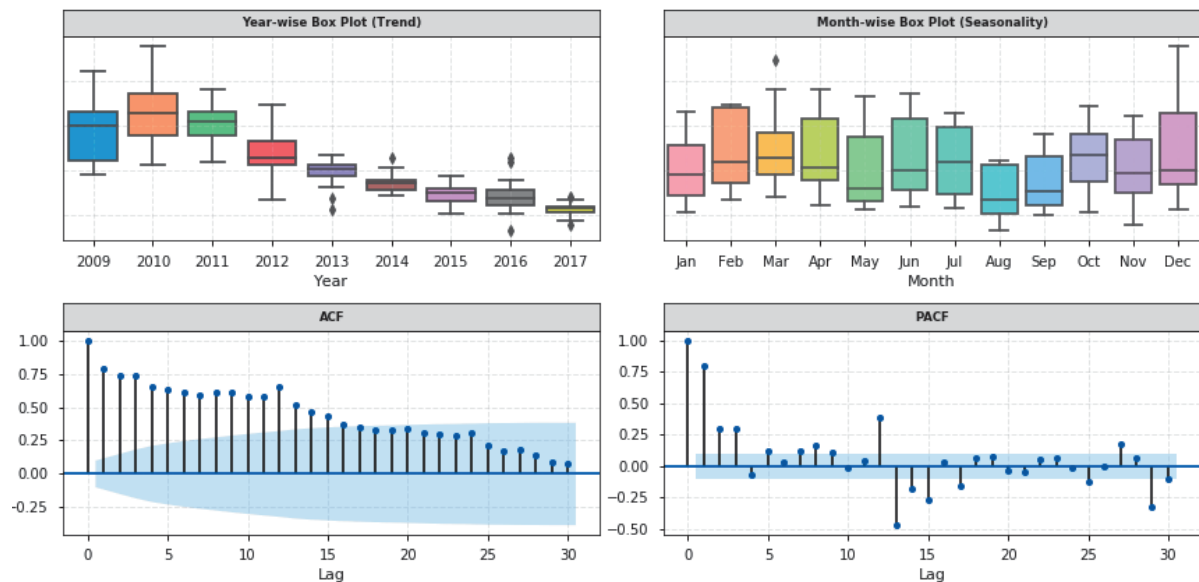


Figure 1.38 – Correlation plots and box plots.

The results of the stationarity tests performed are given in Table 1.13.

Table 1.13 – Results (p-values) of KPSS and ADF tests.

Series	KPSS	ADF
X_t	< 0.01	0,894
$\log(X_t + 1)$	< 0.01	0,970
$X_t - X_{t-1}$	> 0.1	< 0.001
$X_t - X_{t-12}$	> 0.1	< 0.001
$\log(X_t + 1) - \log(X_{t-1} + 1)$	> 0.1	< 0.001
$\log(X_t + 1) - \log(X_{t-12} + 1)$	> 0.1	< 0.001

The process fitted is a $SARIMA_{12}[(2,0,3)(1,1,1)]$. The diagnostics plots of the model are given in Figure 1.39.

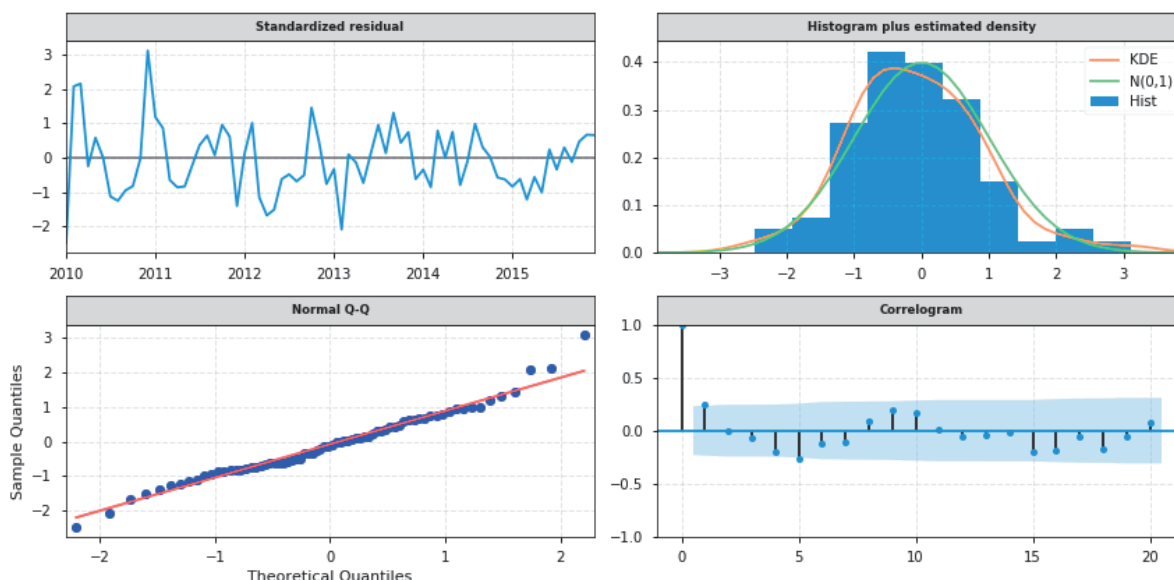


Figure 1.39 – Diagnostics plots.

The analysis of the diagnostics plots show a good fit with the data.

Results for 10 most important products

In this appendix, we provide the results obtained for the 10 main products. Overall, the machine learning methodology provides better forecasts than the time series methodology, but for some cases (Figures 1.43 and 1.49), it is the opposite. However, in those situations, the differences are slight.



Figure 1.40 – Comparison between GBRT and TS forecasts for product 1.

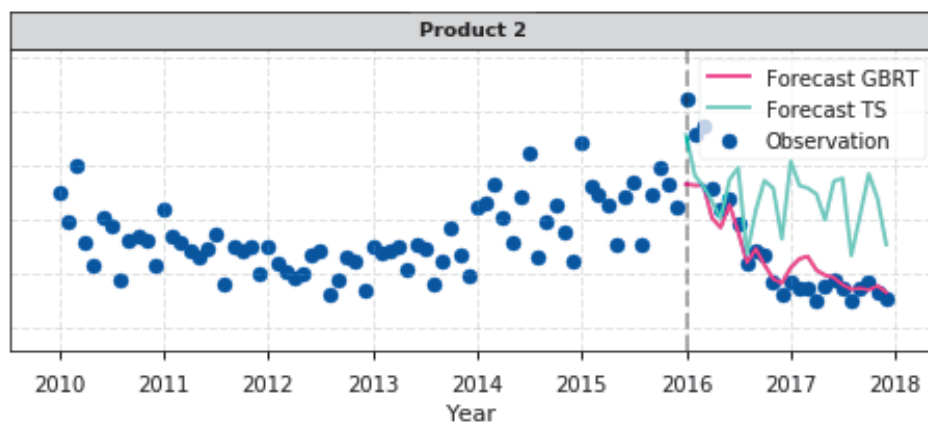


Figure 1.41 – Comparison between GBRT and TS forecasts for product 2.

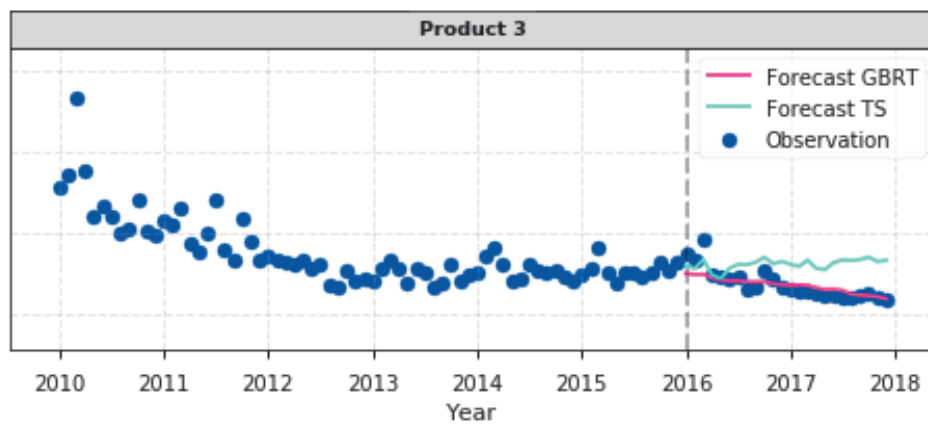


Figure 1.42 – Comparison between GBRT and TS forecasts for product 3.



Figure 1.43 – Comparison between GBRT and TS forecasts for product 4.



Figure 1.44 – Comparison between GBRT and TS forecasts for product 5.

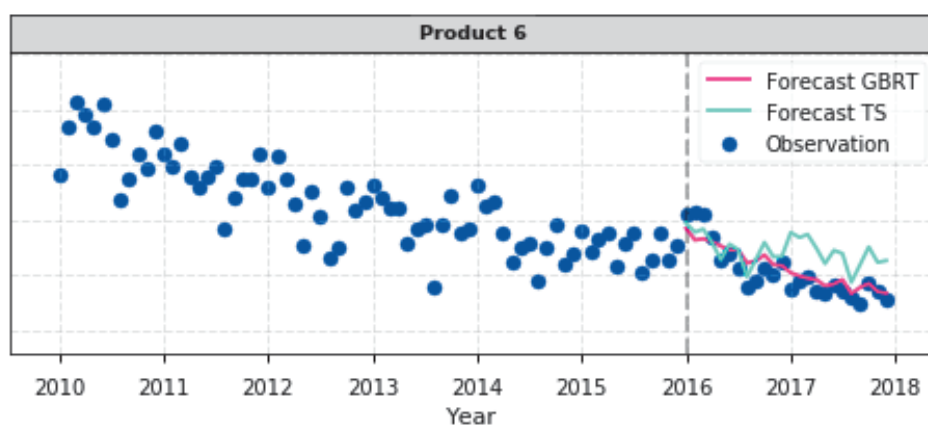


Figure 1.45 – Comparison between GBRT and TS forecasts for product 6.



Figure 1.46 – Comparison between GBRT and TS forecasts for product 7.



Figure 1.47 – Comparison between GBRT and TS forecasts for product 8.

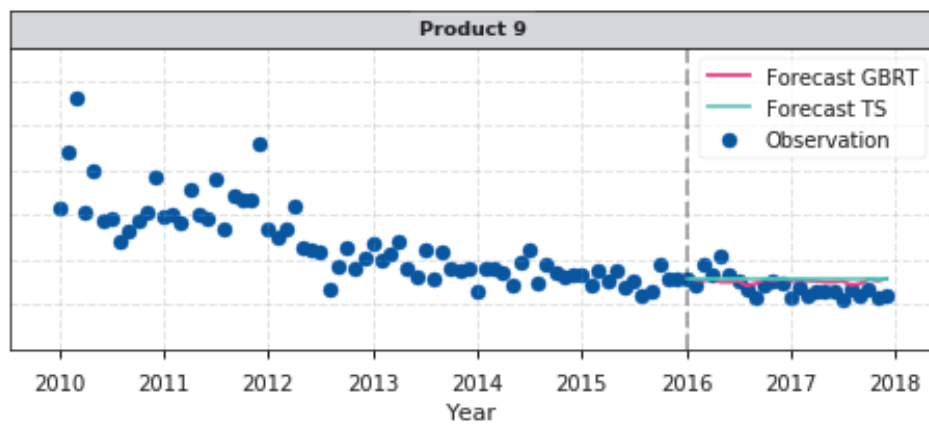


Figure 1.48 – Comparison between GBRT and TS forecasts for product 9.



Figure 1.49 – Comparison between GBRT and TS forecasts for product 10.

Comparison product by product

In this appendix, we display the results obtained for all models for the 10 main products in Table 1.14.

We note that while overall, the GBRT2 model (with dynamic led by the contracts variables) and GBRT3 model (with product-linked variables) improves the results, this does not mean that this is the case for all products. Indeed, for product 4, 5, 7, 9 and 10 (so half the products), the model GBRT1 is better... But in fact for most of these products (5, 7, 10) the gap is relatively small.

Table 1.14 – The RMSLE for the main products with the different models tested.

Product	RMSLE <i>GBRT1</i>	RMSLE <i>GBRT2</i>	RMSLE <i>GBRT3</i>	RMSLE <i>GBRT4</i>
1	0.17	0.24	0.15	0.24
2	0.62	0.27	0.30	0.52
3	0.43	0.29	0.24	0.21
4	0.23	0.75	0.64	0.21
5	0.15	0.21	0.17	0.26
6	0.32	0.53	0.22	0.45
7	0.21	0.51	0.26	0.20
8	0.15	0.15	0.15	0.22
9	0.53	0.95	0.71	0.90
10	0.20	0.27	0.33	0.44
<i>Main products</i>	0.22	0.19	0.15	0.20

Micro-level analysis with respect to some variables

In this appendix, we provide additional analyses regarding the link between behaviours. Namely, we analyze how the age at entry in the portfolio, the amount invested at entry and the amount invested in unit-linked vehicles impact the assessments of Section 1.5.2. Recall that the products are different (entry fee of 75€ vs. 25,000€) and the populations too (product 1 younger at entry: 45 vs 55 years).

Product 1

Age at entry Figures 1.50, 1.51 and 1.52 provide the evolution of the quantities $\alpha_{i,j}$, $\beta_{i,j}$, $\gamma_{i,j}$ and $\delta_{i,j}$ for different ages at entry in the portfolio. We remark that no matter the age considered, we find the fact that past payers are more susceptible to make a payment in the future (investment profile). The age seems to have an impact as $\alpha_{i,j}$ seems to be greater for younger ages.

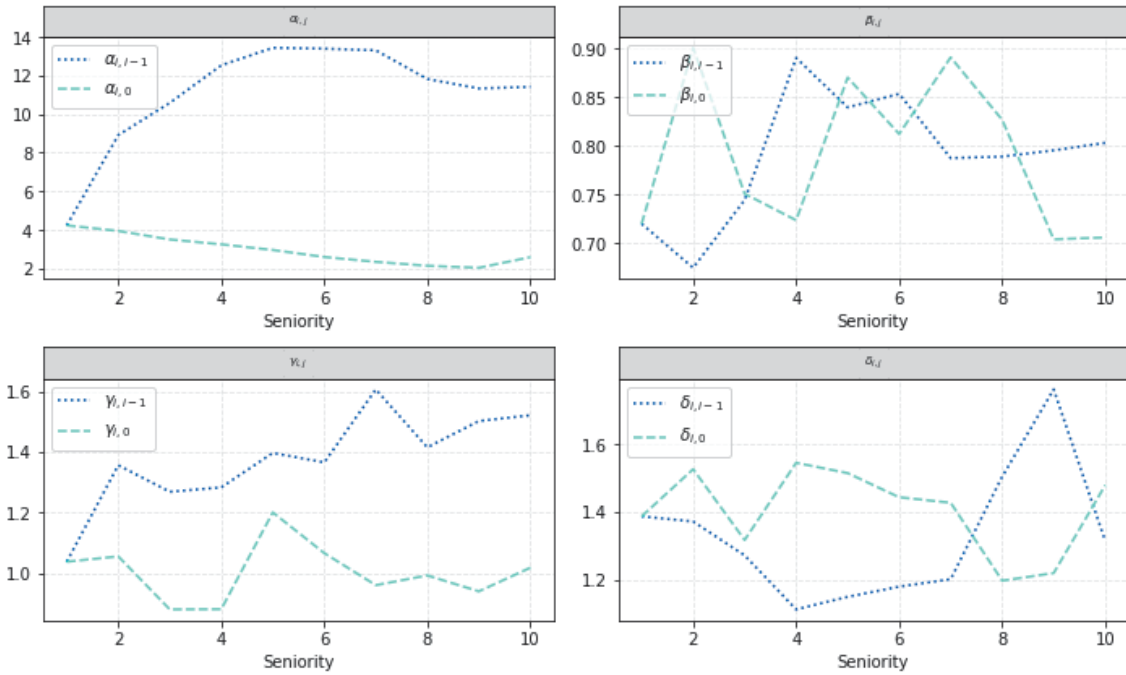


Figure 1.50 – $\alpha_{i,j}$, $\beta_{i,j}$, $\gamma_{i,j}$ and $\delta_{i,j}$ for age at entry lesser than 40.

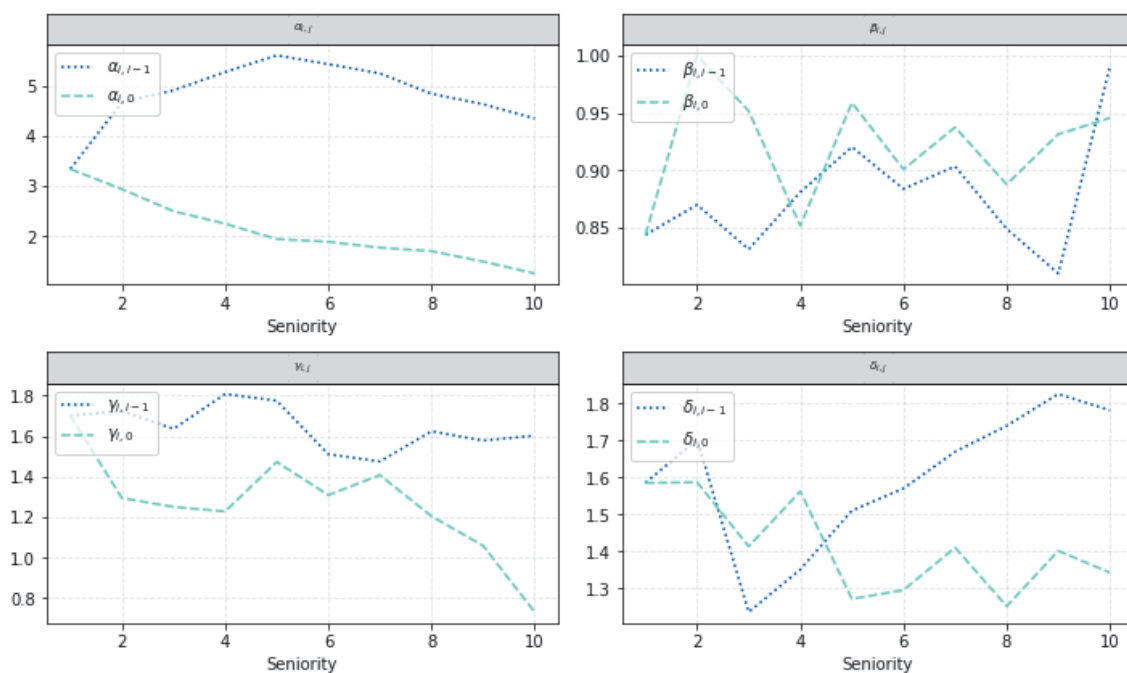


Figure 1.51 – $\alpha_{i,j}$, $\beta_{i,j}$, $\gamma_{i,j}$ and $\delta_{i,j}$ for age at entry between 40 and 60.

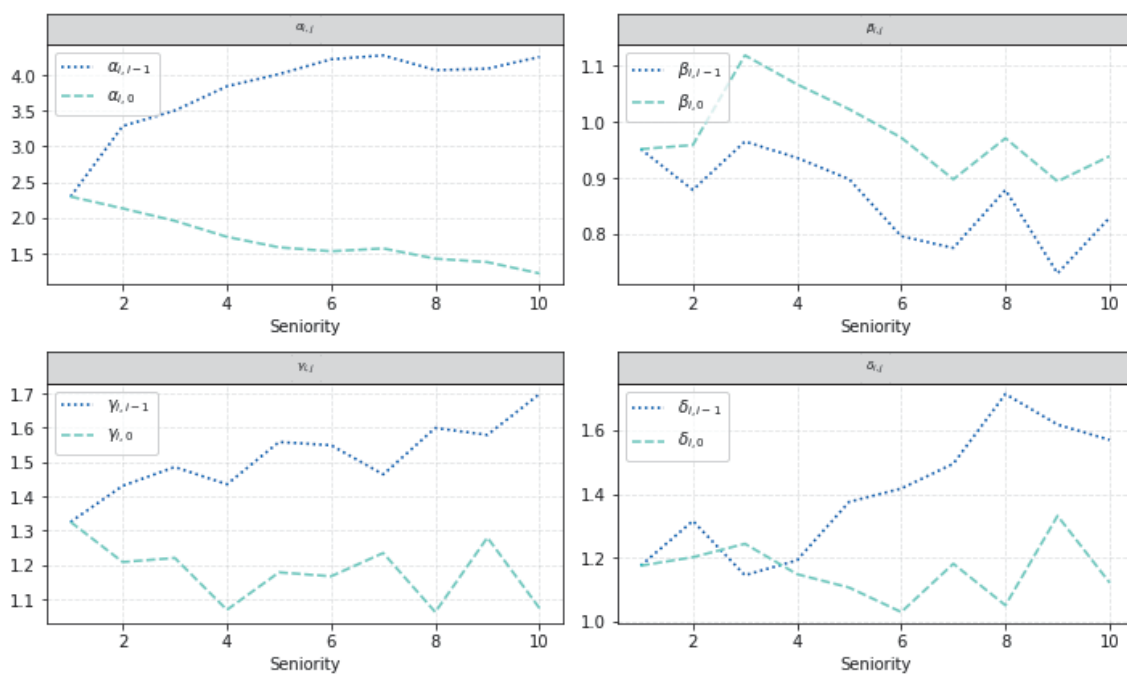


Figure 1.52 – $\alpha_{i,j}$, $\beta_{i,j}$, $\gamma_{i,j}$ and $\delta_{i,j}$ for age at entry greater than 60.

Amount at entry Figures 1.53, 1.54 and 1.55 provide the evolution of the quantities $\alpha_{i,j}$, $\beta_{i,j}$, $\gamma_{i,j}$ and $\delta_{i,j}$ for different amount at entry in the portfolio. The conclusions are quite similar to those by age regarding payers: they constitute a particular investor subpopulation.

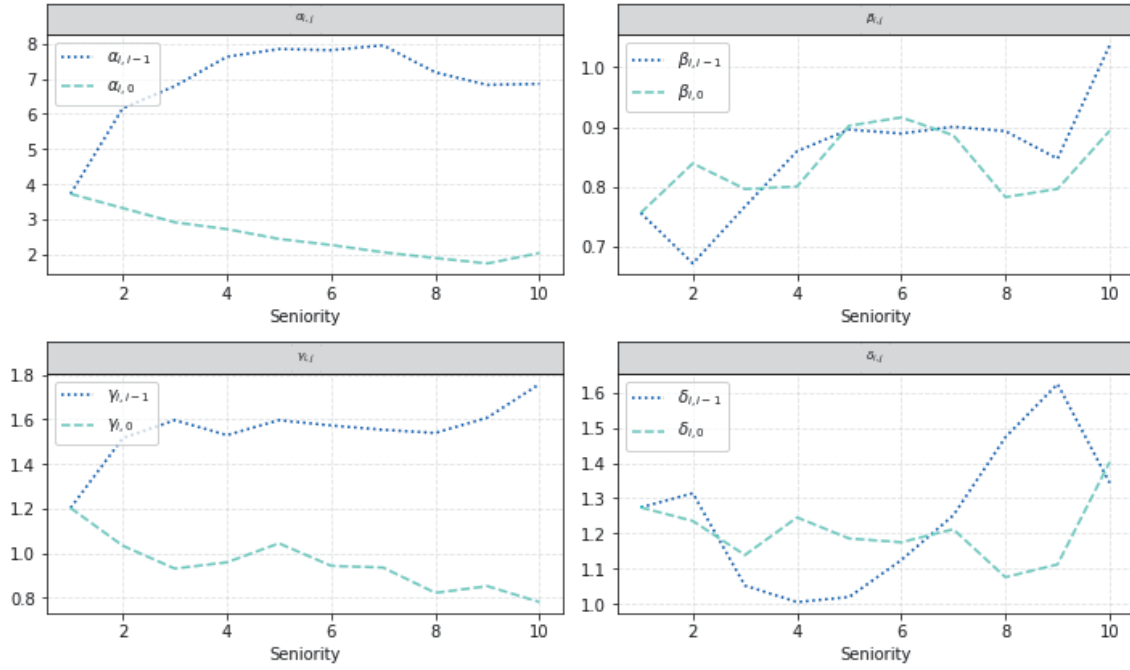


Figure 1.53 – $\alpha_{i,j}$, $\beta_{i,j}$, $\gamma_{i,j}$ and $\delta_{i,j}$ for amount at entry lesser than 2,000€.

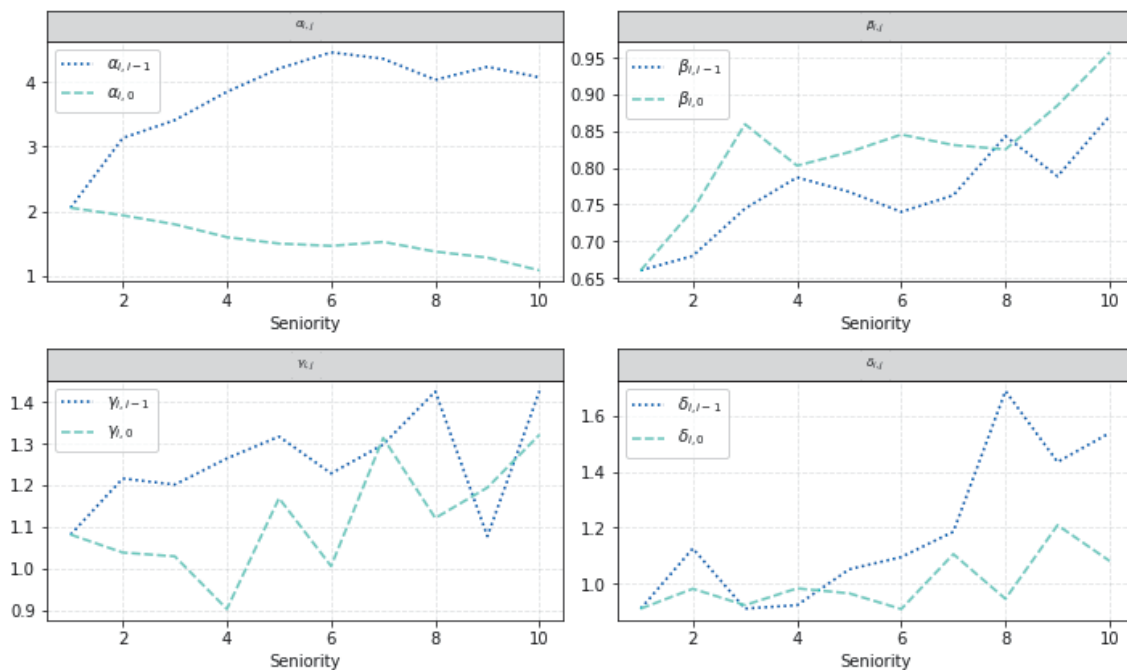


Figure 1.54 – $\alpha_{i,j}$, $\beta_{i,j}$, $\gamma_{i,j}$ and $\delta_{i,j}$ for amount at entry greater than 2,000€ and lesser than 10,000€.

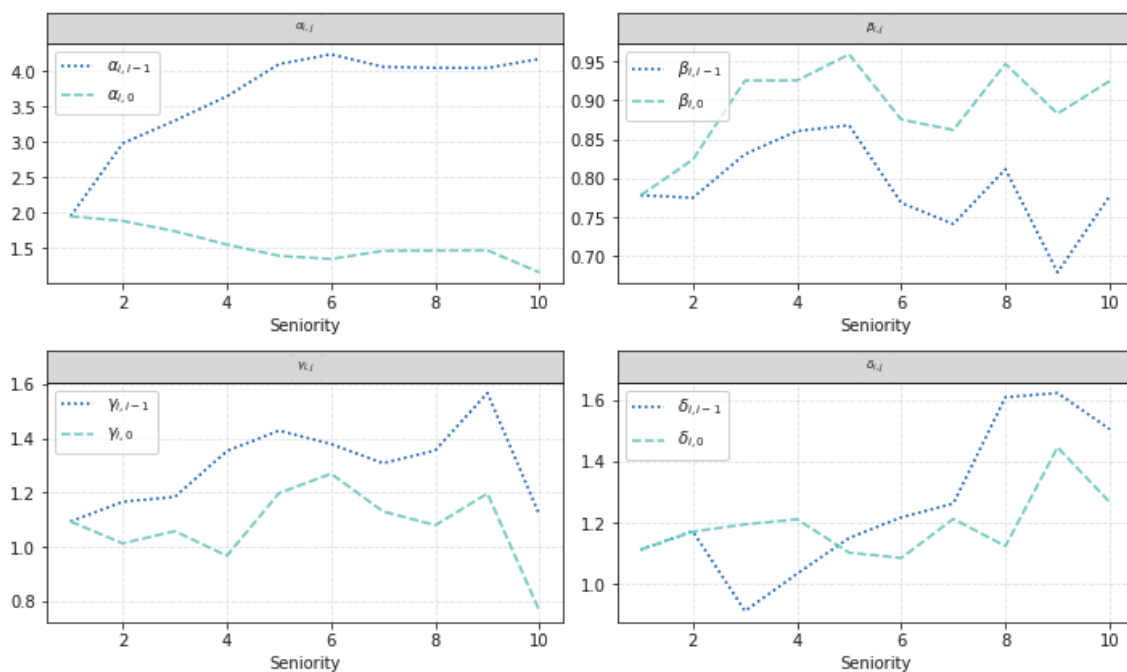


Figure 1.55 – $\alpha_{i,j}$, $\beta_{i,j}$, $\gamma_{i,j}$ and $\delta_{i,j}$ for for amount at entry greater than 10,000€.

Amount invested in unit-linked vehicles at entry Figures 1.56, 1.57 and 1.58 provide the evolution of the quantities $\alpha_{i,j}$, $\beta_{i,j}$, $\gamma_{i,j}$ and $\delta_{i,j}$ for different amount invested in unit-linked vehicles at the entry in the portfolio. The conclusions are similar to those stated previously.

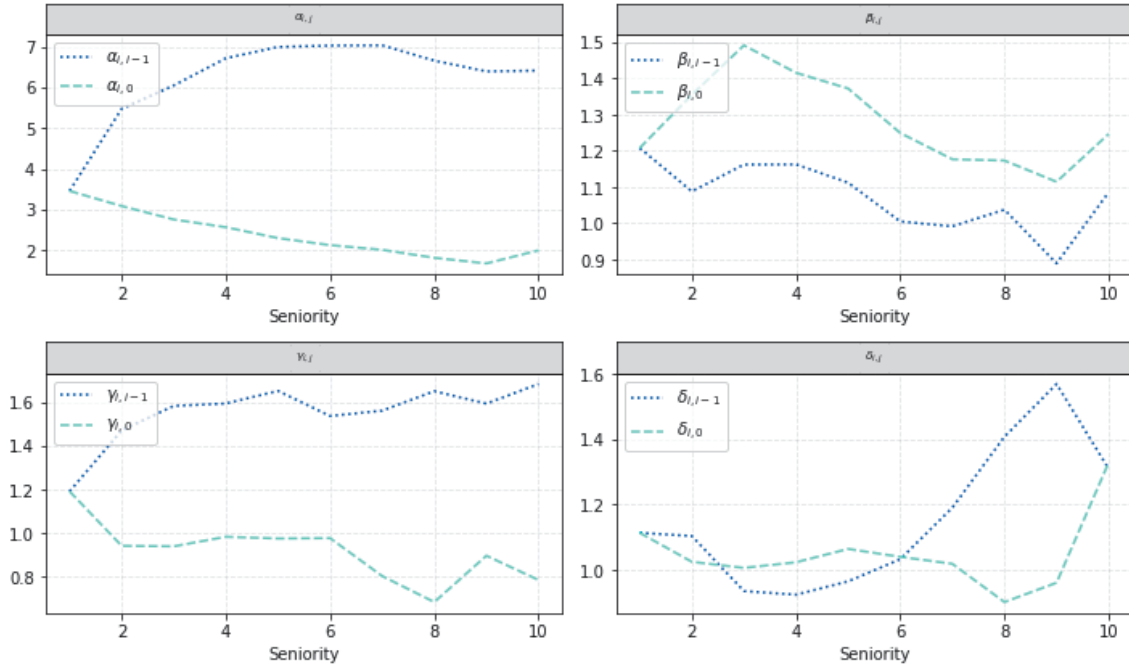


Figure 1.56 – $\alpha_{i,j}$, $\beta_{i,j}$, $\gamma_{i,j}$ and $\delta_{i,j}$ for investment in UC at entry lesser than 200 €.

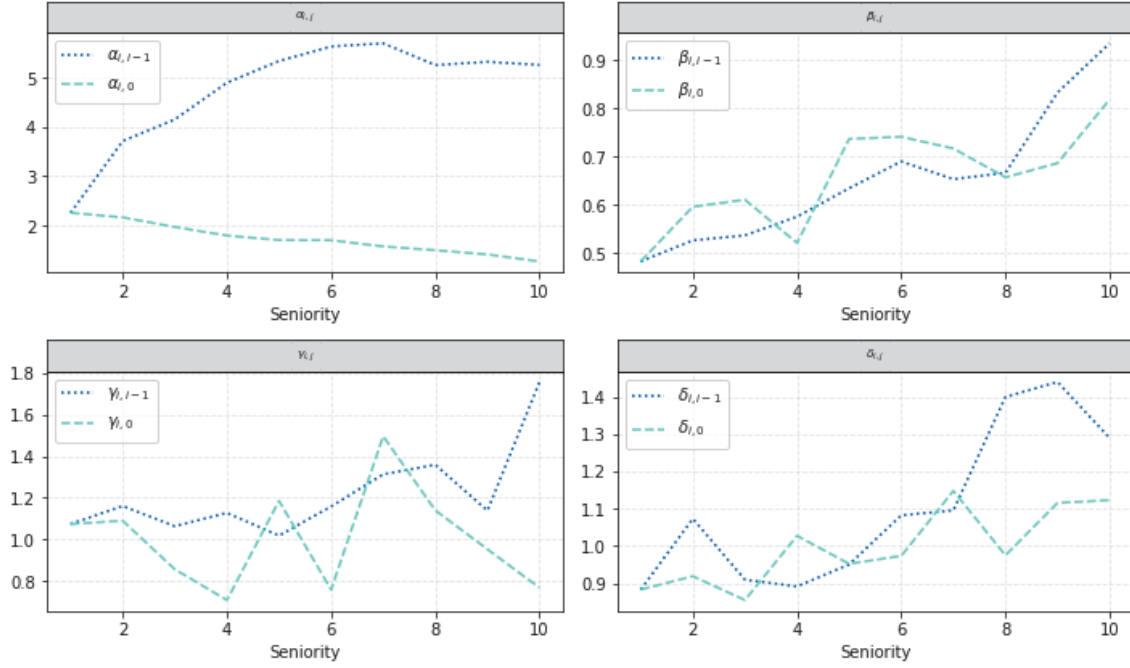


Figure 1.57 – $\alpha_{i,j}$, $\beta_{i,j}$, $\gamma_{i,j}$ and $\delta_{i,j}$ for investment in UC at entry greater than 200€ and lesser than 1,000€.

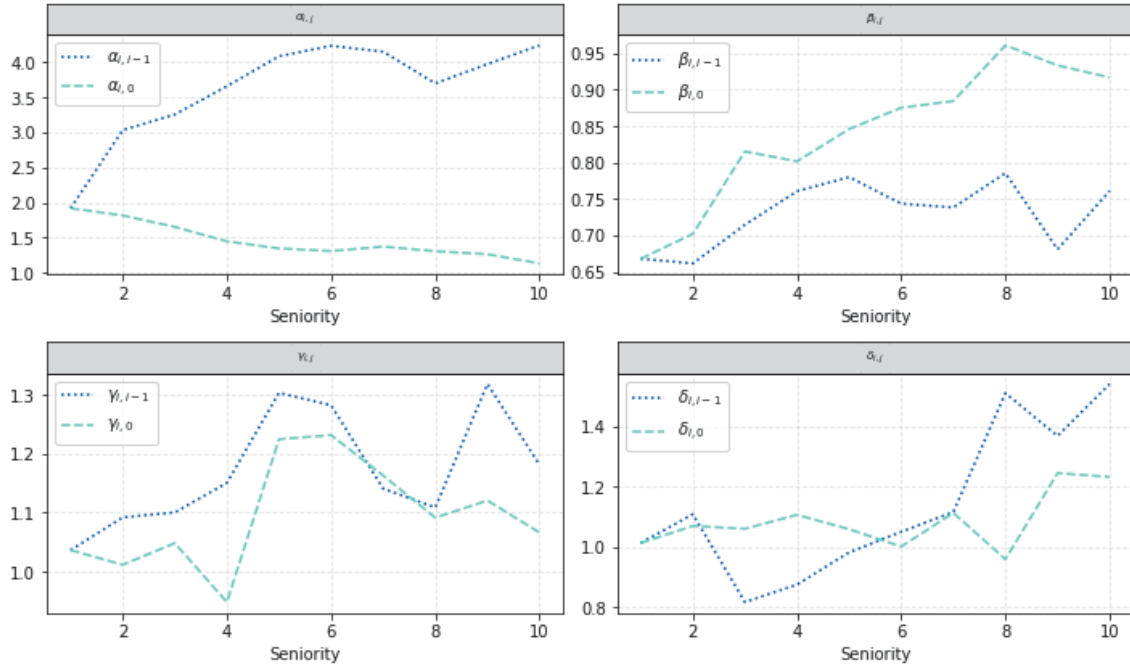


Figure 1.58 – $\alpha_{i,j}$, $\beta_{i,j}$, $\gamma_{i,j}$ and $\delta_{i,j}$ for for investment in UC at entry lesser than 1,000€.

Product 2

Age at entry Figures 1.59, 1.60 and 1.61 provide the evolution of the quantities $\alpha_{i,j}$, $\beta_{i,j}$, $\gamma_{i,j}$ and $\delta_{i,j}$ for different ages at entry in the portfolio. We remark that no matter the age considered, we find the fact that past payers are more susceptible to make a payment in the future (investment profile). The variable does not seem to have a important impact on conclusions of Section 1.5.2.

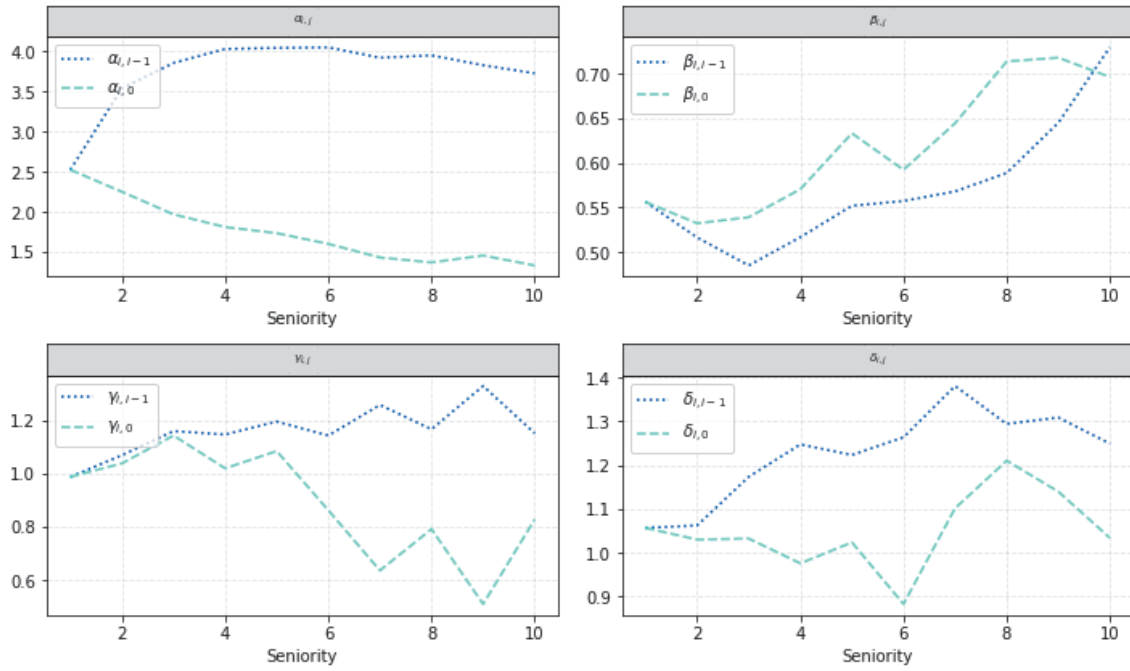


Figure 1.59 – $\alpha_{i,j}$, $\beta_{i,j}$, $\gamma_{i,j}$ and $\delta_{i,j}$ for age at entry lesser than 50.

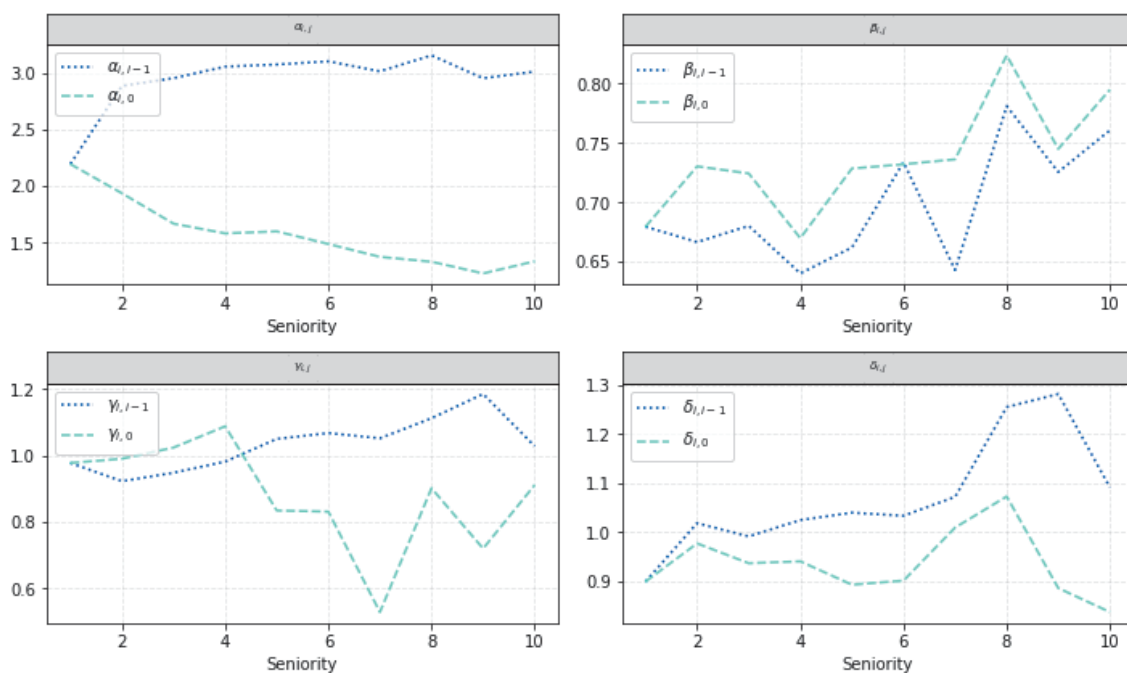


Figure 1.60 – $\alpha_{i,j}$, $\beta_{i,j}$, $\gamma_{i,j}$ and $\delta_{i,j}$ for age at entry between 50 and 65.

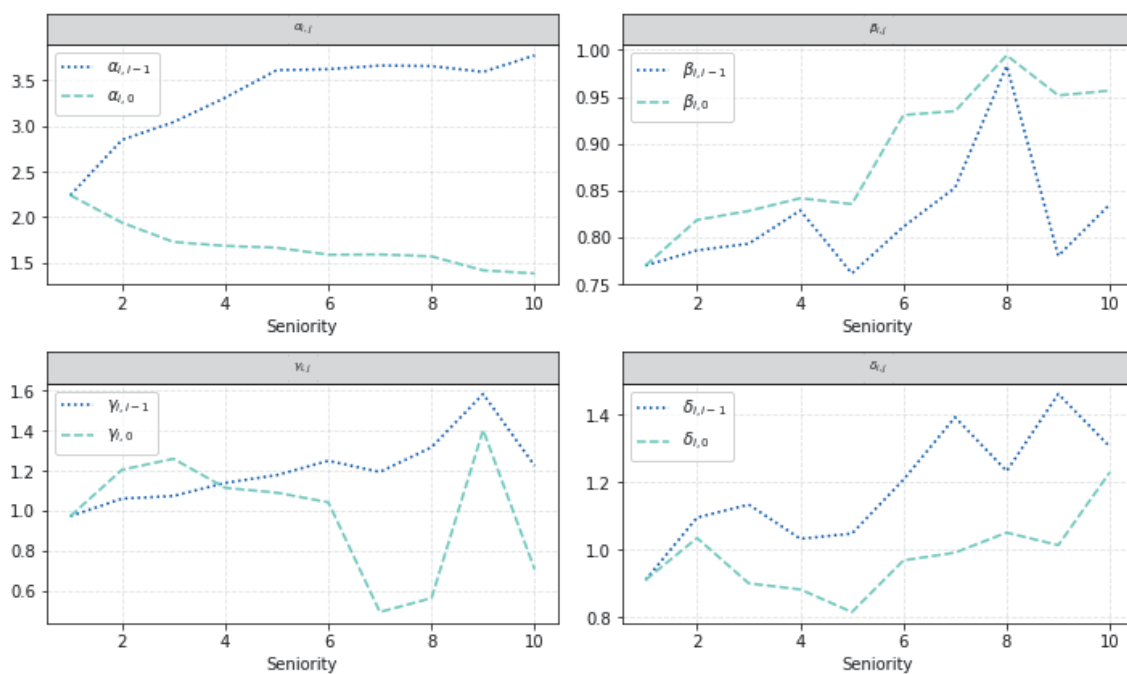


Figure 1.61 – $\alpha_{i,j}$, $\beta_{i,j}$, $\gamma_{i,j}$ and $\delta_{i,j}$ for age at entry greater than 65.

Amount at entry Figures 1.62, 1.63 and 1.64 provide the evolution of the quantities $\alpha_{i,j}$, $\beta_{i,j}$, $\gamma_{i,j}$ and $\delta_{i,j}$ for different amount at entry in the portfolio. The variable does not seem to have a particular impact on conclusions of Section 1.5.2.

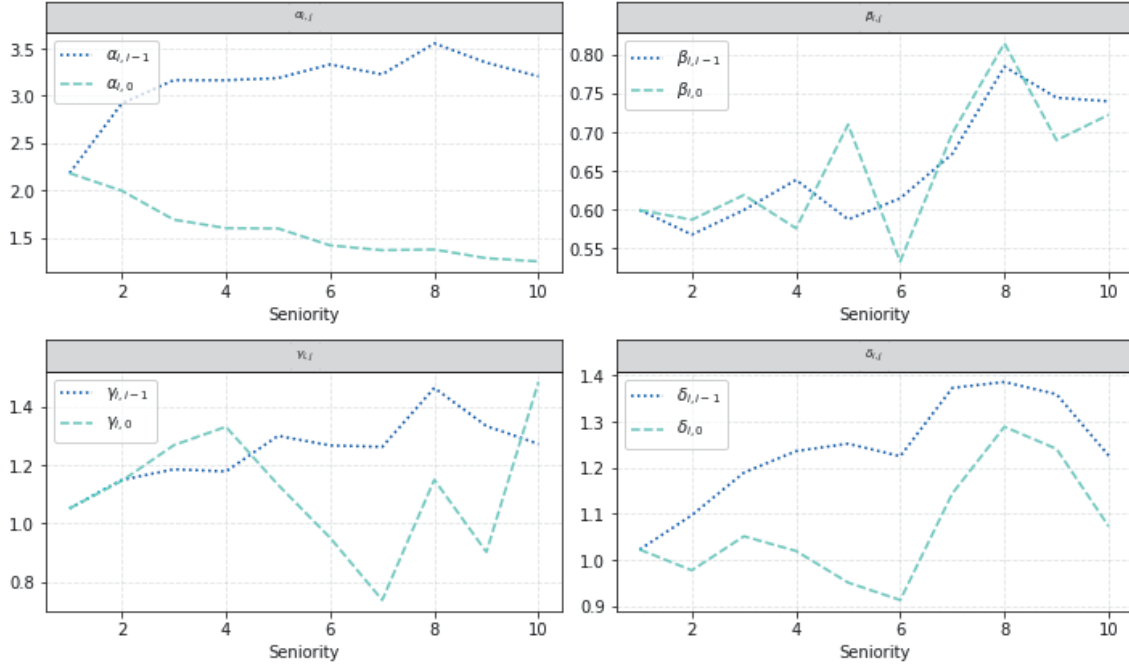


Figure 1.62 – $\alpha_{i,j}$, $\beta_{i,j}$, $\gamma_{i,j}$ and $\delta_{i,j}$ for amount at entry lesser than 30,000€.

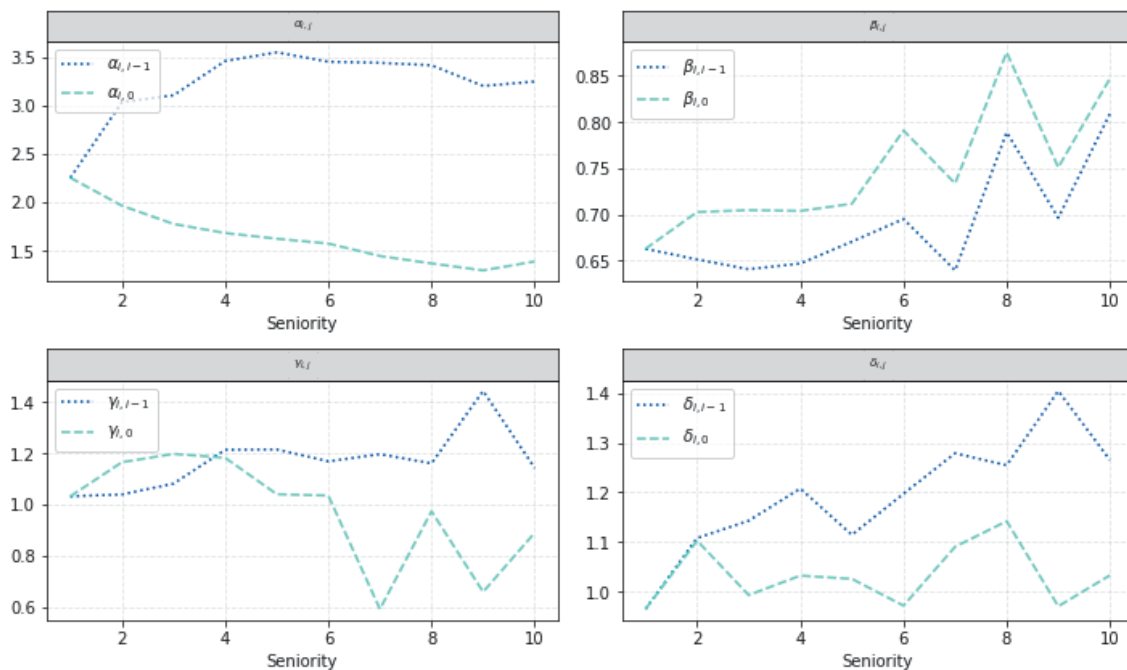


Figure 1.63 – $\alpha_{i,j}$, $\beta_{i,j}$, $\gamma_{i,j}$ and $\delta_{i,j}$ for amount at entry greater than 30,000€ and lesser than 75,000€.

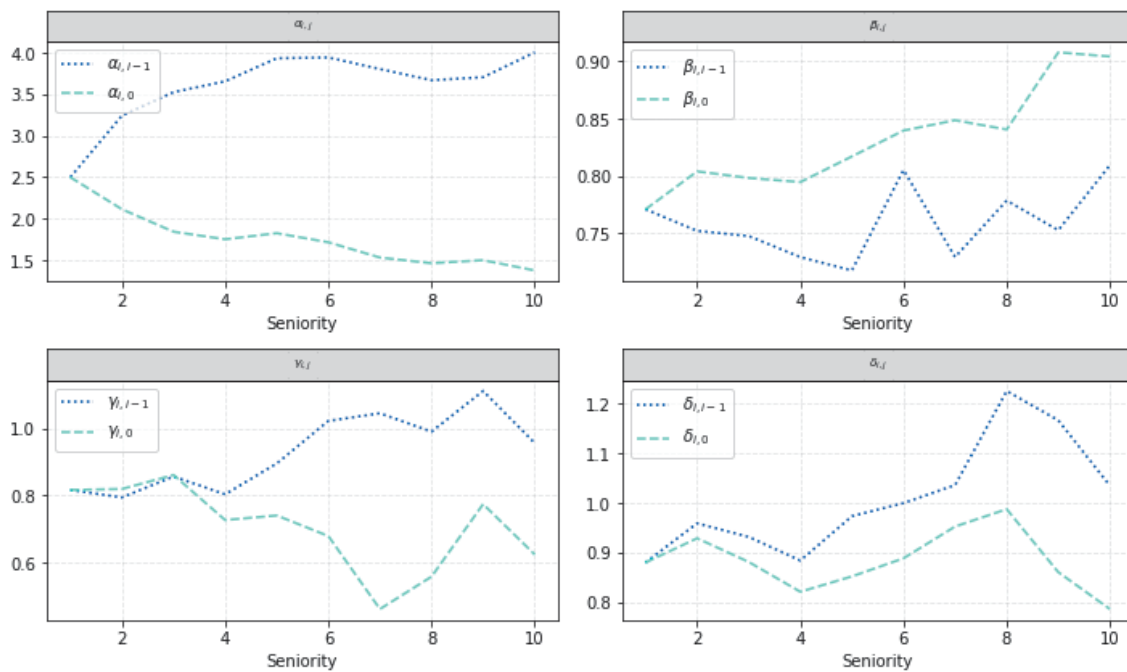


Figure 1.64 – $\alpha_{i,j}$, $\beta_{i,j}$, $\gamma_{i,j}$ and $\delta_{i,j}$ for for amount at entry greater than 75,000€.

Amount invested in unit-linked vehicles at entry Figures 1.65, 1.66 and 1.67 provide the evolution of the quantities $\alpha_{i,j}$, $\beta_{i,j}$, $\gamma_{i,j}$ and $\delta_{i,j}$ for different amount invested in unit-linked vehicles at the entry in the portfolio. The conclusions are similar to those stated previously.

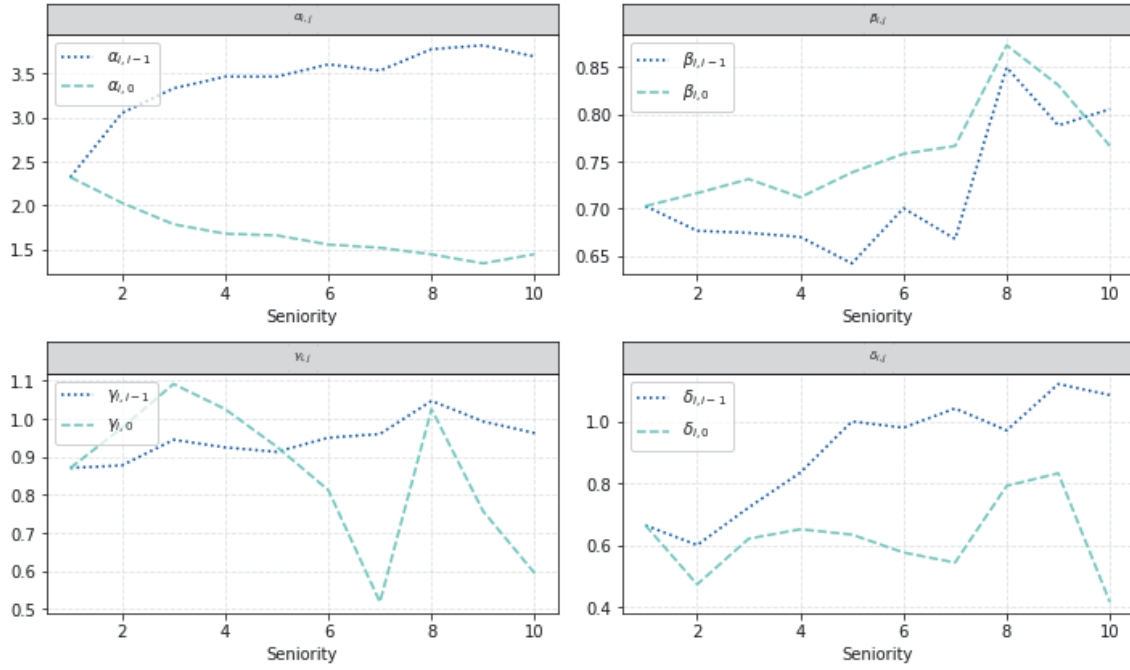


Figure 1.65 – $\alpha_{i,j}$, $\beta_{i,j}$, $\gamma_{i,j}$ and $\delta_{i,j}$ for investment in UC at entry lesser than 3,000 €.

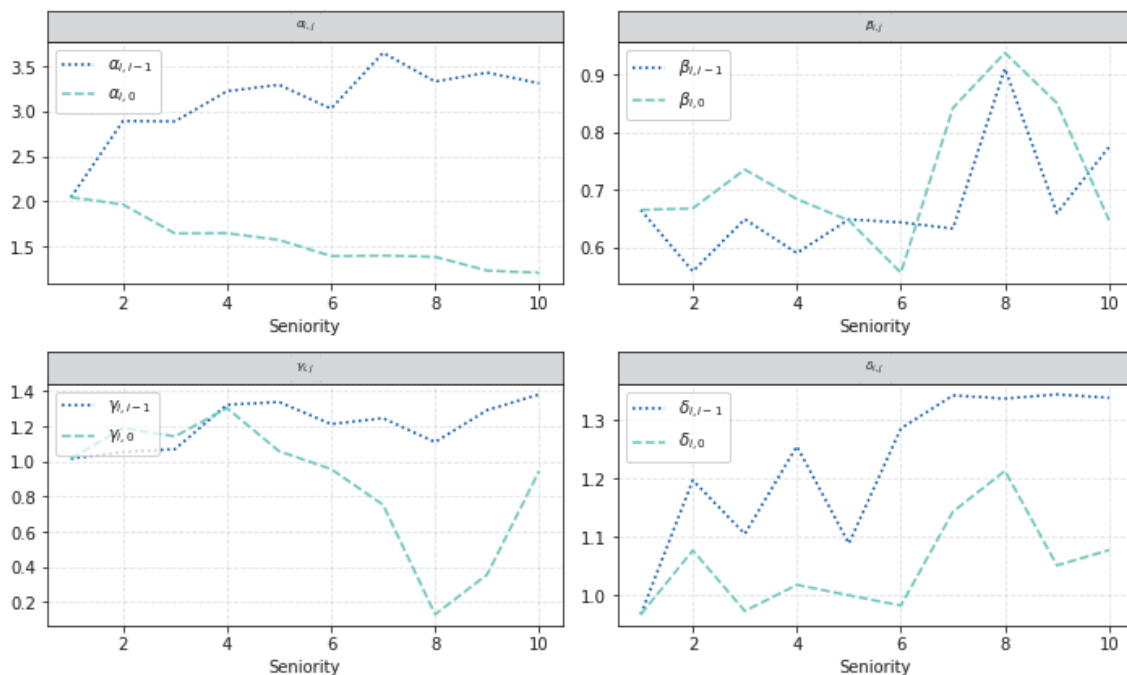


Figure 1.66 – $\alpha_{i,j}$, $\beta_{i,j}$, $\gamma_{i,j}$ and $\delta_{i,j}$ for investment in UC at entry greater than 3,000€ and less than 7,500€.

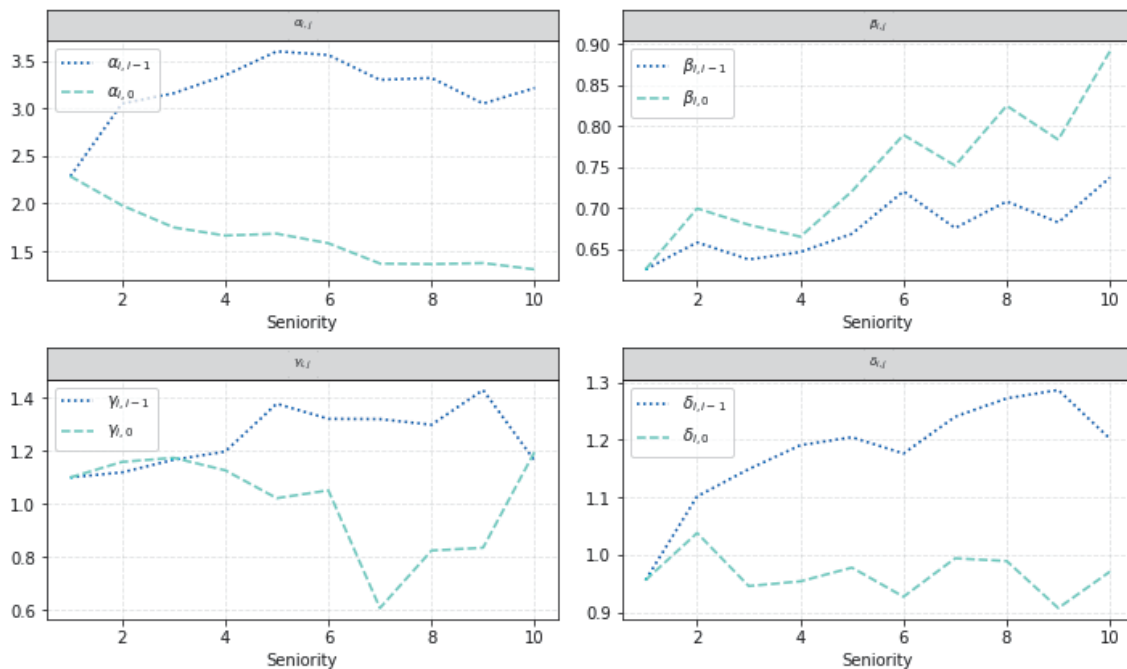


Figure 1.67 – $\alpha_{i,j}$, $\beta_{i,j}$, $\gamma_{i,j}$ and $\delta_{i,j}$ for for investment in UC at entry less than 7,500€.

Bibliography

- H. Akaike. *Information theory and the maximum likelihood principle*. Proceedings of the 2nd International Symposium on Information Theory. Budapest: Akademiai Kiado, 1973.
- B. Amrani. L'arbitrage dans les contrats d'épargne multi-support. Master's thesis, CNAM, 2013.
- G. Arquembourg. Modélisation de l'impact des arbitrages Euro/UC sur un portefeuille de contrats multisupports. Master's thesis, CEA, 2014.
- N. Arunraj, D. Ahrens, and M. Fernandes. Application of SARIMAX Model to Forecast Daily Sales in Food Retail Industry. *International Journal of Operations Research and Information Systems*, 7:1–21, 04 2016. doi: 10.4018/IJORIS.2016040101.
- K. Assaraf. Modélisation de versements libres sous IFRS 17 par des méthodes de machine learning. Master's thesis, Université Paris Dauphine, 2020.
- A. R. Bacinello. Endogenous model of surrender conditions in equity-linked life insurance. *Insurance: Mathematics and Economics*, 37(2):270–296, 2005. ISSN 0167-6687. doi: <https://doi.org/10.1016/j.insmatheco.2005.02.002>. Papers presented at the 8th IME Conference, Rome, 14-16 June 2004.
- K. Barhoumi, O. Darné, and L. Ferrara. Une revue de la littérature des modèles à facteurs dynamiques. 2012. ISSN 0249-4744. doi: 10.3406/ecop.2012.8098.
- F. Z. Benabdelkrim. Modélisation des versements libres en assurance-vie : utilisation de méthodes de scoring. Master's thesis, ISUP, 2017.
- J. Bergstra, D. Yamins, and D. D. Cox. Making a Science of Model Search: Hyperparameter Optimization in Hundreds of Dimensions for Vision Architectures. In *Proceedings of the 30th International Conference on International Conference on Machine Learning - Volume 28, ICML'13*, pages I–115–I–123. JMLR.org, 2013.
- O. Berrada. Modélisation des arbitrages dynamiques par approche machine learning et étude du comportement client sur un portefeuille d'épargne. Master's thesis, Université Paris Dauphine, 2017.

- G. E. P. Box and G. Jenkins. *Time Series Analysis, Forecasting and Control*. Holden-Day, Inc., San Francisco, CA, USA, 1990. ISBN 0816211043.
- G. E. P. Box, G. M. Jenkins, and G. C. Reinsel. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. Forecasting and Control Series. Prentice Hall, 1994. ISBN 9780130607744.
- T. Brion. Modèles d'arbitrages dynamiques - Valorisation d'une option d'arbitrage dans le cadre de la MArket COnsistent Embedded Value. Master's thesis, EURIA, 2009.
- J. Chen, L. Song, M. J. Wainwright, and M. I. Jordan. Learning to Explain: An Information-Theoretic Perspective on Model Interpretation. *CoRR*, abs/1802.07814, 2018.
- M. Costabile, I. Massabó, and E. Russo. A binomial model for valuing equity-linked policies embedding surrender options. *Insurance: Mathematics and Economics*, 42(3): 873–886, June 2008.
- H. S. Cox and Y. Lin. Annuity Lapse Modeling: Tobit or not Tobit ? *Society of Actuaries*, 2006.
- J. D. Cummins. An Econometric Model of the Life Insurance Sector of the U.S. Economy. *The Journal of Risk and Insurance*, 40(4):533–554, 1973. ISSN 00224367, 15396975.
- A. Dar and C. Dodds. Interest Rates, the Emergency Fund Hypothesis and Saving through Endowment Policies: Some Empirical Evidence for the U.K. *Journal of Risk and Insurance*, 56:415, 1989.
- C. Folgoas. Modélisation des arbitrages sur les contrats d'assurance vie. Master's thesis, CEA, 2017.
- M. Forni, M. Hallin, M. Lippi, and L. Reichlin. The Generalized Dynamic-Factor Model: Identification And Estimation. *The Review of Economics and Statistics*, 82 (4):540–554, 2000.
- J. H. Friedman. Greedy function approximation: A gradient boosting machine. *Ann. Statist.*, 29(5):1189–1232, 10 2001. doi: 10.1214/aos/1013203451.
- S. Guritno and Z. Sujuti. Forecasting Performance of VAR-NN and VARMA Models. 06 2020.

- O. Hamaoui. Modélisation du portefeuille de la gestion privée sous Solvabilité 2. Master's thesis, CNAM, 2012.
- L. Hu, J. Chen, V. N. Nair, and A. Sudjianto. Locally Interpretable Models and Effects based on Supervised Partitioning (LIME-SUP). *arXiv e-prints*, art. arXiv:1806.00663, Jun 2018.
- C. Kim. Modeling Surrender and Lapse Rates With Economic Variables. *North American Actuarial Journal*, 9, 10 2005a. doi: 10.1080/10920277.2005.10596225.
- C. Kim. Report to the Policyholder Behavior in the Tail Subgroups Project. 01 2005b.
- W. Kuo, C. Tsai, and W.-K. Chen. An Empirical Study on the Lapse Rate: The Cointegration Approach. *Journal of Risk and Insurance*, 70(3):489–508, 2003. doi: 10.1111/1539-6975.t01-1-00061.
- S. M. Lundberg and S.-I. Lee. A Unified Approach to Interpreting Model Predictions. In I. Guyon, U. V. Luxburg, S. Bengio, H. Wallach, R. Fergus, S. Vishwanathan, and R. Garnett, editors, *Advances in Neural Information Processing Systems 30*, pages 4765–4774. Curran Associates, Inc., 2017.
- S. M. Lundberg, G. G. Erion, and S.-I. Lee. Consistent individualized feature attribution for tree ensembles. *arXiv preprint arXiv:1802.03888*, 2018.
- J. Marquez. Time series analysis : James D. Hamilton, 1994, (Princeton University Press, Princeton, NJ), 799 pp., US \$55.00, ISBN 0-691-04289-6. *International Journal of Forecasting*, 11(3):494–495, September 1995.
- R. C. Merton. Lifetime Portfolio Selection under Uncertainty: The Continuous-Time Case. *The Review of Economics and Statistics*, 51:247–57, 02 1969. doi: 10.2307/1926560.
- R. C. Merton. Optimum consumption and portfolio rules in a continuous-time model. *Journal of Economic Theory*, 3(4):373 – 413, 1971. ISSN 0022-0531. doi: [https://doi.org/10.1016/0022-0531\(71\)90038-X](https://doi.org/10.1016/0022-0531(71)90038-X).
- X. Milhaud. *GLM mixtures and number of components : an application to the surrender risk in life insurance*. Theses, Université Claude Bernard - Lyon I, July 2012.

- A. Mohan, Z. Chen, and K. Weinberger. Web-Search Ranking with Initialized Gradient Boosted Regression Trees. In Olivier Chapelle, Yi Chang, and Tie-Yan Liu, editors, *Proceedings of the Learning to Rank Challenge*, volume 14 of *Proceedings of Machine Learning Research*, pages 77–89, Haifa, Israel, 25 Jun 2011. PMLR.
- J. F. Outreville. Whole-life insurance lapse rates and the emergency fund hypothesis. *Insurance: Mathematics and Economics*, 9(4):249 – 255, 1990. ISSN 0167-6687. doi: [https://doi.org/10.1016/0167-6687\(90\)90002-U](https://doi.org/10.1016/0167-6687(90)90002-U).
- F. Pedregosa, G. Varoquaux, A. Gramfort, V. Michel, B. Thirion, O. Grisel, M. Blondel, P. Prettenhofer, R. Weiss, V. Dubourg, J. Vanderplas, A. Passos, D. Cournapeau, M. Brucher, M. Perrot, and E. Duchesnay. Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12:2825–2830, 2011.
- C. Persson, P. Bacher, T. Shiga, and H. Madsen. Multi-site solar power forecasting using gradient boosted regression trees. *Solar Energy*, 150:423 – 436, 2017. ISSN 0038-092X. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.04.066>.
- J. E. Pesando. The Interest Sensitivity of the Flow of Funds Through Life Insurance Companies: An Econometric Analysis. *The Journal of Finance*, 29(4):1105–1121, 1974. ISSN 00221082, 15406261.
- S. J. Pittman, B. M. Costa, and T. A. Battista. Using Lidar Bathymetry and Boosted Regression Trees to Predict the Diversity and Abundance of Fish and Corals. *Journal of Coastal Research*, pages 27–38, 2009. doi: 10.2112/SI53-004.1.
- A. E. Renshaw and S. Haberman. Statistical analysis of life assurance lapses. *Journal of the Institute of Actuaries*, 113(3):459–497, 1986. doi: 10.1017/S0020268100042566.
- S. Seabold and J. Perktold. Statsmodels: Econometric and statistical modeling with python. In *9th Python in Science Conference*, 2010.
- F. Shakerin and G. Gupta. Induction of Non-Monotonic Logic Programs to Explain Boosted Tree Models Using LIME. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 33(01):3052–3059, Jul. 2019. doi: 10.1609/aaai.v33i01.33013052.
- A. Shrikumar, P. Greenside, A. Shcherbina, and A. Kundaje. Not Just a Black Box: Learning Important Features Through Propagating Activation Differences. *CoRR*, abs/1605.01713, 2016.

- T. K. Siu. Fair valuation of participating policies with surrender options and regime switching. *Insurance: Mathematics and Economics*, 37(3):533–552, 2005. ISSN 0167-6687. doi: <https://doi.org/10.1016/j.insmatheco.2005.05.007>.
- J. H. Stock and M. Watson. Forecasting with Many Predictors. volume 1, chapter 10, pages 515–554. Elsevier, 1 edition, 2006.
- E. Štrumbelj and I. Kononenko. Explaining prediction models and individual predictions with feature contributions. *Knowledge and Information Systems*, 41(3):647–665, Dec 2014. ISSN 0219-3116. doi: 10.1007/s10115-013-0679-x.
- N. R. Swanson and H. White. A Model Selection Approach To Real-Time Macroeconomic Forecasting Using Linear Models And Artificial Neural Networks. *The Review of Economics and Statistics*, 79(4):540–550, November 1997.
- Z. Zheng, H. Zha, T. Zhang, O. Chapelle, K. Chen, and G. Sun. A General Boosting Method and its Application to Learning Ranking Functions for Web Search. In J. C. Platt, D. Koller, Y. Singer, and S. T. Roweis, editors, *Advances in Neural Information Processing Systems 20*, pages 1697–1704. Curran Associates, Inc., 2008.

Chapitre 2

Évolution réglementaire et modélisation des transferts

“ There is no philosophy which is not founded upon knowledge of the phenomena, but to get any profit from this knowledge it is absolutely necessary to be a mathematician. ”

Daniel Bernoulli

Sommaire

Résumé	110
2.1 Introduction	110
2.2 Présentation de l’amendement Fourgous et de la loi PACTE	111
2.2.1 Présentation de l’amendement Fourgous	112
2.2.2 Présentation de la loi PACTE	114
2.3 Les enseignements concernant l’amendement Fourgous	116
2.3.1 Portefeuille d’étude	116
2.3.2 Quelques statistiques préliminaires	117
2.4 Tentative de modélisation des transferts Fourgous	119
2.4.1 Modèle proposé	120
2.4.2 Résultats obtenus	122
2.5 Discussions	125
2.5.1 Un compromis simplicité / précision	125
2.5.2 Premiers éléments comparatifs avec les transferts PACTE . . .	126
2.5.3 Réflexion autour de l’évolution réglementaire	128
2.6 Conclusion	129
2.7 Annexes	131
Bibliographie	142

Ce chapitre est tiré de l'article « Évolution réglementaire et modélisation des transferts », co-écrit avec Josselin Kalifa, Stéphane Loisel et Anani Olympio.

Résumé

En assurance vie, les transferts offrent la possibilité à un épargnant d'investir sur un nouveau contrat tout en conservant les avantages fiscaux afférents à son contrat d'origine. Dans ce papier, nous nous intéressons aux transferts Fourgous et PACTE : après une présentation synthétique mettant en exergue leurs principaux points communs et différences, nous proposons une modélisation de l'amendement Fourgous et analysons, au vu des premières observations, dans quelle mesure les enseignements que l'on peut en tirer sont applicables à la loi PACTE. Enfin, nous élargissons la réflexion en discutant du cadre législatif et de ses impacts sur les comportements assurés.

Mots-clés : Transferts Fourgous ; Loi PACTE ; Modélisation comportementale.

2.1 Introduction

L'amendement Fourgous de 2005 et plus récemment la loi PACTE de 2019 donnent à un assuré, si cela est mis en place par son assureur, la possibilité de transférer son épargne d'un contrat ancien vers un plus récent sans perte d'antériorité fiscale, ouvrant ainsi la voie à un nouveau type de comportement pour les assurés.

La littérature sur les comportements est assez fournie, principalement concernant les rachats, expliqués historiquement par deux approches : le besoin urgent de liquidité pour l'assuré (Outreville [1990]) ou l'existence d'arbitrages sur le marché (Cummins [1975]; Pesando [1974]). Une partie de la littérature s'intéresse à la façon dont les variables macro-économiques, telles que le taux d'intérêt, le taux de chômage ou encore le PIB par exemple affectent les taux de sortie (e.g. Cox et Lin [2006]; Dar et Dodds [1989]; Kim [2005]; Kuo *et al.* [2003]), pendant qu'un autre pan de la littérature travaille à un niveau individuel sur les décisions des assurés, en exploitant les caractéristiques des individus telles que l'âge ou le niveau de richesse par exemple pour déterminer si une personne va effectuer un rachat (e.g. Milhaud [2012]; Renshaw et Haberman [1986]). Enfin, certains papiers s'intéressent à l'évaluation financière de l'option de rachat en s'appuyant sur des modèles issus du domaine financier, comme le modèle de Cox-Ross-Rubinstein (e.g. Bacinello [2005]; Costabile *et al.* [2008]) ou

la théorie *American Contingent Claim* (e.g. Siu [2005]). Concernant le comportement d'arbitrage, les travaux proposés sont majoritairement dérivés de la théorie développée par Merton [1969, 1971] sur la gestion optimale d'un portefeuille d'actifs, et supposent la rationalité de l'assuré (e.g. Brion [2009]). Certains mémoires d'actuaire (e.g. Amrani [2013]; Hamaoui [2012]) se sont également intéressés aux variables explicatives des arbitrages, qu'elles soient structurelles (âge, ancienneté ou niveau d'épargne entre autres), ou conjoncturelles (variation du CAC 40 par exemple). Concernant la notion de transfert en revanche, il n'y a pas, à notre connaissance, de travaux publiés sur le sujet et le présent papier constitue donc le premier apport sur ce thème.

Cet article contribue à la littérature sur les comportements des assurés de deux façons. Premièrement, nous analysons les transferts Fourgous et en proposons une modélisation basée sur la régression logistique dynamique ; nous montrons que cette approche donne des résultats satisfaisants qui permettent de prédire correctement les montants de transferts tout en représentant fidèlement les taux selon plusieurs variables parmi les plus importantes, que nous mettons en évidence par ailleurs. Secondement, nous comparons les enseignements tirés de Fourgous aux premières observations de PACTE après avoir mis en évidence les principaux points communs ainsi que les différences majeures entre les deux législations ; pour un partenaire, nous notons que les personnes intéressées à un transfert PACTE semblent être les mêmes structurellement que pour les transferts Fourgous, ce qui n'est pas le cas du second partenaire.

Le reste du papier s'organise de la façon suivante. Dans la Section 2.2, nous présentons de façon détaillée l'amendement Fourgous et la loi PACTE. Dans la Section 2.3, nous analysons les principaux enseignements observés concernant le premier, en travaillant sur deux partenaires différents. Dans la Section 2.4, nous proposons une modélisation dynamique des transferts et examinons les résultats obtenus sur une base de test. Enfin, nous discutons du modèle et des premiers éléments comparatifs avec les transferts PACTE dans la Section 2.5. La Section 2.6 conclut le papier.

2.2 Présentation de l'amendement Fourgous et de la loi PACTE

Dans cette partie, nous présentons succinctement deux réglementations permettant aux détenteurs de contrats d'assurance vie de réaliser des transferts (sous réserve de

mise en place par l'assureur) : l'amendement Fourgous et la loi PACTE (Plan d'Action pour la Croissance et la Transformation des Entreprises).

2.2.1 Présentation de l'amendement Fourgous

Les modalités de l'amendement

L'amendement Fourgous a été inséré dans la loi du 26 juillet 2005 relative à la confiance et à la modernisation de l'économie. Il donne la possibilité à un assuré doté d'un contrat d'assurance vie sur un produit monosupport de transférer l'intégralité de son épargne vers un produit multisupport tout en conservant son antériorité fiscale. Cela permet donc à l'assuré de conserver les avantages fiscaux associés au contrat d'origine.

L'objectif de cet amendement, porté par le député Jean-Michel Fourgous, était de dynamiser l'économie en permettant aux détenteurs de contrats d'assurance vie monosupports de diversifier leur épargne en investissant sur des supports en unités de compte plus risqués mais plus rémunérateurs que les supports adossés à des fonds en euros.

Des conditions sont néanmoins nécessaires pour réaliser un transfert Fourgous :

- (i) le transfert doit s'effectuer auprès du même assureur, c'est-à-dire celui auprès duquel le contrat d'origine a été souscrit ;
- (ii) le transfert doit concerner l'intégralité de l'épargne investie sur le contrat monosupport de base ;
- (iii) l'assuré doit investir au moins 20% de son épargne sur des placements à risque, appelés supports en unités de compte (l'assureur peut cependant imposer un taux d'unités de compte supérieur à ce minimum).

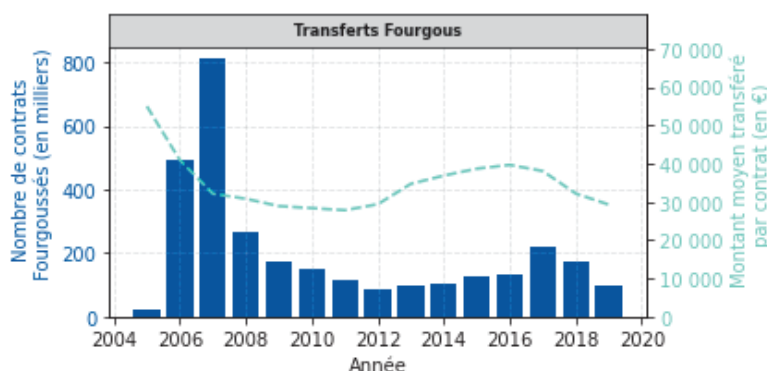
En pratique, le changement s'effectue via la signature d'un avenant au contrat d'origine ou à l'adhésion à un nouveau contrat, sans frais pour l'assuré. L'assuré n'a pas besoin de clôturer son contrat via un rachat, et peut donc conserver son antériorité fiscale. En revanche, transformer son contrat monosupport implique la suppression du Taux Minimum Garanti (TMG) éventuel du contrat d'origine.

Le fait d'investir sur des supports en unités de compte dynamise l'épargne en boostant le taux de rendement, ce qui est particulièrement intéressant lorsque le rendement des fonds en euros diminue, mais cela comporte un risque de perte pour l'assuré, puisque seul est garanti le nombre d'unités de compte, pas la valeur de ceux-ci. Cela signifie

que cet investissement n'est pas adapté à tous les profils. Le devoir de conseil impose au conseiller de l'assuré de valider que cet investissement est bien adapté à ses besoins.

Quelques données clés, 14 ans après

D'après la Fédération Française de l'Assurance¹, à fin 2019 ce sont plus de 3 millions de contrats qui ont été concernés par un transfert Fourgous depuis 2005, représentant un montant total transféré de plus de 100 milliards d'euros dont un peu plus de 30% ont été réinvestis en unités de compte. La majeure partie de ces transformations a eu lieu en 2006 et surtout 2007, les transformations pour les années plus récentes étant plus faibles, comme le montre les diagrammes bleus du Graphique 2.1. On note également que le montant moyen transféré dans le cadre de l'amendement Fourgous varie dans le temps. S'il est relativement élevé dans le premier temps (environ 55 000€ puis 40 000€ les deux premières années), il se stabilise ensuite autour de 30 000€ jusqu'en 2012 ensuite avant une légère remontée jusqu'en 2016. La part investie en unités de compte lors du transfert varie également, avec une diminution régulière de pratiquement 35% en 2005 à 25% en 2011, puis une augmentation jusque 32 – 33% en 2018.



GRAPHIQUE 2.1 – Nombre de transferts Fourgous.

Les transferts Fourgous ont eu un impact visible sur l'assurance vie : en 2019, seul 24% de l'encours reste investi sur des contrats monosupports en euros contre plus de 50% en 2005 et 66% en 2000. Bien évidemment, les transferts Fourgous ne sont pas la seule raison à cette modification de la répartition entre monosupport et multisupport : de façon générale, les contrats monosupports sont moins commercialisés que par le passé

1. Sauf contre-indication, les données chiffrées de ce papier proviennent de la FFA : www.ffa-assurance.fr.

et les nouvelles souscriptions ont ainsi davantage lieu sur des contrats multisupports, augmentant de fait la proportion d'encours sur ces contrats. Entre 2014 et 2019, la proportion de souscription sur des contrats monosupports en euros (pour les contrats en cas de vie à adhésion individuelle) est ainsi passée de 12,4% à 1,1% ; les cotisations sont elles passées de 15,1% à 7,1%. Dans l'absolu, le nombre de contrats monosupports en cours diminue (de 15 millions en 2014 à un peu plus de 10 millions en 2019) car les nouvelles souscriptions ne compensent pas les sorties (rachats, transferts Fourgous entre autres), ce qui est l'inverse pour les contrats multisupports (d'un peu moins de 31 millions en 2014 à près de 36 millions en 2019).

Il convient néanmoins de remettre ces chiffres en perspective : si les contrats multisupports semblent dessiner les contours de l'horizon en épargne à l'heure actuelle, la répartition de l'encours entre euros et unités de compte n'a cependant pas augmenté, ce qui était pourtant l'un des objectifs de l'amendement Fourgous : la proportion d'encours adossés à des unités de compte est ainsi de 21% en 2018 (23% en 2019), exactement comme en 2000. Dans les faits, la proportion d'encours en unités de compte a diminué autour de 16 – 17% aux alentours des années 2008-2012, ce qui est probablement dû à la crise financière. Elle est remontée difficilement à 18% en 2015 avant d'accélérer ces dernières années.

2.2.2 Présentation de la loi PACTE

Les modalités de la loi

La loi n° 2019-486 du 22 mai 2019 relative à la croissance et à la transformation des entreprises, dite loi PACTE, est une loi présentée par le gouvernement d'Édouard Philippe, qui a deux ambitions clairement définies² : « faire grandir [les] entreprises pour leur permettre d'innover, d'exporter et créer des emplois » et « repenser la place des entreprises dans la société et mieux associer les salariés à leurs résultats ». Ces ambitions se traduisent par différentes mesures touchant aussi bien au droit des sociétés qu'au droit des affaires ou au droit social, et qui simplifient la création d'entreprise, modifient les seuils applicables aux PME, favorisent le rebond des entreprises en cas d'échec ou encore facilitent l'investissement dans l'économie réelle.

En particulier, le secteur assurantiel est également innervé par la loi PACTE, dont certaines évolutions concernent - directement ou indirectement - les épargnants et les as-

2. <https://www.pacte-entreprises.gouv.fr/>

sureurs. En particulier, l'assurance vie apparaît en première ligne de ces changements qui prévoient, entre autres : le renforcement des obligations d'information de l'assureur, le développement des unités de compte labellisées vertes, solidaires et responsables, la mise en place d'une passerelle entre assurance vie et Plan Epargne Retraite (PER), la modernisation du fonds euro-croissance mais également ce qui nous intéresse en particulier dans ce papier, à savoir la transférabilité des contrats d'assurance vie. Les détenteurs de contrats d'assurance vie auront ainsi désormais la possibilité de transférer partiellement ou totalement l'épargne de leur contrat vers un contrat permettant qu'une part ou l'intégralité des primes versées soient affectées à l'acquisition de droits exprimés en unités de compte ou de droits donnant lieu à la constitution d'une provision de diversification (contrats euro-croissance). Ce transfert, qui ne peut se faire qu'au sein du même assureur, n'a pas les conséquences fiscales d'un dénouement de contrat : l'assuré conserve donc son antériorité fiscale. Dans les faits, le transfert s'effectue soit par un avenant au contrat d'origine, soit par la souscription d'un nouveau contrat auprès de la même compagnie d'assurance.

Comparatif avec l'amendement Fourgous

Afin de comprendre en quoi les enseignements de l'amendement Fourgous pourraient aider à comprendre les transferts dans le cadre de la loi PACTE, nous récapitulons dans le Tableau 2.1 les principales similitudes et différences entre l'amendement Fourgous et la loi PACTE.

TABLEAU 2.1 – Comparatif Amendement Fourgous / Loi PACTE.

	Amendement Fourgous	Loi PACTE
Transfert d'un contrat à un autre	✓	✓
Transfert au sein du même assureur	✓	✓
Conservation de l'antériorité fiscale	✓	✓
Contrat d'origine monosupport	✓	✗
Intégralité de la PM concernée	✓	✗
Part d'UC minimum obligatoire	✓	✗

En substance, amendement Fourgous et loi PACTE présentent de fortes analogies en ce qui concerne les transferts. Il s'agit, dans les 2 cas, d'offrir à l'épargnant la possibilité d'investir sur un nouveau contrat, obligatoirement commercialisé par le même assureur, sans perdre l'antériorité fiscale acquise grâce au contrat d'origine, à condition d'investir a minima sur des supports plus risqués mais plus rémunérateurs (unités de compte en particulier).

Les principales différences concernent la nature des contrats (l'amendement Fourgous concerne nécessairement des contrats monosupports en euros, ce qui n'est pas le cas des transferts PACTE), le degré de transfert (total dans le cadre l'amendement Fourgous, total ou partiel dans le cadre de la loi PACTE) et la proportion d'unités de compte à investir lors du transfert (20% minimum pour les transferts Fourgous, non défini pour les transferts PACTE pour lesquels cela peut également concerner l'euro-croissance). Ces différences ne sont certes pas neutres et nécessitent une lecture prudente de l'extrapolation que l'on peut faire des enseignements concernant les transferts Fourgous, mais l'essence de l'amendement Fourgous et de la loi PACTE nous semble être la même, la deuxième étendant en quelque sorte les prérogatives du premier.

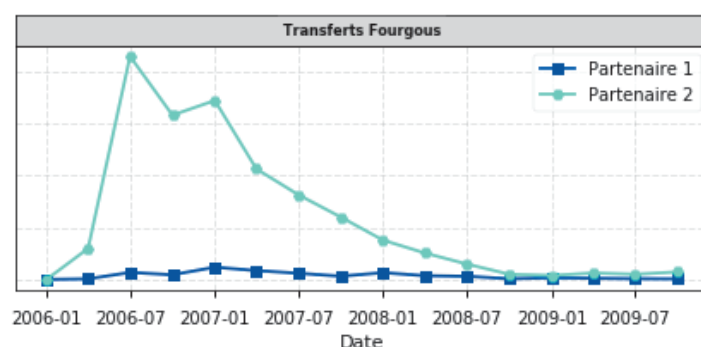
2.3 Les enseignements concernant l'amendement Fourgous

Nous présentons succinctement dans ce qui suit les portefeuilles d'épargnants qui vont nous servir dans la suite du papier à proposer une modélisation des transferts Fourgous. Nous nous focalisons sur la période 2006-2009, qui correspond aux premières années suivant la mise en place de l'amendement par les partenaires. Le pas de temps choisi pour l'étude est trimestriel, ce qui nous semble un bon compromis entre une maille mensuelle très fine et une maille annuelle trop large.

2.3.1 Portefeuille d'étude

Dans ce papier, nous travaillons sur deux partenaires qui ont eu des résultats différents concernant les transferts Fourgous. Sur la période étudiée, le partenaire 1 a eu peu de transferts Fourgous comparativement au partenaire 2. Cette différence est particulièrement visible sur le Graphique 2.2 : notre portefeuille d'étude se compose donc

d'un partenaire qui est représentatif de la tendance observée au niveau national et d'un deuxième portefeuille avec beaucoup moins de transferts.



GRAPHIQUE 2.2 – Transferts Fourgous (en nombre).

Par ailleurs, l'analyse succincte des principales caractéristiques des deux partenaires, détaillée au Tableau 2.2 semble mettre en évidence les éléments suivants : les populations sont similaires en termes d'âge et de PM, mais l'ancienneté est plus importante chez le partenaire 2 ; les comportements sont différents puisque les assurés du partenaire 2 rachètent plus et versent moins que ceux du partenaire 1, ce qui est peut-être dû, au moins en partie, à la différence d'ancienneté entre ces 2 populations.

TABLEAU 2.2 – Comparaison entre les partenaires 1 et 2 pour quelques variables.

Variable	Partenaire 1	Partenaire 2
Âge	68,7	67,4
Ancienneté	7,7	11,4
PM	25 178	24 807
Rachat partiel moyen sur les 3 dernières années	351	572
Versement libre moyen sur les 3 dernières années	1 814	1 212
Versement programmé moyen sur les 3 dernières années	66	145

2.3.2 Quelques statistiques préliminaires

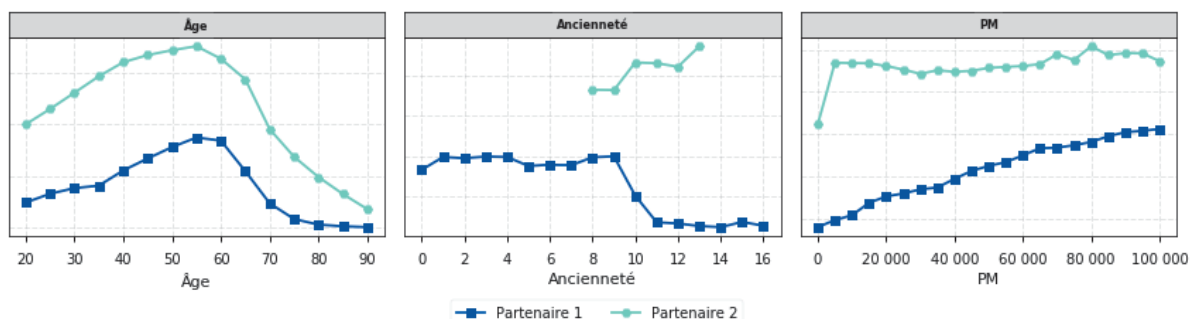
Pour fixer nos idées concernant les transferts Fourgous, nous analysons dans ce qui suit les taux de transfert selon différentes variables calculées au 1^{er} janvier 2006. Le Graphique 2.3 représente ainsi les taux de transfert Fourgous suivant l'âge de l'assuré, l'ancienneté du contrat et la PM (provision mathématique) du contrat.

Concernant l'âge, la forme est similaire pour les 2 partenaires et présente une structure particulière en forme de cloche : les taux sont croissants jusqu'à 55 ans, puis décroissent après cet âge, avec une chute particulière après 70 ans. Ces âges pivots correspondent à des moments charnières en assurance vie, puisque parmi les objectifs identifiés de l'assurance vie, on retrouve la constitution d'un capital ou d'une rente pour la retraite mais également l'optique de transmission de patrimoine. L'assuré déjà en retraite a certainement moins d'intérêt à basculer l'épargne accumulée sur des supports en unités de compte, plus rémunérateurs mais plus risqués : il souhaite plus vraisemblablement utiliser l'épargne constituée dans un horizon de temps court, ce qui n'incite donc pas à l'investissement sur des unités de compte par définition volatiles et donc présentant un risque de perte sur du court terme. De façon générale, les modalités de consommation et d'épargne des agents économiques constituent un pan très étudié en économie, avec notamment la théorie du cycle de vie qui a valu un prix Nobel à son auteur en 1985 (voir Ando et Modigliani [1963]).

Concernant l'ancienneté, la comparaison entre les 2 partenaires est malaisée car le partenaire 2, qui a commencé à commercialiser les produits considérés après le partenaire 1, est qui plus est fermé à la commercialisation depuis plusieurs années en 2006. Les assurés ont donc tous entre 8 et 13 d'ancienneté pour ce partenaire, et il est donc en particulier difficile d'analyser l'impact du changement de fiscalité au bout de 8 ans d'ancienneté. On note toutefois une tendance à l'augmentation du taux de transfert avec l'ancienneté. Pour le partenaire 1 en revanche, l'analyse est plus directe : les taux sont constants pour les 9 premières années d'ancienneté, avant un large décrochage à la baisse entre la 9^{ème} et la 11^{ème} année, puis de nouveau un taux constant pour les anciennetés ultérieures. S'il peut paraître étonnant que le pic ait lieu à la 9^{ème} année d'ancienneté plutôt qu'à la 8^{ème}, la forme semble néanmoins indiquer que les assurés trouvent un intérêt plus fort à réaliser un transfert Fourgous - qui rappelons-le, permet de conserver son antériorité fiscale - lorsqu'ils ne bénéficient pas encore de l'avantage fiscal des 8 ans. Notons également que les TMG peuvent être plus importants pour les souscriptions plus anciennes.

Enfin, pour les 2 partenaires, les transferts augmentent de façon linéaire avec le niveau de PM. La pente n'est cependant pas la même : les taux du partenaire 1, qui partent de plus bas, augmentent ainsi plus rapidement avec la PM, semblant ainsi converger vers le partenaire 2. D'un point de vue comportemental, cela pourrait signifier que les assurés dotés d'une PM plus importante - donc plus aisés - sont plus sensibles

à l'environnement économique et législatif et cherchent davantage à optimiser leurs investissements.



GRAPHIQUE 2.3 – Taux de transfert Fourgous.

Les trois variables considérées aux paragraphes suivants sont généralement les plus utilisées lorsque l'on travaille sur la partie structurelle du comportement des assurés. Concernant le rachat, on rappellera par exemple que Milhaud *et al.* [2011] utilisent l'âge, l'ancienneté ou encore la prime (qui n'est certes pas la PM mais reste un élément associé aux finances d'un assuré) dans leur modélisation, et on citera Detroulleau et Mouret [2013] qui utilisent ces mêmes variables avec une approche « logique floue » dans leur mémoire primé par le prix SCOR. De façon générale, l'utilisation de ces variables trouve son explication dans les nombreux travaux réalisés sur le sujet, comme indiqué en Section 2.1 : Renshaw et Haberman [1986] mettent ainsi en évidence l'importance de l'âge, de l'ancienneté ainsi que de la compagnie et du type de contrat dans le comportement de rachat. Cox et Lin [2006] insistent dans leurs travaux sur l'ancienneté, et Kagraoka [2005] s'appuie sur le sexe, l'âge, la saisonnalité, l'ancienneté du contrat et le statut de travail dans sa modélisation. Ces quelques références ainsi que l'analyse détaillée en Annexe 2.7 expliquent notre choix de nous focaliser sur les trois variables que sont l'âge, l'ancienneté et la PM pour la modélisation, les taux de transferts selon d'autres variables étant toutefois disponibles en Annexe 2.7.

2.4 Tentative de modélisation des transferts Fourgous

Cette partie a pour objectif de proposer une modélisation des transferts Fourgous, et de l'appliquer aux portefeuilles décrits à la Section 2.3. Nous souhaitons une modélisation compréhensible, susceptible d'être utilisée dans le cadre des transferts de la loi PACTE.

2.4.1 Modèle proposé

Eu égard à l'analyse proposée dans la Section 2.3, nous adoptons une méthodologie paramétrique simple : nous proposons une modélisation polynomiale, c'est-à-dire que nous posons

$$\text{logit}(p_{\text{ind},t}) = a_{0,t}^{\text{part}} + \sum_{\substack{l \\ i+j+k \leq d}} a_l \times \text{age}_{\text{ind}}^i \times \text{anc}_{\text{ind}}^j \times \text{PM}_{\text{ind}}^k, \quad (2.1)$$

où $p_{\text{ind},t}$ représente la probabilité de transfert de l'individu ind à la date t , age_{ind} son âge, anc_{ind} son ancienneté et PM_{ind} sa provision mathématique. Les a_l sont les coefficients du polynôme, d le degré du polynôme, les $a_{0,t}^{\text{part}}$ les coefficients de degré 0 dépendants du partenaire part et logit représente la fonction logistique définie par

$$\text{logit}(p) = \ln\left(\frac{p}{1-p}\right). \quad (2.2)$$

Cette modélisation est très simple et donc très facilement compréhensible ; l'emploi de la régression logistique dans la modélisation comportementale est assez naturelle, comme indiqué précédemment, avec parfois l'utilisation de mélanges pour mieux capter l'hétérogénéité du portefeuille (Milhaud [2013]). Comme pour les lois de rachat dont le calibrage s'effectue via une composante structurelle à laquelle on adjoint une composante conjoncturelle liée à l'écart entre le taux servi et le taux attendu par les assurés (voir ACPR [2013]), on note que cette modélisation inclut une partie structurelle et une partie conjoncturelle. Les a_l qui ne dépendent ni du partenaire ni du temps, sont en effet les éléments liés aux seules caractéristiques de l'individu (ici l'âge, l'ancienneté et la PM), tandis que les $a_{0,t}^{\text{part}}$ sont des éléments reflétant une composante que l'on pourrait qualifier de « conjoncturelle » au sens large : liés au partenaire en question, ils évoluent dans le temps en fonction aussi bien des transferts passés que des caractéristiques du partenaire (incitation éventuelle menée par le partenaire pour les transferts, taux de revalorisation des contrats, ...). Précisons qu'elle impose une hypothèse très forte : l'indépendance temporelle entre les décisions (la décision d'un assuré à la date $t + 1$ est indépendante de ce qui s'est passé avant, en particulier sa décision à la date t). Elle suppose également la stabilité des comportements de transfert : au cours de la période considérée, ceux-ci sont supposés ne pas se modifier de manière excessive. Cette hypothèse est relativement forte, puisqu'en réalité, en cas de crise, les

comportements des assurés tendent à devenir moutonniers et se modifient, or la crise de 2007 intervient dans la période étudiée. Ce phénomène de crise de corrélation est étudié par Loisel et Milhaud [2011].

La modélisation proposée permet donc d'attribuer à chaque assuré une probabilité d'effectuer un transfert Fourgous à chaque pas de temps. Pour connaître les montants totaux de transferts, nous pouvons multiplier la probabilité calculée à chaque pas de temps par la provision mathématique de l'individu à la date considérée, notée $PM_{ind,t}$. Ainsi, en sommant sur l'ensemble des assurés du partenaire considéré, nous en déduisons le flux des transferts associé à cette période pour ce partenaire, en respectant la déformation du portefeuille. Notons que cette approche correspond au modèle individuel classique en actuariat

$$S_t^{\text{part}} = \sum_{\substack{ind=1 \\ ind \in part}}^n X_{ind,t}, \quad (2.3)$$

où n est le nombre d'assurés, et $X_{ind,t} = PM_{ind,t} \times \mathbb{1}_{ind,t}$ (indicatrice de transfert pour l'individu ind à la date t). Notre meilleure estimation du montant des transferts Fourgous à la date t , $\mathbb{E}(S_t^{\text{part}})$, est donc

$$\text{transfert}_t^{\text{part}} = \mathbb{E}(S_t^{\text{part}}) = \sum_{\substack{ind=1 \\ ind \in part}}^n \text{montant}_{ind,t} \times p_{ind,t}. \quad (2.4)$$

La difficulté ici réside dans l'estimation de la variable $\text{montant}_{ind,t} = \mathbb{E}[\mathbb{E}(PM_{ind,t} | \mathbb{1}_{ind,t})]$. Dans ce cas, des hypothèses sont très souvent prises (typiquement, l'indépendance entre $PM_{ind,t}$ et $\mathbb{1}_{ind,t}$). Dans notre cas, et au vu de l'objectif poursuivi, qui concerne le comportement de l'assuré plus que le montant de sa provision, nous avons considéré que les $PM_{ind,t}$ étaient déterministes et s'exprimaient selon

$$PM_{ind,t} = PM_{ind,0} \times (1 + \text{taux}^{\text{part}})^t, \quad (2.5)$$

où $\text{taux}^{\text{part}}$ est donc le taux d'accroissement / de diminution continu de la provision pour les assurés du partenaire $part$. Notons que rien n'empêche ce taux d'être négatif si les sorties (rachats principalement) sont plus importantes que les entrées (primes,

revalorisation entre autres). Pour chaque partenaire, ce taux correspond à

$$\arg \min_x \sum_t \left(\frac{\sum PM_{ind,t}}{\sum PM_{ind,0}} - (1+x)^t \right)^2. \quad (2.6)$$

Au final, le montant des transferts Fourgous pour le partenaire part à la date t est donc donné par

$$\text{transfert}_t^{\text{part}} = \sum_{\substack{ind=1 \\ ind \in \text{part}}}^n p_{ind,t} \times PM_{ind,0} \times (1 + \text{taux}^{\text{part}})^t. \quad (2.7)$$

Notons qu'il aurait été possible d'avoir une approche plus proche du modèle collectif, très utilisé en actuariat. Cette approche, plutôt que de s'intéresser à chaque assuré, privilégie les sinistres (ici il s'agirait des transferts). La variable S_t^{part} est alors modifiée de sorte à correspondre à la somme des N_t^{part} PM transférées, N_t^{part} étant des variables aléatoires. On cherche alors à modéliser efficacement ces variables (par exemple, avec une loi de Poisson). Le choix de l'approche individuelle est lié à notre volonté d'attribuer à chaque individu une probabilité (ou un score) de transfert que l'on pourra appliquer dans le cadre de la loi PACTE pour comparaison.

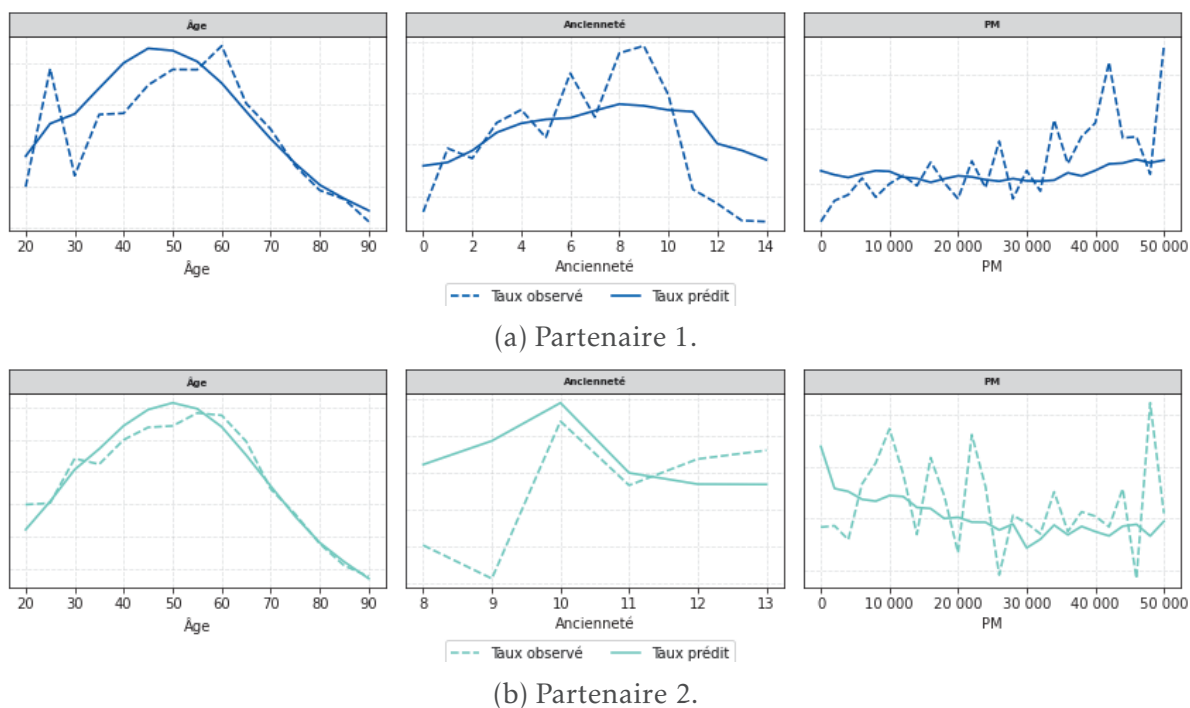
2.4.2 Résultats obtenus

Nous présentons dans ce qui suit les résultats obtenus et notre analyse de ces résultats. L'intégralité des calculs de cette partie ont été effectués sous python ; en particulier, les calculs concernant la régression logistique ont été effectués grâce au package *statsmodels* (voir Seabold et Perktold [2010] pour plus d'informations) et le preprocessing via le package *scikit-learn* (voir Pedregosa *et al.* [2011]).

Le calibrage du modèle s'est effectué sur un échantillon représentant 80% de la base totale, appelé base d'entraînement et les analyses concernant les résultats ont été réalisées sur la base des 20% restant, appelée base de test. Nous avons calibré divers modèles sur 80% de la base d'entraînement, en faisant varier le degré du polynôme et en testant d'enlever une ou deux variables du modèle, et avons regardé les performances en termes de log loss sur les 20% restants (base de validation). Au final, nous avons retenu $d = 2$ comme degré pour le polynôme.

Le Graphique 2.4 présente les courbes réelles et prédites des taux de transferts par âge, ancienneté et PM pour la période Juillet-Septembre 2007. Les graphiques pour

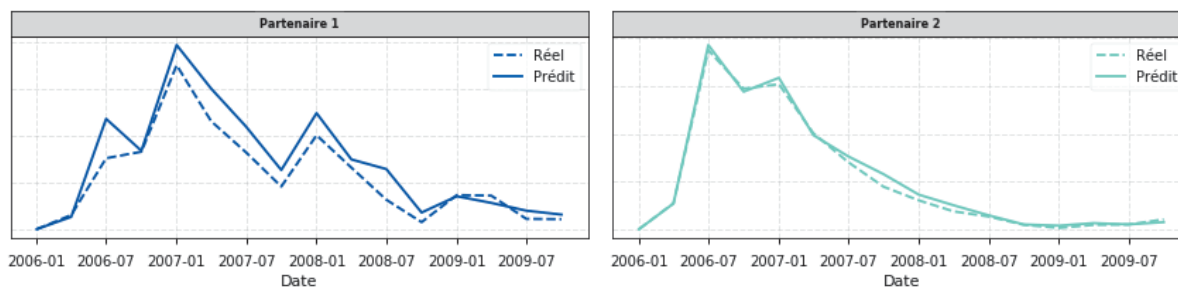
chacune des autres périodes sont disponibles en Annexe 2.7. De manière générale, et à quelques exceptions près (principalement vers la fin de la période considérée, quand les taux sont plus erratiques), les courbes s'adaptent plutôt bien aux observations pour les deux partenaires et donc pour deux populations différentes.



GRAPHIQUE 2.4 – Résultats du modèle (base de test) pour la période Janvier-Mars 2007.

Nous calculons également les montants de transferts selon la formule donnée en Equation 2.7, et représentons les résultats avec le Graphique 2.5. Au global, on observe une bonne adéquation sur la base de test malgré une sur-évaluation quasi-systématique chez le partenaire 1. Au global, le modèle proposé explique plus de 80% de la variance chez le partenaire 1, et plus de 99% chez le partenaire 2.

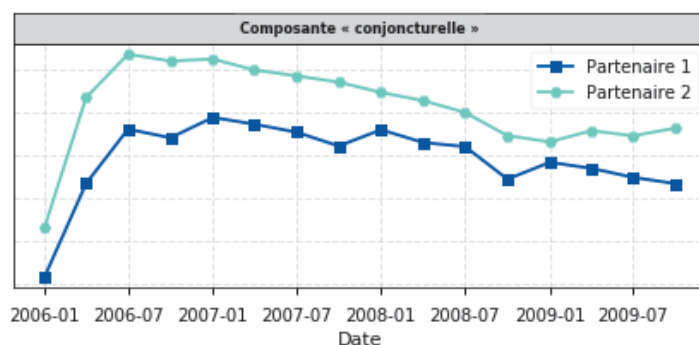
Nous nous également intéressons au $a_{0,t}^{\text{part}}$ dans le Graphique 2.6. Pour rappel, ces paramètres représentent une composante « conjoncturelle », liée au partenaire en question. L'écart relatif entre les 2 courbes pourrait s'expliquer, d'une part par l'impact des incitations de transfert éventuellement menées - cet écart semblant s'amenuiser quelque peu dans le temps, soit que les incitations diminuent, soit que leur effet s'amenuise - mais également par les taux servis : sur les 5 années précédant la mise en œuvre de l'amendement Fourgous, le partenaire 1 a en effet en moyenne des taux de ravalorisa-



GRAPHIQUE 2.5 – Comparaison entre montants de transfert réels et estimés (base de test).

tion des contrats plus élevés que le partenaire 2. Par ailleurs, une partie des produits du partenaire 1 sont destinés à la préparation de la retraite; les assurés sont donc peut-être moins intéressés au transfert.

La forme des courbes, fortement croissante dans les premiers temps, avant de diminuer régulièrement dans le temps, pourrait être une conjonction entre d'une part un aspect comportemental - les personnes intéressées à faire un transfert le font relativement rapidement après connaissance de la législation -, et d'autre part un artifice statistique - plus le temps passe, plus le nombre de transferts possibles restants est faible -. Ces paramètres, qui jouent un rôle majeur pour le modèle, sont très difficiles à exploiter. Dans l'absolu, il faudrait pouvoir les relier avec les éventuelles incitations menées ce qui nécessiterait d'avoir des indicateurs objectifs. Nous n'avons pas à disposition de tels éléments, ce qui constitue une limite majeure à une analyse détaillée.



GRAPHIQUE 2.6 – Analyse des $a_{0,t}^{part}$.

2.5 Discussions

Dans ce qui suit, nous discutons de la modélisation proposée et analysons les premiers éléments observés concernant la loi PACTE, puis envisageons les possibles réglementations à venir.

2.5.1 Un compromis simplicité / précision

La Section 2.2 nous a permis de faire un état des lieux des effets de l'amendement Fourgous 14 ans après, et de comparer certains des éléments constitutif de cet amendement à ceux inclus dans la loi PACTE. Si la comparaison entre les deux met en exergue des différences notables, les points communs laissent néanmoins la possibilité de dresser un parallèle.

Si une approche globale de type « produit en croix » (en supposant que le ratio $\frac{\text{PM transférée}}{\text{PM concernée}}$ observé pour les transferts liés à l'amendement Fourgous sera similaire à celui observé pour les transferts de la loi PACTE) est possible et sûrement la solution la plus simple, elle peut poser un certain nombre de problématiques si le portefeuille concerné par Fourgous est différent de celui concerné par la loi PACTE. Prenons l'exemple purement théorique présenté dans le Tableau 2.3. Le portefeuille 1 est un portefeuille ancien, qui a été soumis à l'amendement Fourgous, tandis que le portefeuille 2 est plus récent et soumis à la loi PACTE. Les 2 populations ont le même comportement face au transfert indiqué et donc des taux de transferts similaires. Une approche par « produit en croix » sur-estimerait de 8% les transferts en nombre et en montant, alors même que les caractéristiques des portefeuilles sont similaires.

TABLEAU 2.3 – Exemple théorique de limite d'une approche type « produit en croix ».

Âge	Portefeuille 1		Portefeuille 2		Taux de transfert
	Nombre de contrats	PM moyenne	Nombre de contrats	PM moyenne	
60	10	100	7	100	10%
61	11	105	5	105	9%
62	8	110	20	110	7%
63	6	115	3	115	5%
64	3	120	0	120	3%
65	1	125	4	125	1%

L'approche proposée permet ainsi d'offrir un cadre un peu plus large et d'affiner les

résultats en prenant en compte en particulier la structure du portefeuille, permettant une potentielle utilisation pour la loi PACTE, en gardant cependant à l'esprit les limites d'une telle extrapolation. Trois biais en particulier nous semblent à mentionner : premièrement, le risque de modèle, lié tant à la spécification du modèle qu'au calibrage des paramètres; deuxièmement, le biais comportemental, lié à l'hypothèse que les deux législations induiront les mêmes comportements; enfin, le biais temporel, lié au fait qu'à législations identiques, les comportements se sont modifiés entre 2005 et 2020, notamment suite à l'évolution de l'économie dans l'intervalle (crise financière, paysage de l'assurance vie différent avec de nouveaux produits...).

2.5.2 Premiers éléments comparatifs avec les transferts PACTE

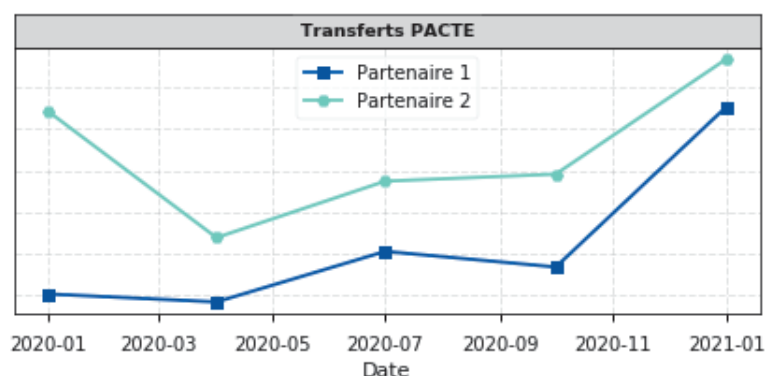
À date, la loi PACTE a été mise en place depuis plus d'un an (début 2020) et de premiers éléments peuvent être analysés. Les caractéristiques des portefeuilles considérés sont données par le Tableau 2.4 : les populations sont plus jeunes, avec une ancienneté de contrat plus ancienne mais moins d'épargne, et effectuant moins de versements spontanés mais davantage programmés.

TABLEAU 2.4 – Comparaison entre les partenaires 1 et 2 pour quelques variables.

Variable	Partenaire 1	Partenaire 2
Âge	59,8	59,3
Ancienneté	12	14,6
PM	21 164	19 803
Rachat partiel moyen sur les 3 dernières années	419,4	450,8
Versement libre moyen sur les 3 dernières années	518,7	432,4
Versements programmé moyen sur les 3 dernières années	127,3	176,5

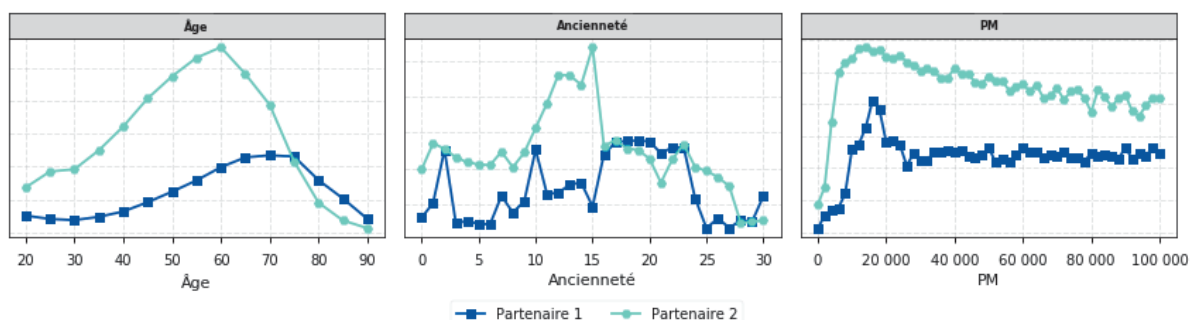
Le Graphique 2.7 indique les nombres de transferts effectués. On remarque que la forme est très différente des premiers points du Graphique 2.2, indiquant a minima une partie « conjoncturelle » très différente. Il est très difficile d'analyser cette différence, sachant que l'approche préparatoire à PACTE a été différente et que le contexte sanitaire a modifié un certain nombre de perspectives.

Le Graphique 2.8 indique les taux de transfert observés à date selon les caractéristiques considérées précédemment. Si ces graphiques ne sont pas encore définitifs et



GRAPHIQUE 2.7 – Transferts PACTE (en nombre).

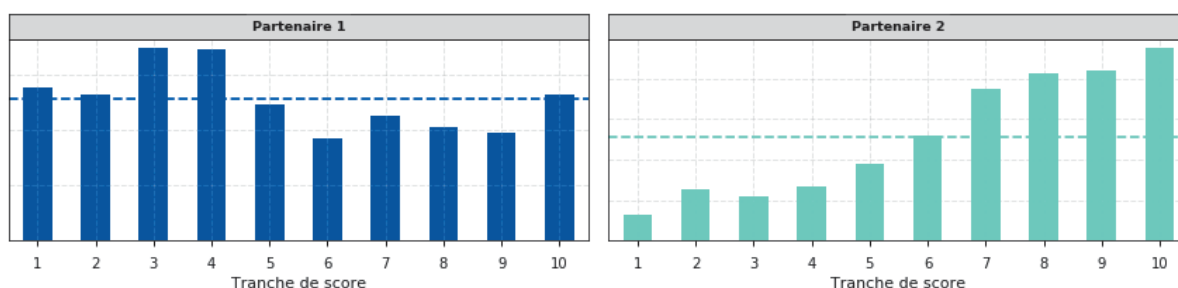
sont donc à manipuler avec précaution, force est de constater une divergence avec les transferts Fourgous. Si la courbe par âge garde une courbe en cloche chez les 2 partenaires, on observe un décalage net du pic vers 70 ans chez le partenaire 1. Les taux par ancienneté sont très difficilement lisibles, tandis que l'analyse par PM montre plutôt une décroissance.



GRAPHIQUE 2.8 – Taux de transfert PACTE.

Si l'impact de la conjoncture est difficile à analyser - d'autant plus dans un contexte sanitaire particulier modifiant vraisemblablement les comportements des assurés -, nous pouvons en revanche facilement analyser la partie structurelle. Pour cela, nous appliquons le modèle calibré pour les transferts Fourgous, puis trions les scores de façon croissante et calculons les taux de transfert PACTE observés pour chaque tranche de score ; le Graphique 2.9 représente ces taux de transfert PACTE observés par tranche de score Fourgous croissant pour la période Juillet-Septembre 2020 (les graphiques des autres périodes, similaires, sont disponibles en Annexe 2.7). Les conclusions pour chacun des partenaires sont antinomiques. Si pour le partenaire 1, le modèle calibré sur Fourgous ne permet pas de cibler les personnes intéressées à un transfert PACTE,

c'est le contraire pour le partenaire 2, pour lequel on remarque que les taux de transferts augmentent avec la tranche de score. Ce résultat interroge sur le fond : sont-ce les comportements qui ont changé, ou est-ce le modèle qui est inadapté au partenaire 1, peu concerné par les transferts Fourgous sur la période d'apprentissage ? L'hétérogénéité des comportements de transfert structurel en fonction des différents portefeuilles, peu visible sur Fourgous, est ainsi ici mis en exergue.



GRAPHIQUE 2.9 – Taux de transfert PACTE par tranche de score Fourgous.

2.5.3 Réflexion autour de l'évolution réglementaire

La loi PACTE semble s'inscrire dans un cadre global d'évolution de l'assurance.

En assurance emprunteur, l'évolution s'est faite de manière progressive. En 2010, la loi Lagarde a dans un premier temps abrogé l'obligation pour les assurés de souscrire au contrat de groupe imposé par l'établissement bancaire (le taux d'intérêt du prêt ne pouvant être affecté par le choix ou non de l'assuré d'y souscrire). Les assurés ont donc dès lors eu la possibilité de souscrire à l'assurance de leur choix ; les banques étant dans l'obligation de justifier tout refus d'assurance emprunteur délégué proposé par l'assuré. En 2014, la loi Hamon donne à l'assuré la possibilité de résilier son contrat initial d'assurance emprunteur pour une offre plus intéressante, à la condition que cette résiliation intervienne dans l'année qui suit la signature de l'offre de prêt et que la nouvelle assurance emprunteur offre des garanties similaires à celle initialement souscrite. La demande doit se faire par lettre recommandée avec accusé réception au plus tard 15 jours avant la fin de la première année de l'offre de prêt ; l'organisme prêteur dispose alors d'un délai de 10 jours pour répondre. En cas d'acceptation, ni l'offre de prêt ni le taux d'intérêt ne peuvent être modifiés. Enfin, en 2017, la loi Sapin 2, autrement appelée amendement Bourquin, permet à l'assuré de résilier son contrat d'assurance emprunteur pour lui en substituer un autre à chaque date anniversaire du

prêt, étant entendu que cette possibilité peut s'exercer autant de fois que voulu. Un préavis de 2 mois avant la date de résiliation annuelle doit toutefois être respectée par l'assuré, et comme pour la loi Hamon, la nouvelle assurance doit proposer des garanties équivalentes et la banque a 10 jours pour répondre à la demande. Ces lois, qui se succèdent relativement rapidement, accordent une latéralité plus importante à l'assuré pour la négociation de son prêt immobilier. Il peut ainsi faire jouer la concurrence et choisir l'offre la plus adaptée à son profil.

Ces évolutions en emprunteur trouvent écho en épargne avec l'amendement Fourgous puis la loi PACTE. Si le cheminement, qui consiste à offrir une palette d'opportunités plus grande pour l'assuré semble clair, les différents jalons qui le constitue sont une réelle problématique pour l'assureur. Dans un contexte réglementaire et concurrentiel de plus en plus fort, la gestion des risques nécessite d'anticiper autant que faire se peut la législation évolutive. Dans le cadre de l'assurance vie, un des points en suspens concerne la transférabilité des contrats d'un assureur à un autre sans perte d'antériorité fiscale. Si cette possibilité, réclamée par certains car offrant à l'épargnant une liberté plus importante et la possibilité de faire jouer la concurrence, est pour le moment écartée, elle reste néanmoins un leitmotiv. Cette perspective aurait des conséquences majeures, et vraisemblablement plus difficiles à anticiper : risque de transferts massifs (lors d'une forte remontée des taux par exemple), variabilité très importante des provisions... Cela pourrait engendrer une tension commerciale chez les assureurs qui auraient à repenser leur façon de gérer les actifs d'une façon plus prudente, impactant possiblement à la baisse les rendements servis. De la même façon qu'elle doit prendre en considération des risques méconnus et protéiformes (risque cyber, risque de réputation, ...) dans le cadre de ses prises de décision, une compagnie d'assurance doit y intégrer la composante législative, à même d'apporter des bouleversements structurants dans sa gestion des risques.

2.6 Conclusion

Dans ce papier, nous nous sommes intéressés à un type de comportement assuré rendu possible par un changement de réglementation : les transferts, et plus particulièrement ceux issus de l'amendement Fourgous et la loi PACTE. Notre contribution est triple. Premièrement, nous avons proposé une modélisation simple des transferts Fourgous s'appuyant sur une analyse descriptive détaillée. Ce travail nous a conduit

dans un second temps à comparer les résultats de l'amendement Fourgous avec les premiers éléments observés pour la loi PACTE, après avoir pris soin de comparer les points communs et différences notables entre ces deux réglementations ; ce travail sera bien sûr à poursuivre. Pour terminer, nous avons élargi la réflexion en discutant de l'évolution réglementaire.

2.7 Annexes

Modèle XGBoost

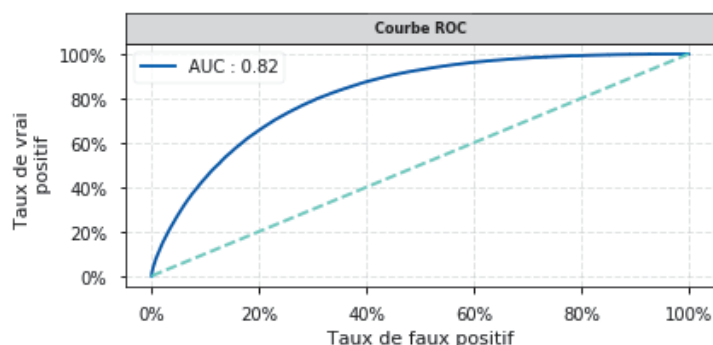
Nous avons calibré un modèle pour prédire les transferts Fourgous puis analysé l'importance des variables telle que donnée par la méthode SHAP (voir Lundberg *et al.* [2018]). La variable prédite dans ce modèle est la réalisation d'un transfert Fourgous sur la période considérée (2006-2009). Les variables retenues pour le modèle sont les suivantes :

- l'âge;
- l'ancienneté;
- la provision mathématique;
- la moyenne des versements libres sur les trois derniers mois;
- la moyenne des versements programmés sur les trois derniers mois;
- la moyenne des rachats partiels sur les trois derniers mois;
- le code entrée dans le contrat;
- le sexe;
- la situation familiale;
- le canal de distribution.

Nous n'intégrons volontairement pas la variable « partenaire ». Ces variables sont prises selon la connaissance que l'on en a au 1^{er} janvier 2006. Le modèle calibré est un XGBoost (voir Chen et Guestrin [2016]) respectant la méthodologie classique en *data science* à savoir séparation entre base d'entraînement, de validation et de test (respectivement 60%, 20% et 20% de la base totale). Les calculs ont été réalisés via la librairie *xgboost* sous python.

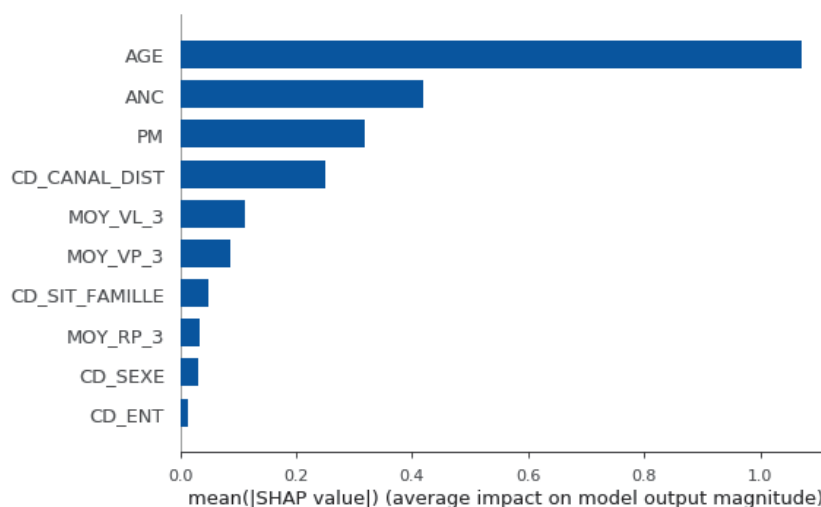
Les résultats ont été analysés via une métrique usuelle de classification, l'AUC (*Area Under ROC Curve*). Le Graphique 2.10 présente la courbe ROC obtenue. L'AUC est de 0,82 ce qui témoigne d'un réel apport du modèle par rapport au hasard. Notons que l'introduction de la variable « partenaire » n'augmente que très peu cette valeur. Ce n'est d'ailleurs pas la variable la plus importante : elle n'arrive qu'en 2^{ème} position, après l'âge.

L'importance des variables explicatives est pour sa part donnée par le Graphique 2.11. On observe que l'âge est, de loin, la variable la plus importante : les variables suivantes,



GRAPHIQUE 2.10 – Courbe ROC.

l'ancienneté et la PM, ont un impact bien plus faible sur les prédictions. Cette analyse simple conforte notre sélection préliminaire concernant les variables d'intérêt. Nous notons néanmoins que le canal de distribution a un impact proche de celui de la PM (les autres variables étant nettement moins importantes), ce qui aurait pu justifier son utilisation dans la modélisation.



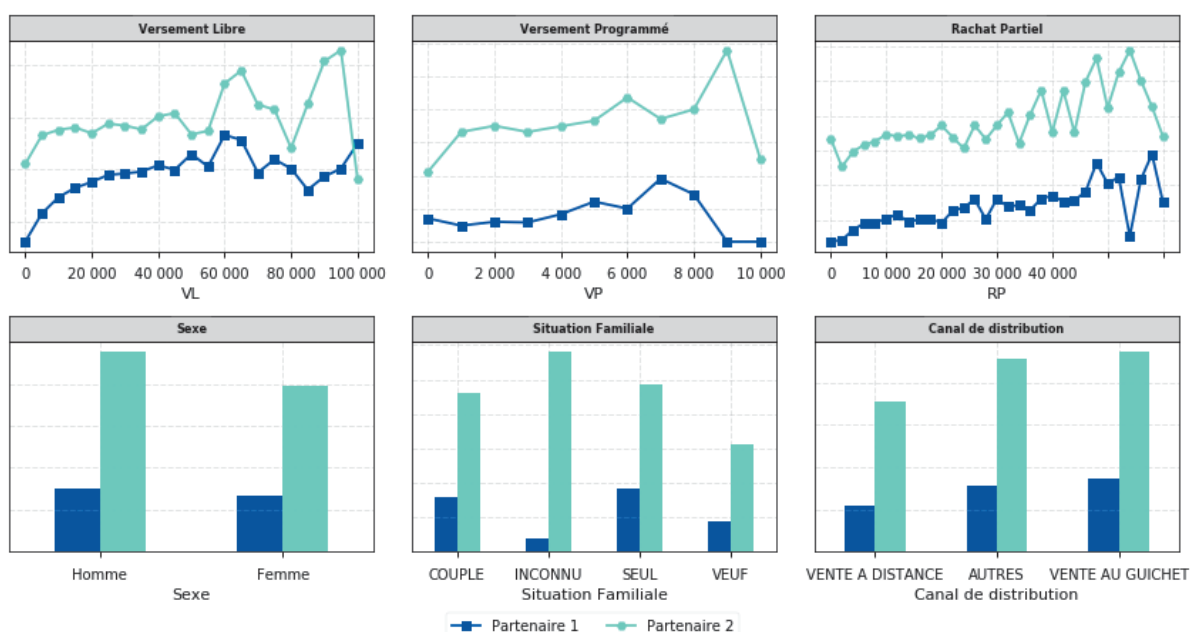
GRAPHIQUE 2.11 – Variables explicatives du transfert Fourgous.

Statistiques

Dans cette partie, nous complétons les éléments présentés à la Section 2.3.2 en considérant les taux de transfert en fonction :

- du montant moyen de rachats partiels passés (sur les 3 dernières années) ;

- du montant moyen de versements programmés passés (sur les 3 dernières années);
- du montant moyen de versements libres passés (sur les 3 dernières années);
- du canal de distribution;
- par sexe;
- par situation familiale.

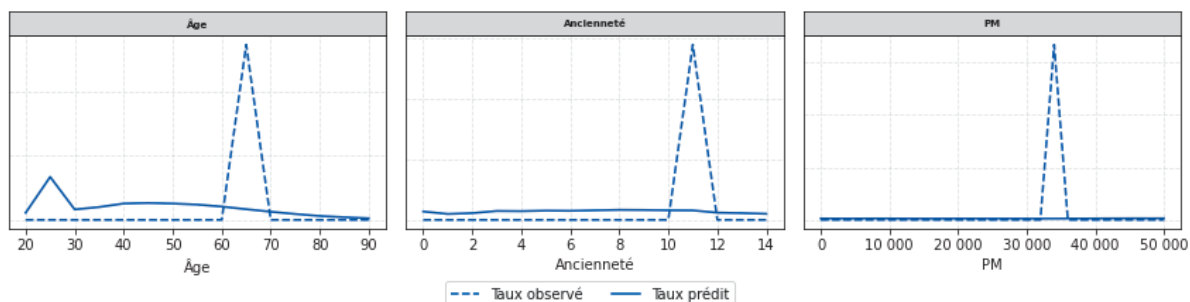


GRAPHIQUE 2.12 – Taux de transfert Fourgous.

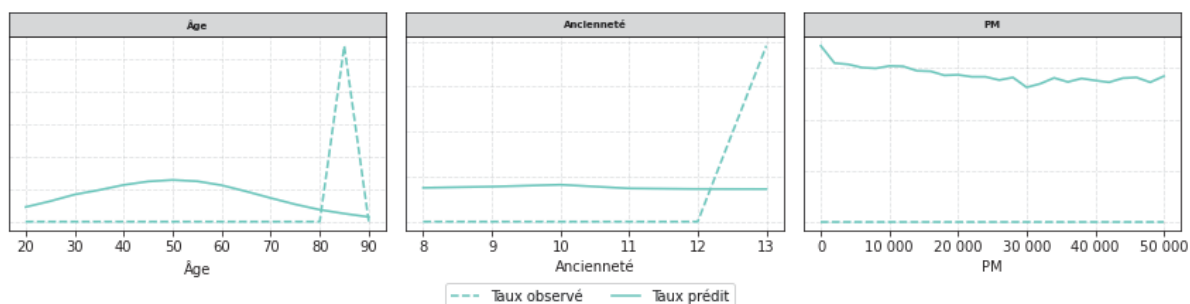
Résultats complets du modèle

Dans cette partie, nous affichons les résultats du modèle pour les différentes périodes considérées sur la base de test.

Pour la première période (Janvier-Mars 2006, Graphique 2.13), l'adéquation est mauvaise car les taux sont pratiquement tous nuls (très peu de transferts); pour les autres graphiques, l'adéquation est globalement satisfaisante même si la volatilité très forte nécessite une analyse prudente des graphiques.

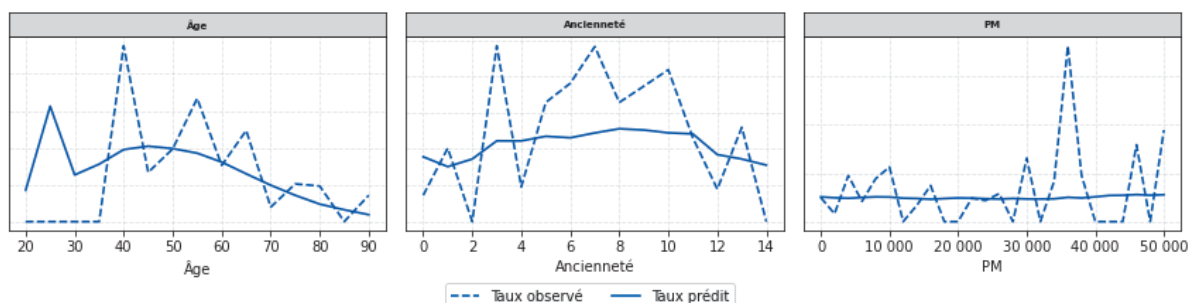


(a) Partenaire 1.

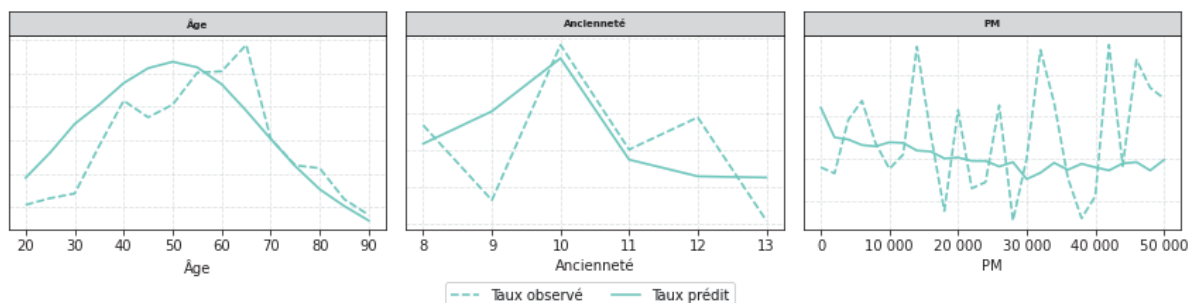


(b) Partenaire 2.

GRAPHIQUE 2.13 – Résultats du modèle (base de test) pour la période Janvier-Mars 2006.

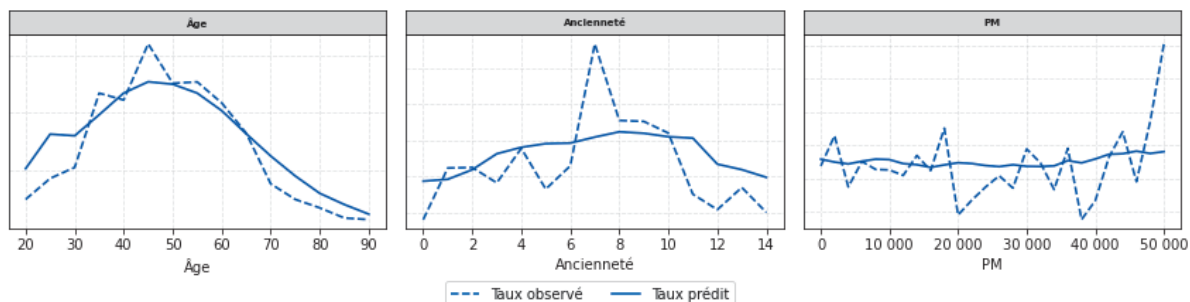


(a) Partenaire 1.

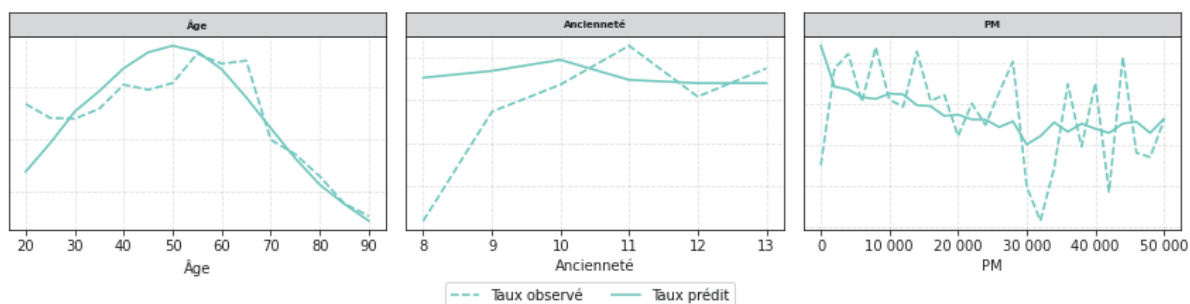


(b) Partenaire 2.

GRAPHIQUE 2.14 – Résultats du modèle (base de test) pour la période Avril-Juin 2006.

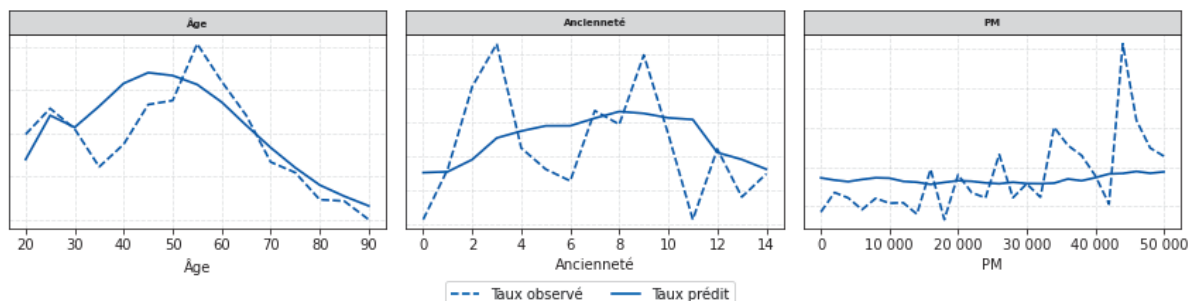


(a) Partenaire 1.

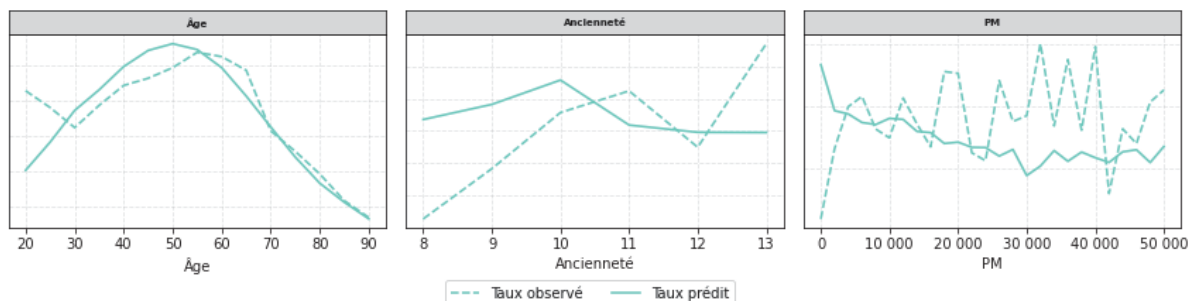


(b) Partenaire 2.

GRAPHIQUE 2.15 – Résultats du modèle (base de test) pour la période Juillet-Septembre 2006.

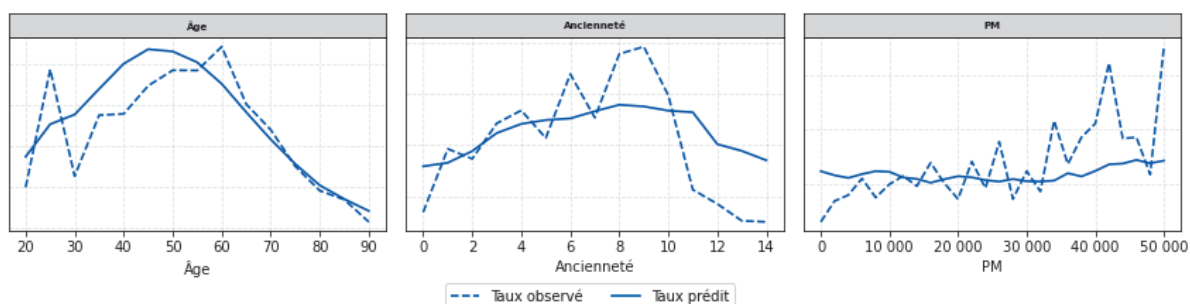


(a) Partenaire 1.

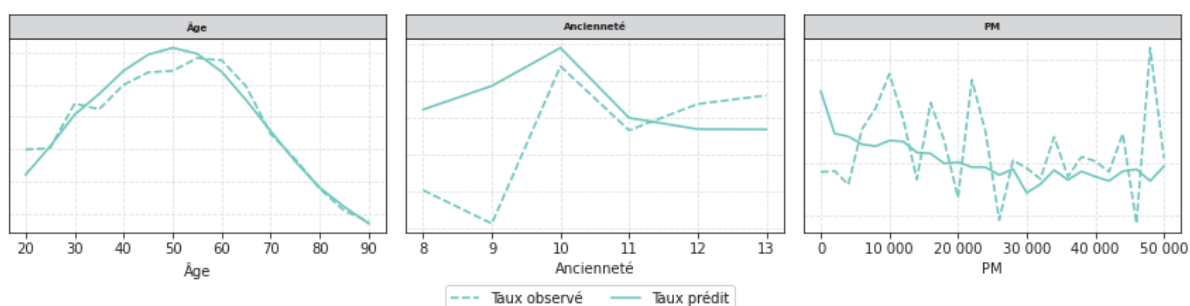


(b) Partenaire 2.

GRAPHIQUE 2.16 – Résultats du modèle (base de test) pour la période Octobre-Décembre 2006.

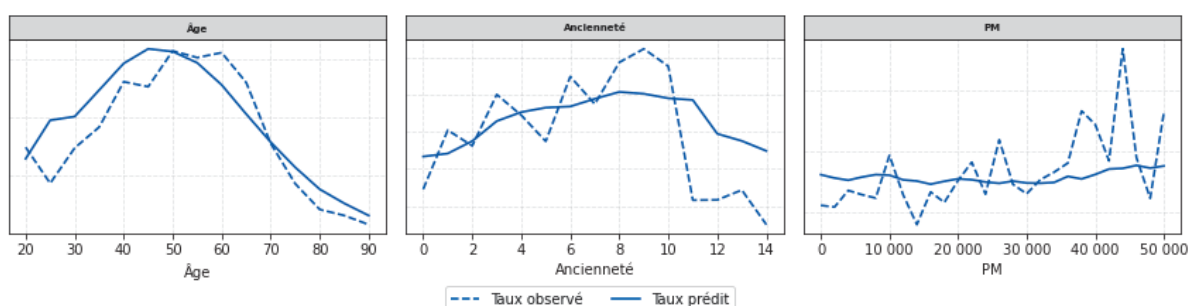


(a) Partenaire 1.

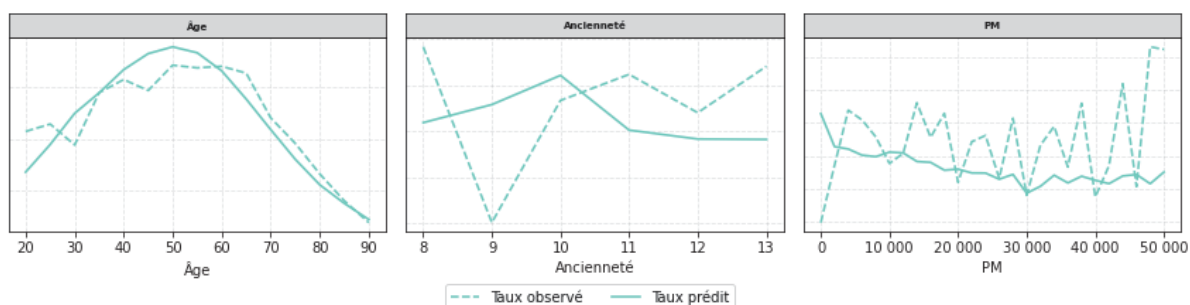


(b) Partenaire 2.

GRAPHIQUE 2.17 – Résultats du modèle (base de test) pour la période Janvier-Mars 2007.

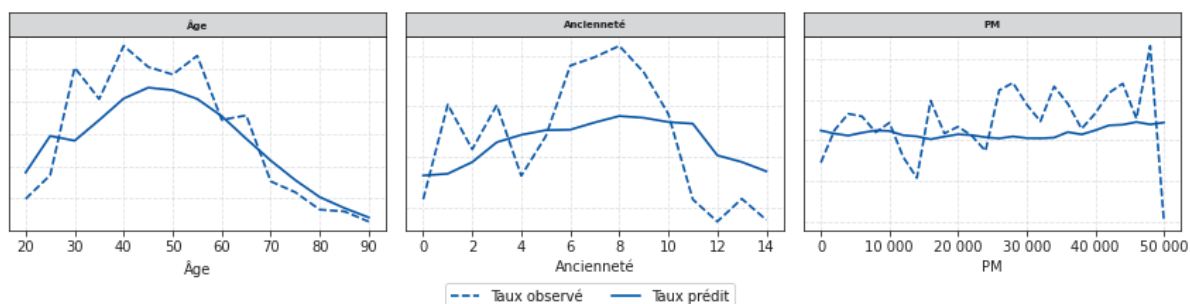


(a) Partenaire 1.

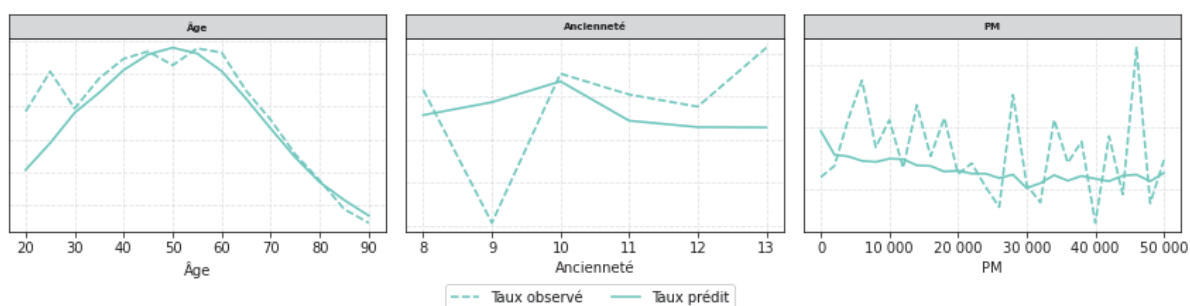


(b) Partenaire 2.

GRAPHIQUE 2.18 – Résultats du modèle (base de test) pour la période Avril-Juin 2007.

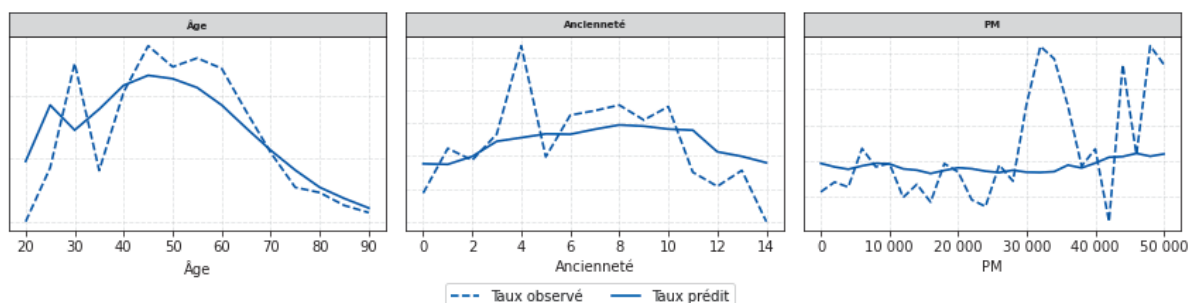


(a) Partenaire 1.

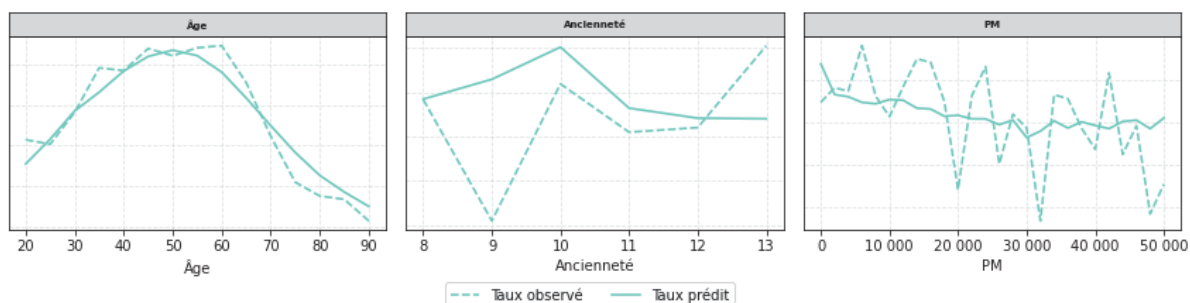


(b) Partenaire 2.

GRAPHIQUE 2.19 – Résultats du modèle (base de test) pour la période Juillet-Septembre 2007.

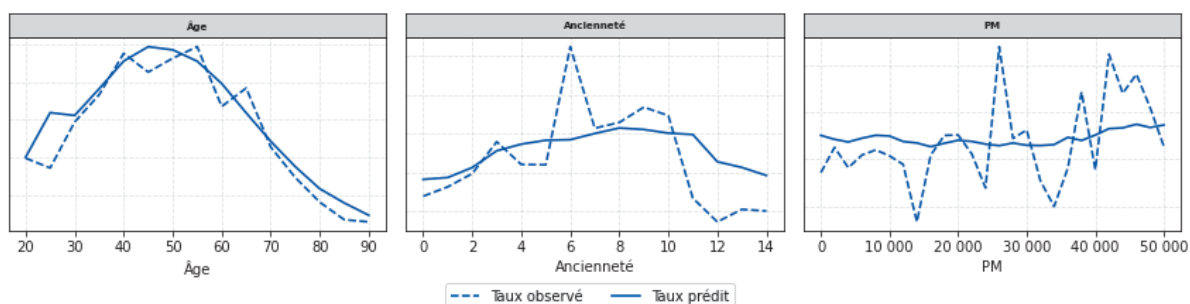


(a) Partenaire 1.

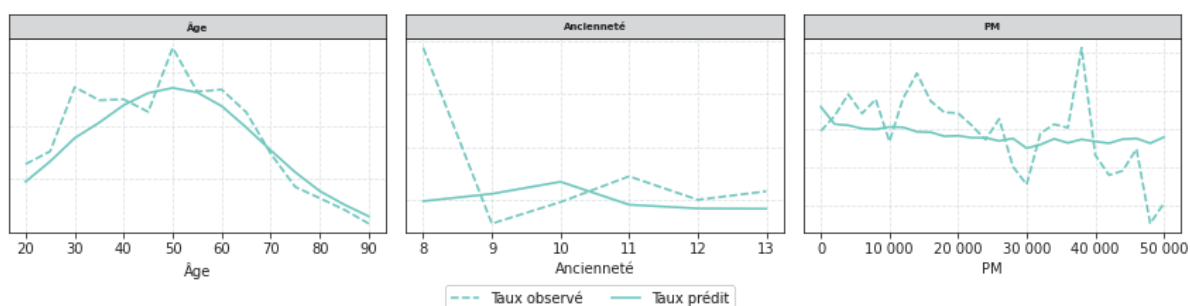


(b) Partenaire 2.

GRAPHIQUE 2.20 – Résultats du modèle (base de test) pour la période Octobre-Décembre 2007.

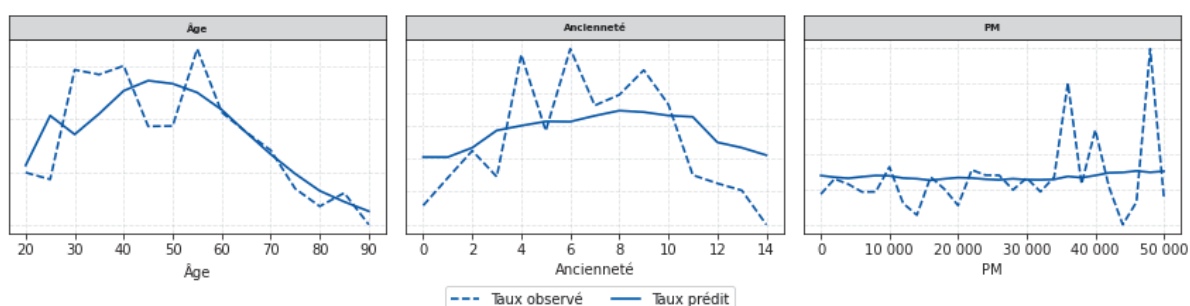


(a) Partenaire 1.

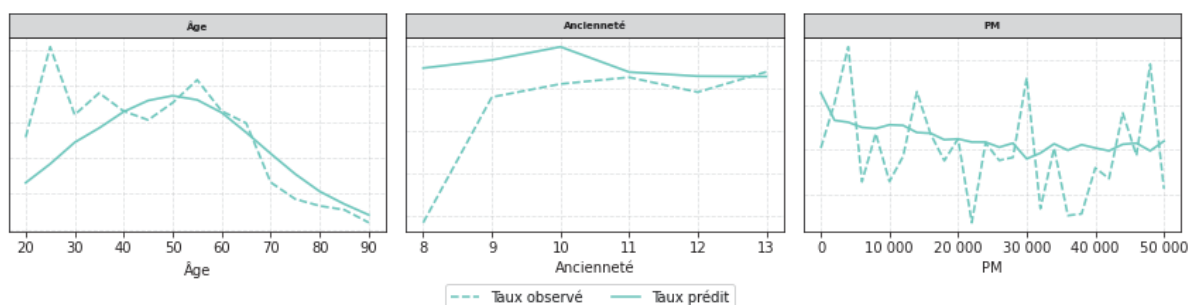


(b) Partenaire 2.

GRAPHIQUE 2.21 – Résultats du modèle (base de test) pour la période Janvier-Mars 2008.

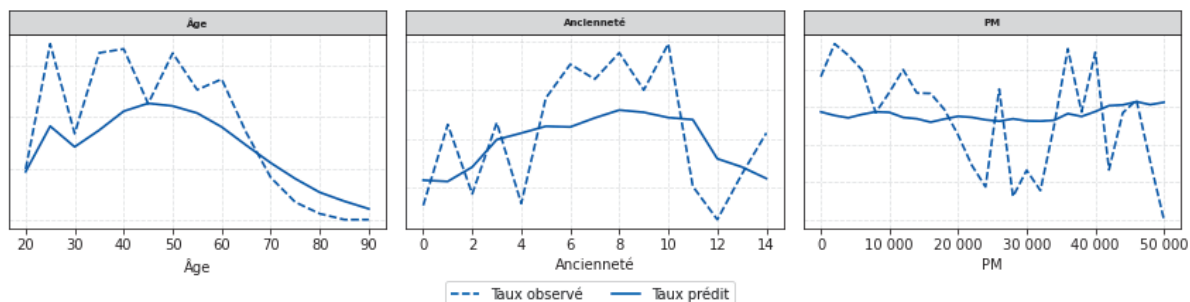


(a) Partenaire 1.

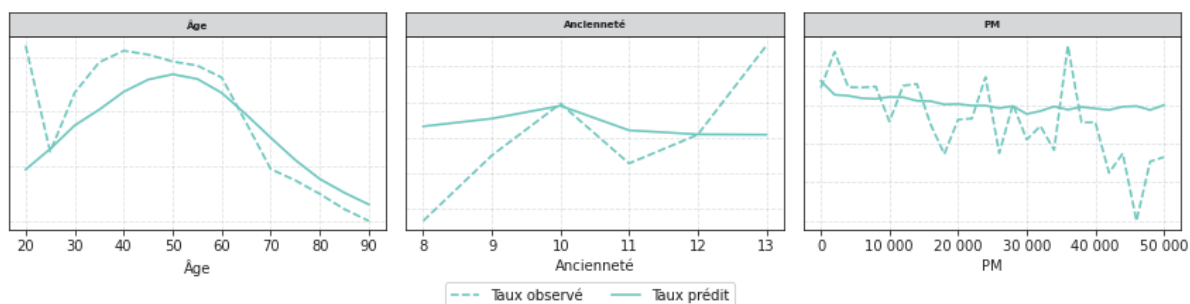


(b) Partenaire 2.

GRAPHIQUE 2.22 – Résultats du modèle (base de test) pour la période Avril-Juin 2008.

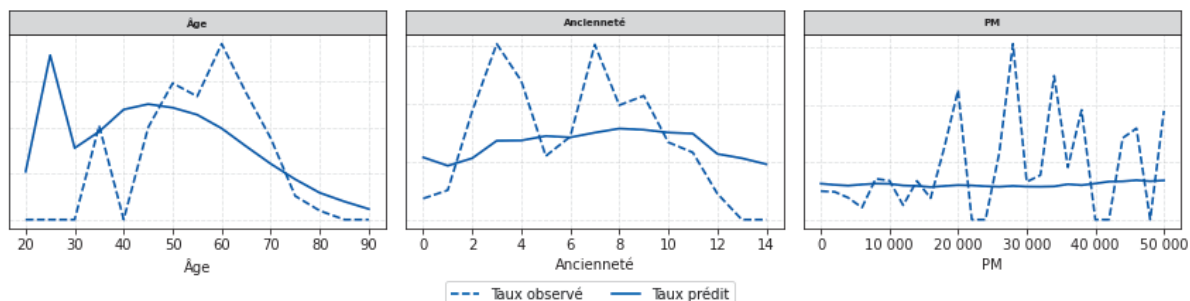


(a) Partenaire 1.

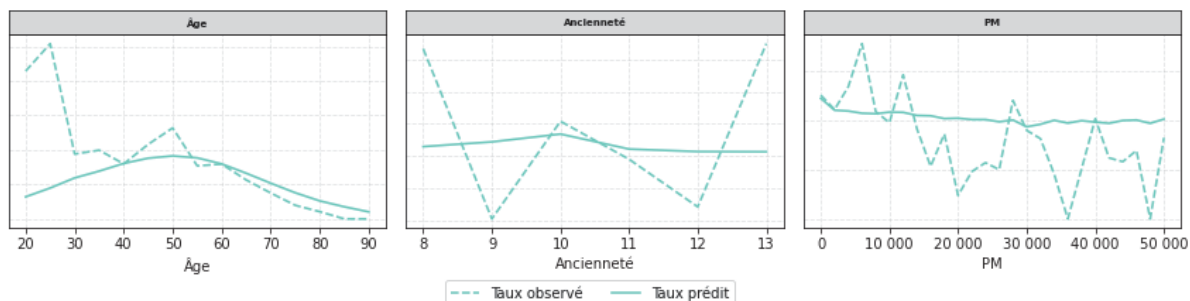


(b) Partenaire 2.

GRAPHIQUE 2.23 – Résultats du modèle (base de test) pour la période Juillet-Septembre 2008.

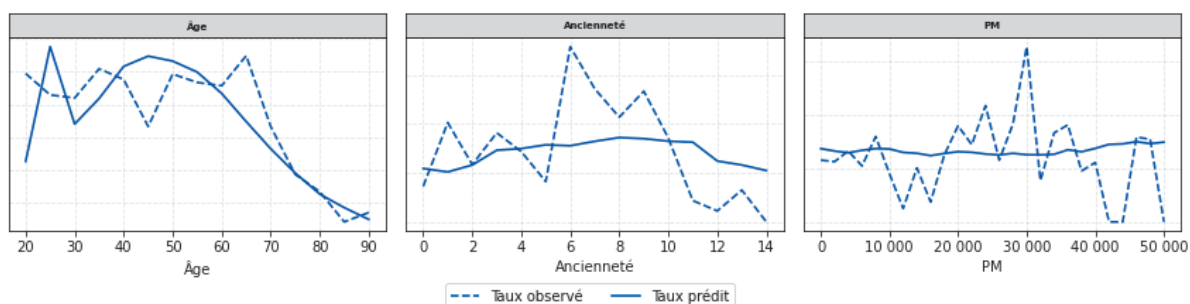


(a) Partenaire 1.

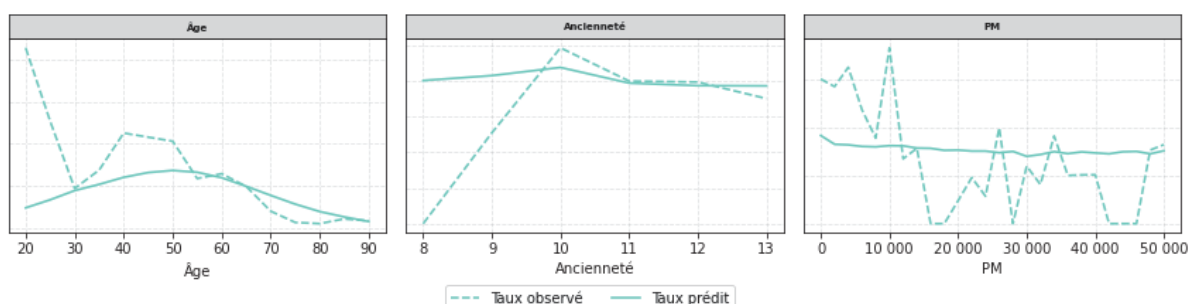


(b) Partenaire 2.

GRAPHIQUE 2.24 – Résultats du modèle (base de test) pour la période Octobre-Décembre 2008.

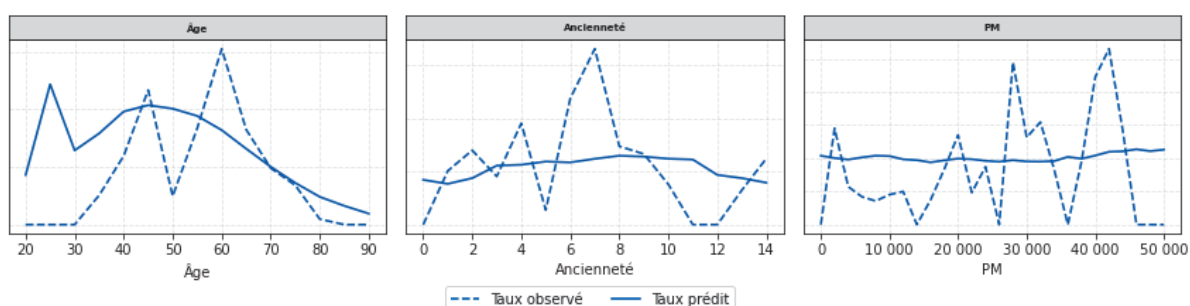


(a) Partenaire 1.

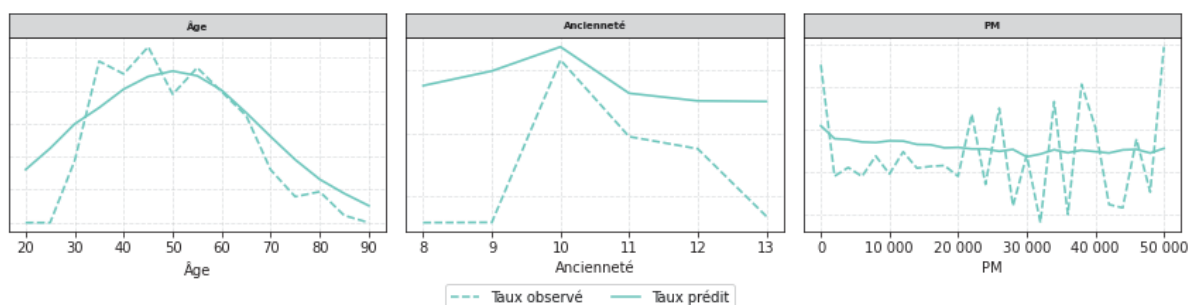


(b) Partenaire 2.

GRAPHIQUE 2.25 – Résultats du modèle (base de test) pour la période Janvier-Mars 2009.

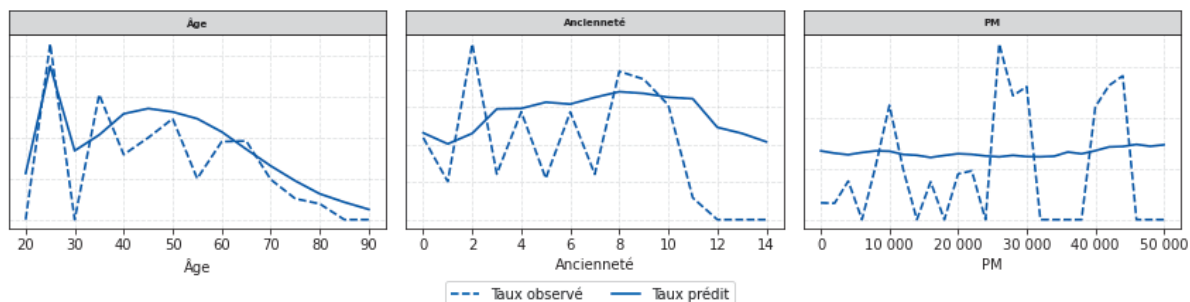


(a) Partenaire 1.

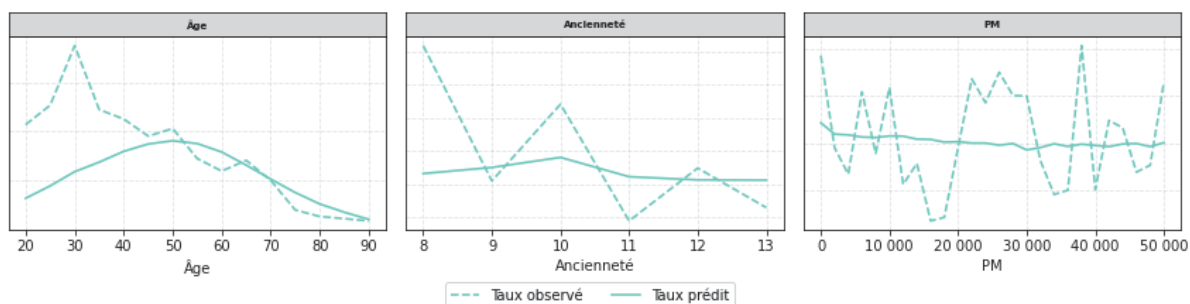


(b) Partenaire 2.

GRAPHIQUE 2.26 – Résultats du modèle (base de test) pour la période Avril-Juin 2009.

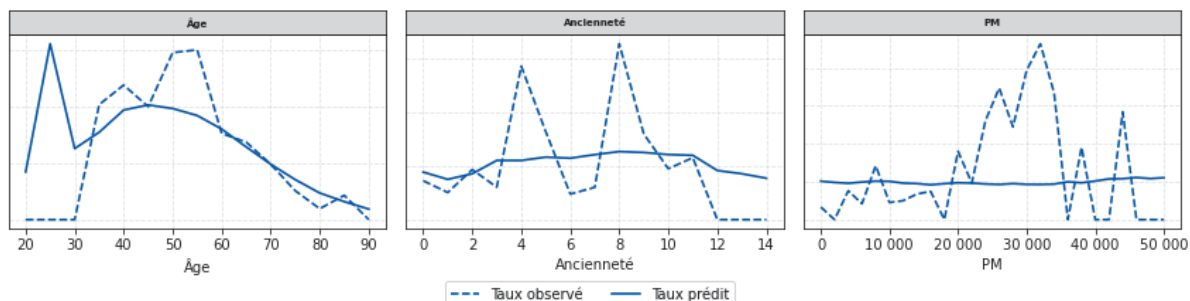


(a) Partenaire 1.

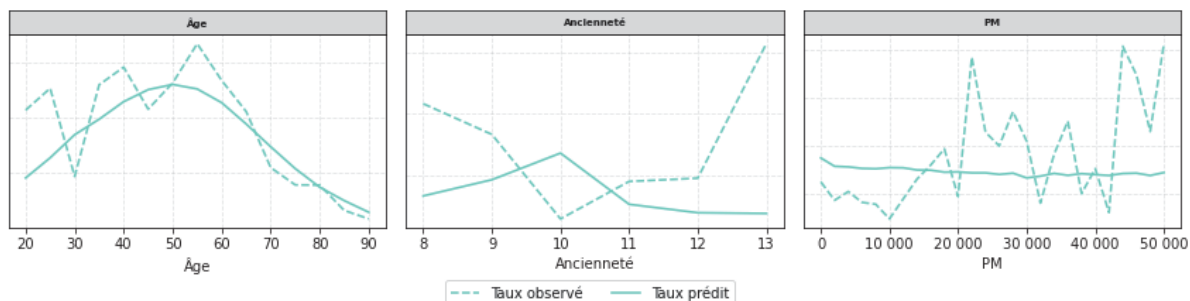


(b) Partenaire 2.

GRAPHIQUE 2.27 – Résultats du modèle (base de test) pour la période Juillet-Septembre 2009.



(a) Partenaire 1.

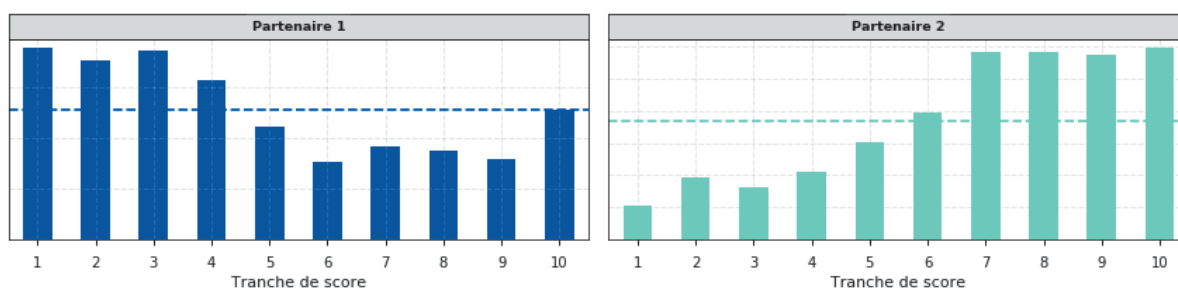


(b) Partenaire 2.

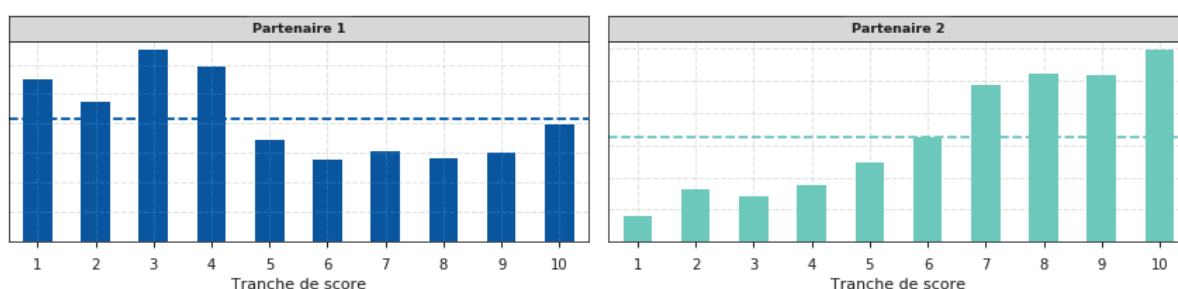
GRAPHIQUE 2.28 – Résultats du modèle (base de test) pour la période Octobre-Décembre 2009.

Transfert PACTE par score Fourgous croissant

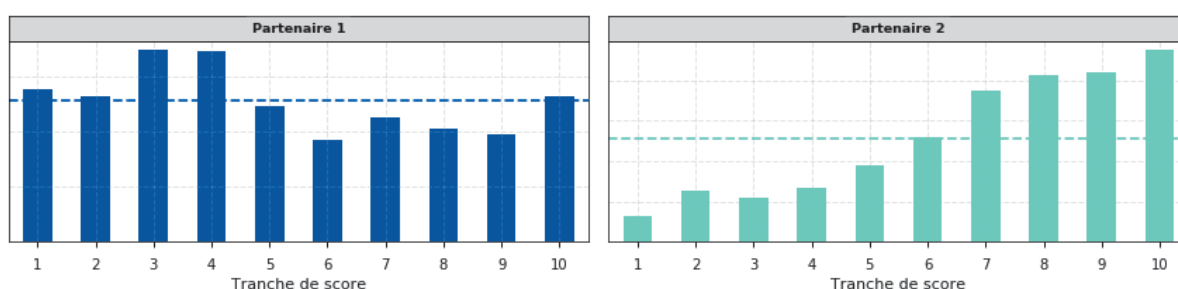
Dans cette partie, nous affichons les taux de transfert PACTE par score Fourgous croissant. Pour chaque période, le partenaire 2 a des taux croissants (même typologie de personnes intéressées à PACTE et à Fourgous), ce qui n'est pas le cas du partenaire 1.



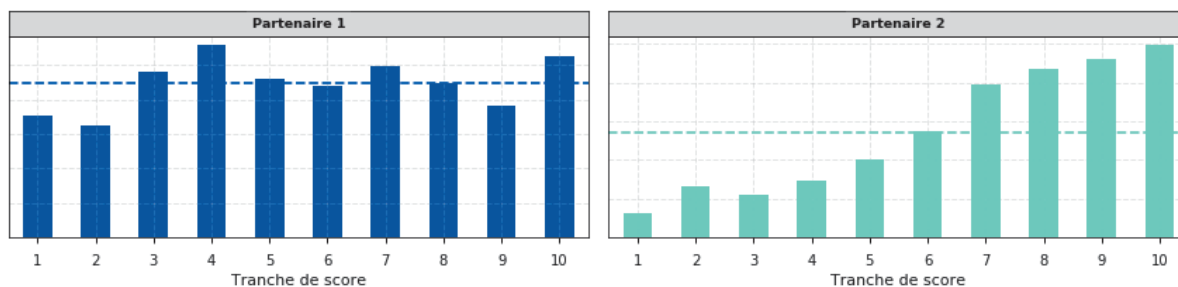
GRAPHIQUE 2.29 – Taux de transfert PACTE par tranche de score Fourgous pour la période Janvier-Mars 2020.



GRAPHIQUE 2.30 – Taux de transfert PACTE par tranche de score Fourgous pour la période Avril-Juin 2020.



GRAPHIQUE 2.31 – Taux de transfert PACTE par tranche de score Fourgous pour la période Juillet-Septembre 2020.



GRAPHIQUE 2.32 – Taux de transfert PACTE par tranche de score Fourgous pour la période Octobre-Décembre 2020.

Bibliographie

- ACPR : Orientations Nationales Complémentaires aux Spécifications Techniques pour l'exercice 2013 de préparation à Solvabilité II. 2013.
- B. Amrani : L'arbitrage dans les contrats d'épargne multi-support, 2013. Mémoire d'actuaire, CNAM.
- A. Ando et F. Modigliani : The "Life Cycle" Hypothesis of Saving : Aggregate Implications and Tests. *The American Economic Review*, 53(1):55–84, 1963. ISSN 00028282.
- A. R. Bacinello : Endogenous model of surrender conditions in equity-linked life insurance. *Insurance : Mathematics and Economics*, 37(2):270–296, 2005. ISSN 0167-6687. Papers presented at the 8th IME Conference, Rome, 14-16 June 2004.
- T. Brion : Modèles d'arbitrages dynamiques : Valorisation d'une option d'arbitrage dans le cadre de la Market Consistent Embedded Value, 2009. Mémoire d'actuaire, EURIA.
- T. Chen et C. Guestrin : XGBoost : A Scalable Tree Boosting System. *In Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, KDD '16, page 785–794, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery. ISBN 9781450342322.
- M. Costabile, I. Massabó et E. Russo : A binomial model for valuing equity-linked policies embedding surrender options. *Insurance : Mathematics and Economics*, 42(3):873–886, June 2008.

- H. S. Cox et Y. Lin : Annuity Lapse Modeling : Tobit or not Tobit? *Society of Actuaries*, 2006.
- J. D. Cummins : *An econometric model of the life insurance sector of the U.S. economy*. Lexington Books, 1975.
- A. Dar et C. Dodds : Interest Rates, the Emergency Fund Hypothesis and Saving through Endowment Policies : Some Empirical Evidence for the U.K. *Journal of Risk and Insurance*, 56:415, 1989.
- S. Detroulleau et S. Mouret : Modèle ALM : Apport de la Logique Floue dans la modélisation des comportements, 2013. Mémoire d'actuaire, ENSAE.
- O. Hamaoui : Modélisation du portefeuille de la gestion privée sous Solvabilité 2, 2012. Mémoire d'actuaire, CNAM.
- Y. Kagraoka : Modeling Insurance Surrenders by the Negative Binomial Model. 01 2005.
- C. Kim : Modeling Surrender and Lapse Rates With Economic Variables. *North American Actuarial Journal*, 9, 10 2005.
- W. Kuo, C. Tsai et W.-K. Chen : An Empirical Study on the Lapse Rate : The Cointegration Approach. *Journal of Risk and Insurance*, 70(3):489–508, 2003.
- S. Loisel et X. Milhaud : From deterministic to stochastic surrender risk models : impact of correlation crises on economic capital. *European Journal of Operational Research*, 214:348–357, May 2011.
- S. M. Lundberg, G. G. Erion et S.-I. Lee : Consistent individualized feature attribution for tree ensembles. *arXiv preprint arXiv :1802.03888*, 2018.
- R. C. Merton : Lifetime Portfolio Selection under Uncertainty : The Continuous-Time Case. *The Review of Economics and Statistics*, 51(3):247–257, 1969. ISSN 00346535, 15309142.
- R. C. Merton : Optimum consumption and portfolio rules in a continuous-time model. *Journal of Economic Theory*, 3(4):373 – 413, 1971. ISSN 0022-0531.
- X. Milhaud : *GLM mixtures and number of components : an application to the surrender risk in life insurance*. Theses, Université Claude Bernard - Lyon I, juillet 2012.

- X. Milhaud : Exogenous and endogenous risk factors management to predict surrender behaviours. *ASTIN Bulletin*, 43(3):373–398, 2013.
- X. Milhaud, S. Loisel et V. Maume-Deschamps : Surrender triggers in life insurance : what main features affect the surrender behavior in a classical economic context? *Bulletin Français d'Actuariat*, 11(22):5–48, 2011.
- J. F. Outreville : Whole-life insurance lapse rates and the emergency fund hypothesis. *Insurance : Mathematics and Economics*, 9(4):249 – 255, 1990. ISSN 0167-6687.
- F. Pedregosa, G. Varoquaux, A. Gramfort, V. Michel, B. Thirion, O. Grisel, M. Blondel, P. Prettenhofer, R. Weiss, V. Dubourg, J. Vanderplas, A. Passos, D. Cournapeau, M. Brucher, M. Perrot et E. Duchesnay : Scikit-learn : Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12:2825–2830, 2011.
- E. J. Pesando : The Interest Sensitivity of the Flow of Funds Through Life Insurance Companies : An Econometric Analysis. *The Journal of finance*, 29(4):11105–1121, 1974.
- A. E. Renshaw et S. Haberman : Statistical analysis of life assurance lapses. *Journal of the Institute of Actuaries*, 113(3):459–497, 1986.
- S. Seabold et J. Perktold : statsmodels : Econometric and statistical modeling with python. In *9th Python in Science Conference*, 2010.
- T. K. Siu : Fair valuation of participating policies with surrender options and regime switching. *Insurance : Mathematics and Economics*, 37(3):533–552, 2005. ISSN 0167-6687.

Chapitre 3

Hypothèses extrêmes en longévité : le cas du transhumanisme

« L'on espère de vieillir et l'on craint la vieillesse, c'est-à-dire l'on aime la vie et l'on fuit la mort. »

Jean de La Bruyère

Sommaire

Résumé	148
Abstract	148
3.1 Introduction	148
3.2 Data	153
3.3 Transhumanist assumption	154
3.3.1 Causes-of-death approach	154
3.3.2 Improvement in mortality quotients	157
3.3.3 Rejuvenation therapies	158
3.4 Discussion	160
3.5 Conclusion	162
3.6 Appendix	163
Bibliography	166

Ce chapitre est tiré de l'article "Longevity and extreme assumptions: some insights on transhumanism", co-écrit avec Anne Eyraud-Loisel et Anani Olympio.

Résumé

La gestion du risque de longévité est une problématique majeure pour les compagnies d'assurance. Cependant, la mortalité aux âges élevés n'est pas bien comprise et l'évolution future de la longévité ne fait pas l'objet d'un consensus parmi les démographes et actuaires. Dans cet article, nous étudions une hypothèse extrême défendue par les transhumanistes : une potentielle augmentation titanesque de la durée de vie, due aux progrès de la science et de la technologie. Nous proposons quelques pistes de réflexion sur le sujet et discutons de ses tenants et aboutissants.

Mots-clés : Longévité ; Transhumanisme.

Abstract

Dealing with longevity risk is a major concern for insurance companies. Nevertheless, mortality at high ages is not well understood and the future evolution of longevity did not reach a consensus among demographers and actuaries. In this paper, we investigate an extreme assumption led by transhumanists: a potential titanic increase in lifespan, due to advances in science and technology. We propose some insights on the matter and discuss its ins and outs.

Keywords: Longevity; Transhumanism.

3.1 Introduction

When dealing with longevity risk, insurers use prospective mortality tables to evaluate their liabilities. Such tables are constructed using models that extend observed past trends in the future. Various models have been proposed in the literature since the one considered as the reference, designed by Lee and Carter [1992]. For a review of those models, see e.g. Booth and Tickle [2008], Cairns et al. [2008] or Barrieu et al. [2012]. Whatever model is chosen to fit the data, there can be a real issue with the very fact of extending past trends in the future without taking into account possible changes in the evolution of longevity.

For illustrations of events that could interfere with the future evolution of longevity, a quick look in dedicated papers is sufficient. For instance, in June 2017, the American company *Bioquark*¹ announced the upcoming launch of a clinical trial that aims at bringing brain-dead patients back to life using stem cells. Besides the numerous ethical questions that such an attempt brings, it also raises some scientific issues about the future evolution of longevity and the way for insurers to capture the risk that people live much longer than expected by their mortality tables.

There are two main points of view regarding the future evolution of longevity. The first one, led by Olshansky et al. [2005] considers that the rise in life expectancy observed in the past two centuries may soon come to an end. Their conclusion is drawn by the analysis of obesity in the United States and the fact that it is not taken into account when forecasting the evolution of life expectancy while this, and more broadly health conditions, deeply impact mortality. Other than obesity, self-destructive behaviours can also be a concern: Case and Deaton [2017] show an increase in mortality among white non-Hispanic Americans in midlife. Those additional deaths, called “deaths of despair”, are due to drug overdoses, suicides and alcohol abuse. In addition to individual behaviour, global issues arise, many of which can be attributed to man. For instance, pollution is a real concern and is known to have a significant impact on human life (see Brunekreef et al. [2009]; Samek [2016]; Sanyal et al. [2018] for a few examples), not to mention wars or antibiotic resistance, a long-time concern for the medical community (see e.g. Frieri et al. [2017]; Levy [1998]; Neu [1992]).

The second viewpoint considers that there is no reason why life expectancy should stop increasing in the future. This viewpoint is discussed in Oeppen and Vaupel [2002] and also tackles the apparent leveling off in life expectancy in some countries, explaining that it is in reality an artifact.

Linked with this topic is the issue of the maximum lifespan. Indeed, if we assume that there exists a limit age beyond which survival is impossible, then no matter the improvements made in longevity, life expectancy will eventually reach a limit and cease to increase. Here again, there seems to be no general consensus on whether such a limit exists or not. The work of Hayflick [1965] on cells led to the definition of a “Hayflick limit”, which is the maximum number of time, shown to be included between 40 and 60, that a normal human fetal cell will divide in cell culture before

1. See <http://www.bioquark.com/>.

senescence: this could be seen as ageing at a cellular level. From this, models can be constructed to link the “Hayflick limit” to maximum lifespan (e.g. Clarke [2009]; Juckett [1987]). This work have not necessarily found echo in the circle of demographers, all of whom do not share the same point of view regarding the question. On the one hand, some authors strongly think that there is a limit to maximum lifespan and that we are approaching or even already reaching it as 125 seems to be a common acceptance for the limit age (Dong et al. [2016]; Gavrilova and Gavrilov [2019]; Weon and Je [2009a,b]). On the other hand, some researches refute the existence of a limit age (Wilmoth et al. [2000]) and some works conducted on supercentenarians (i.e. people aged more than 110) seem to demonstrate that beyond this age, the annual probability of death does not depend on sex and is fixed at a level of 50% (Gampe [2010]; Robine and Vaupel [2001]) although conclusions sometimes differ a little regarding the numbers (Kannisto [1988]). This means that on average, for 100 people aged 110, less than 1 gets to age 117, and the probability for a person aged 110 to become another Jeanne Calment² is only 0.024%. From another angle, this means that it would take 4,096 people aged 110 to see, on average, 1 reach age 122, which is far from the number of supercentenarians in the world today, estimated to be in the region of 600-900 (see Young [2018]). On this matter, Thatcher [1999] tackles the notion of distribution for the highest attained age in a group of people. It seems worth noticing another point here: the health conditions of centenarians and supercentenarians. Indeed, living long may be less an issue than living in good health. The possibility of this is widely discussed in the literature (Andersen-Ranberg et al. [1999, 2001]; Motta et al. [2005] for some examples).

Given this uncertainty around mortality at high ages and the lack of available data, actuaries have come up with various models to close their mortality tables (see e.g. Denuit and Goderniaux [2005]). Quashie and Denuit [2005] provide a review of those methodologies and analyze their impact in terms of pricing.

The general conclusion to all this work is that there is no consensus on what to expect in the future regarding longevity. What is more, all of these works are based on past observations, and as we mentioned earlier, the future can not always be extrapolated from what happened in the past. In particular, new assertions slowly begin to emerge around technology and how it could play an important role in the coming decades,

2. French woman who died at 122 years, which is the official record of longevity to this day. This record was confirmed by authors (Robin-Champigneul [2020]; Robine et al. [2019]) but refuted by others (Zak [2019]).

whether it be regarding man abilities or longevity. This is called transhumanism.

Transhumanism is a school of thought that assumes that the post human, or advanced human, could live at least a thousand years, and some transhumanists such as de Grey [2004] think that the person who will live up to 1,000 years is indeed already born. Rubin [2009] presents transhumanism as a movement aiming for the advance of posthumanism, which advocates the use of techniques from science and technology to reconstruct the human condition so radically that it questions the very fact of continuing to use the term “human”. Even though there seems to be no universal agreement between transhumanists on the better path towards this objective, the general scheme is clear: the advances on genetic engineering, artificial intelligence, robotic and nanotechnology should allow man to conquer disease, to eliminate misfortune, to end shortage and to postpone, maybe forever, death itself. Bostrom [2005] retraces the cultural influences that led to the definition of transhumanism. The launch of the company Calico, focusing on ageing and associated diseases, shows how seriously this objective is taken into account by giants like Google ³.

To set our mind on the matter and try to understand the transhumanist ideas about the future of longevity, we repeat hereafter some sentences read during our research:

- “Objective, to gain more than 24 hours of life per day.” ⁴;
- “Reach 1,000 years without ageing.” ⁴;
- “Some scientists believe that it is possible that some human beings already alive today may live for 1,000 years (we often say a thousand years because it is a round number that marks minds, and this represents an estimate of the life expectancy today of an average French person who would not be affected by aging.)” ⁴;
- “Human longevity will be twice as long as it is today” ⁵;
- “Thanks to the tremendous progress of the living industry, the man who will live 1,000 years is already born!” ⁶;
- “CNRS researchers have found a way to extend the life of worms to more than 80 days. Applied to humans, this would correspond to a living being more than 500 years old...” ⁷;

3. See <http://googlepress.blogspot.com/2013/09/calico-announcement.html>.

4. See <http://www.longlonglife.org>.

5. See <https://www.maddynews.com>.

6. See <https://www.lesechos.fr>.

7. See <https://usbeketrica.com>.

- “If you ask me if we can live 500 years, the answer is yes.”⁸;
- “We will live 1,000 years.”⁹;
- “The first person to reach 1,000 years of age (except for global disasters) is probably 10 years younger than the first person to reach 150 years of age.”⁹;
- “So if we can do it, and I think we can do it very well in about 20 years’ time, people will no longer just be at their best between the ages of 20 and 40, but well beyond that. However, the mortality risk will remain the same. In these circumstances, if you calculate life expectancy, it should certainly reach at least 1,000 years. The one who will live 1,000 years is probably already born.”¹⁰.

We can see that as for today, the transhumanist assumption is rather qualitative and express a general idea more than a clear scheme, but still it expresses a third alternative regarding longevity: an acceleration in the best practice trend for life expectancy. Some authors have already worked on the subject, and in particular on the notion of “life extension velocity” (see e.g. Debonneuil et al. [2018b]). The objective of this paper is to enrich the discussion and to propose some insights on how to model the transhumanist assumption.

To discuss the credibility that insurers give to this assumption, we conducted a survey, available in appendix 3.6, upon French ERM-CERA actuaries. Of the 153 actuaries that received the questionnaire, 46 responded to it, 31 of which assured they were following the longevity risk. To the question *Transhumanism is a school of thought that anticipates a lifespan potentially infinite, thanks notably to the contribution of science (“The first man to live a thousand years is already born”): what level of credibility do you grant this hypothesis ?*, the results we obtained are given in Table 3.1. To us, the main information of the table is the median value of 2.50%. Indeed, in our case, the mean does not seem to be the best measure of the importance given to the assumption as it is deeply impacted by the maximum value. Incidentally, we note that while the majority of those who responded attributes a low credibility, the maximum is 80%, showing that some experts strongly believe in the possibility of its realization.

The remaining of this paper is organised as follows: in Section 3.2, we present the data we used to conduct our research. We then investigate transhumanist point of view on longevity in Section 3.3 and discuss its eventual consequences in Section 3.4. Section

8. See <http://www.atlantico.fr>.

9. See <https://www.benicourt.com>.

10. See <https://www.01net.com>.

Table 3.1 – Credibility given to the transhumanist assumption

Min	Max	Mean	Median	Standard deviation
0.00%	80.00%	10.91%	2.50%	17.04%

3.5 concludes the paper. Note that this paper does not express a belief or disbelief in the transhumanist assumption nor questions the ethics of it, but solely investigate its ins and outs. Computations were carried out using Python.

3.2 Data

In this section, we present the data that we used for our computations. For the sake of simplicity, we considered the French population and did not integer the gender. Figure 3.1 shows some elements regarding the data used.

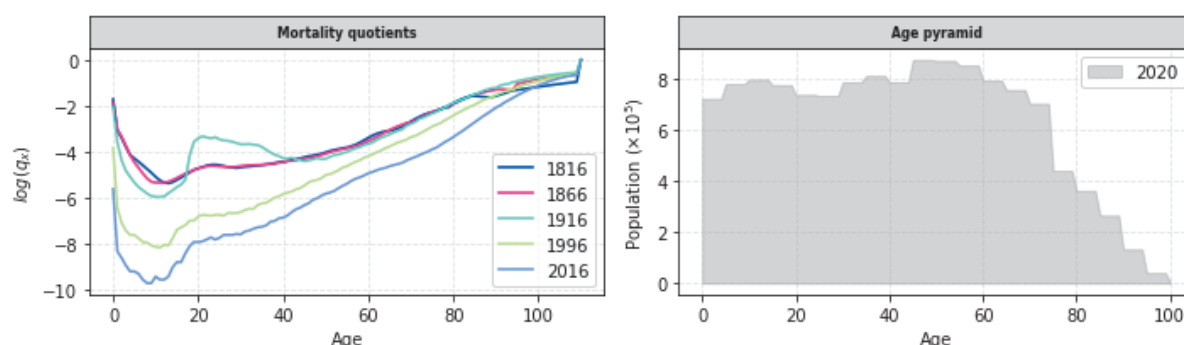


Figure 3.1 – Data used in the paper.

The mortality tables used throughout this paper were collected from the Human Mortality Database. They provide mortality quotients for ages 0 to 110 and for years 1816 to 2018. When needed by our computations, we set the mortality quotients for ages beyond 110 (included) to 50% in accordance with the discussion in the previous section (with sometimes sensitivity tests performed on this parameter).

The age pyramid was constructed using data collected from the website Worldometers.info¹¹. In particular, we summed the number of males and females for each age class and then we affected for each age the number of people in the age class divided by the length of the class (that is to say 5 in our case).

11. Worldometers.info is run by international researchers, developers and volunteers and aims at making world statistics available to everyone.

3.3 Transhumanist assumption

In this section, we consider the transhumanist assumption and give some insights on its ins and outs.

3.3.1 Causes-of-death approach

Our first approach to consider the transhumanist assumption, rather extreme, is based on the notion of “end of ageing”, essentially based on the hypotheses (i)-(ii)-(iii) presented hereafter.

- (i) For transhumanist people, death should at some point in the future no longer be caused by the degeneration of cells or by any diseases due to it: basically, all causes-of-death should disappear but the accidental ones. Accidental is here to be understood in the sense of non biological and includes suicides for example. Concretely, this hypothesis consists in imposing the constraint $B = 0$ to the well-known equation proposed by Makeham [1860]:

$$\mu_x = A + Bc^x, \quad (3.1)$$

μ_x being the central mortality rate at age x , and A being the component independent from age, often referred to as the accidental component of the law.

Setting $B = 0$ implies $\mu_x = \mu = A \forall x$.

- (ii) From the assertion “*The first person to live for 1,000 years is probably already alive*”, we extrapolate that the first people to benefit from increased lifespan (called transhumans through the rest of the paper) are already born. We assume their number to be N_T and their age today to be x_0 .
- (iii) The accidental mortality quotient should allow to see one person reach age x where $x > x_0$ ($x = 1,000$ for example).

Those hypotheses yield:

$$N \rightsquigarrow \mathcal{B}(N_T, p^{x-x_0}), \quad (3.2)$$

with N the number of transhumans that actually reach age x given their actual age x_0 , $\mathcal{B}$ standing for the binomial distribution and $p = 1 - q \approx e^{-\mu}$ being the probability of surviving each year.

We can consider two options:

- *expectation*: on average, at least 1 person will live up to age x ;
- *probability*: the probability of 1 person reaching x is greater than α (say 95% for instance).

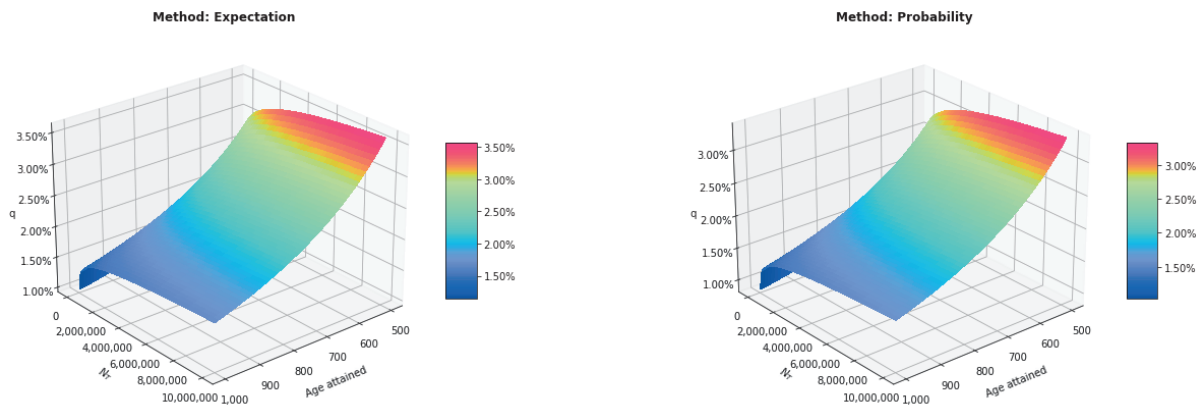
Mathematically transposed, this yields:

$$\begin{cases} \mathbb{E}(N) \geq 1 & \text{(if expectation),} \\ \mathbb{P}(N \geq 1) \geq \alpha & \text{(if probability).} \end{cases} \quad (3.3)$$

From here, it is rather straightforward that the mortality quotient q needed in order to see a transhuman should be:

$$q \leq \begin{cases} 1 - \left(\frac{1}{N_T}\right)^{\frac{1}{x-x_0}} & \text{(if expectation),} \\ 1 - \left[1 - (1 - \alpha)^{\frac{1}{N_T}}\right]^{\frac{1}{x-x_0}} & \text{(if probability).} \end{cases} \quad (3.4)$$

Depending on the number of transhumans N_T considered, their age x_0 today and the age x we want one of them to see reach, we obtain different values for q , which we illustrate with Figure 3.2. If we assume the French population aged 60 today to be the first generation with only accidental deaths, then the mortality quotient in order to see one reach age 1,000 should be $q = 1.4\%$ (with the expectation calculation, but the differences between the two approaches are slight). Worldwide, it should be $q = 1.9\%$.



GRAPHIQUE 3.2 – Impact of parameters on q .

To take a step back from those results, we tried and compared them to:

- the parameter A from Equation 3.1 that we get when applying the Makeham model to the Human Mortality Database mortality quotients for year 2018: we get a value of $A = 0.06\%$;
- the death rates by cause for France in 2017, given in Ritchie and Roser [2019] and reproduced in Table 3.2:

Table 3.2 – Death rate by cause (2017).

Cause of death	Death rate (both sex - age-standardized)
Injuries	0.035%
Communicable, maternal, neonatal, and nutritional diseases	0.019%
Non-communicable diseases	0.32%

We remark that both those values, whose order of magnitude is 0.01% are much lower than needed to see a person reach age 1,000. Nonetheless, a few comments are worth raising to this point: we can question the evolution of accidental mortality in the future under the transhumanist assumption. From a sociological point of view, one does not know how the removal of biological causes of death would affect accidental deaths: it is plausible that they would increase since not all people would be interested in living such a long time on the one hand, and risky behaviours would most probably increase on the other hand. From a demographic point of view, this issue of correlation among causes of death also arises; it has been tackled in the literature (see e.g. Alai et al. [2015]; Arnold-Gaille and Sherris [2015]; Boumezoued et al. [2018]). In the rest of the paper, we will assume that the accidental mortality will increase in the transhumanist scenario, and when needed for computational purposes, we will consider a minimum death rate of 0.1% (ten times higher).

The approach considered here is rather severe and does not necessarily encompass the vision of transhumanism led by some demographers such as de Grey [2004] for example, for whom we will be able to repair damage cells with “rejuvenation therapies” and therefore create an offset between biological age and actual age. Concretely, if we are able to increase by 30% the healthy lifespan of people, then it will give time for science - say 20 years - to come with another “rejuvenation therapy” and so on. Of course, this means that for the older people, it is already too late as their remaining lifespan is too short to benefit from second-generation therapies, and so they might

not live more than 20-30 years more than their parents. For today's middle-aged people however, this means a long time spent in a biological middle age. De Grey also indicates that *“quantitatively, what this means is that if a 10% per year decline of mortality rates at all ages is achieved and sustained indefinitely, then the first 1,000-year-old is probably only 5–10 years younger than the first 150-year-old.”* We investigate those notions in the following sections.

3.3.2 Improvement in mortality quotients

We consider in this section the improvement of mortality quotients over time. Precisely, we write

$$q_{x,t} = q_{x,t-1} \times (1 - \alpha_{x,t}), \quad (3.5)$$

$q_{x,t}$ being the mortality quotient at age x and time t and $\alpha_{x,t}$ being the mortality improvement rate at age x and time t . For the sake of simplicity, we consider

$$\alpha_{x,t} = \alpha_x \quad \forall t. \quad (3.6)$$

Hence, given the mortality history at our disposal, say from t_0 to T , we can calculate α_x for each x :

$$\alpha_x = 1 - \left(\frac{q_{x,T}}{q_{x,t_0}} \right)^{T-t_0} \quad (3.7)$$

Figure 3.3 displays the annual mortality improvement rates by age α_x over some time periods, namely 1850-1900, 1900-1950, 1950-2000, 2000-2018 and 1950-2018, and calls for some remarks:

- in the second half of the 19th century, the annual mortality improvement rates are rather low which indicates a stagnation of mortality conditions, even for children particularly impacted by industrialization and urbanization;
- the first half of the 20th century sees an improvement in health conditions (better hygiene and pastoral revolution) that benefits in particular to children;
- since the second half of the 20th century, the fight against cardiovascular diseases and cancers benefits the older ages.

Overall, since 1950, and except for old ages and young ages, the annual improvement rates are about 2%. Being able to sustain this rate even for the older ages may be the next challenge for the future. In the rest of our paper, we will assume that this

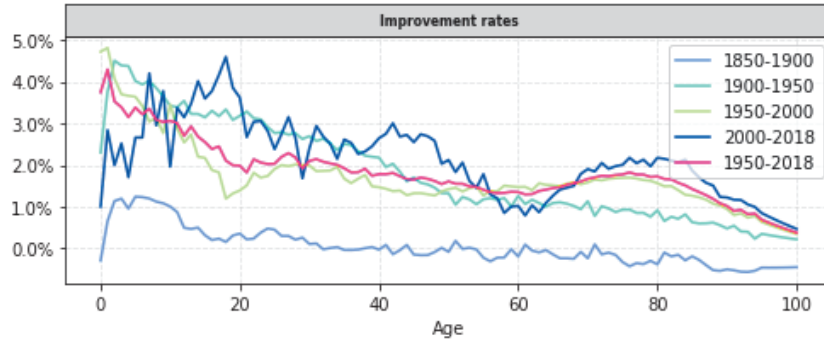


Figure 3.3 – Annual mortality improvement rate by age.

challenge will be successful and therefore, when needed for computational purposes, we will consider an annual improvement rate of 2% at each age.

With those elements in mind, we consider the annual mortality improvement rate necessary to see one person attain a target age (on average) given the French population. Precisely, we are interested in the improvement rate α , applicable for all ages, that would allow a French person aged x_0 today to reach an age x in the future. Figure 3.4 gives some elements regarding this issue ; the reading of the left plot is the following: from now on, if we improve by 2% the mortality rate at all ages, then given the French population aged 77 (59 respectively) today, we can expect to see one person reach age 150 (1,000 respectively). The conclusions are similar with the other two plots which correspond to sensitivity tests regarding mortality quotient for supercentenarians (being respectively 50%, 65% or 80% today). Two key information here:

- as stated above, there is probably only a little generation gap between the first person to reach age 150 and the first one to reach age 1,000 (around 15-20 years);
- for a given age, the annual improvement rate differs only a little by target age (1.3% to reach age 150 *vs* 2.0% to reach age 1,000 at age 60).

3.3.3 Rejuvenation therapies

We discuss in this section the notion of rejuvenation therapies, mechanisms that would create an offset between actual age and cellular age, for example by acting on telomeres (see e.g. Donate and Blasco [2011]; Shay and Wright [2007]).

In particular, we consider in Figure 3.5 the impact that such a mechanism would have on the mean age at death. The reading of the left plot is the following: if such therapies were made available in 10 years, allowing a rejuvenation of 5 years every 25 years,

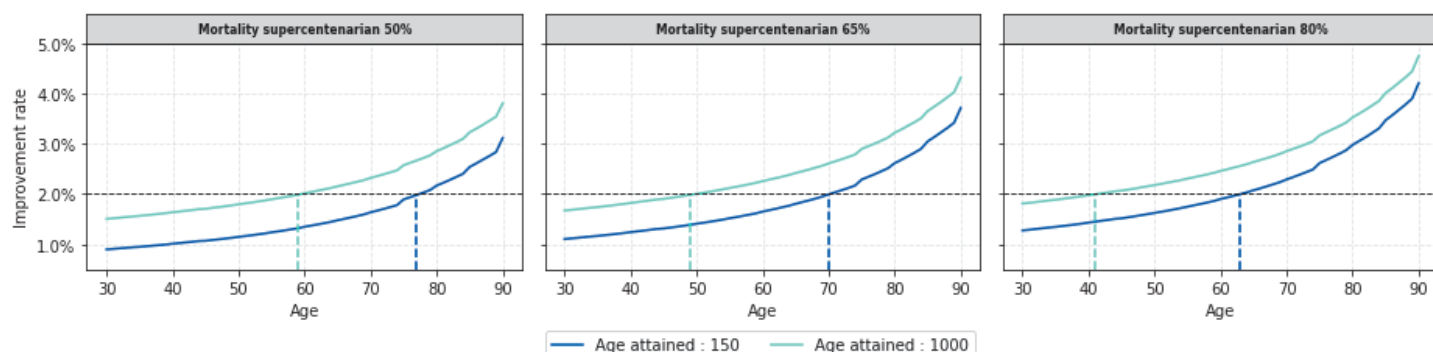
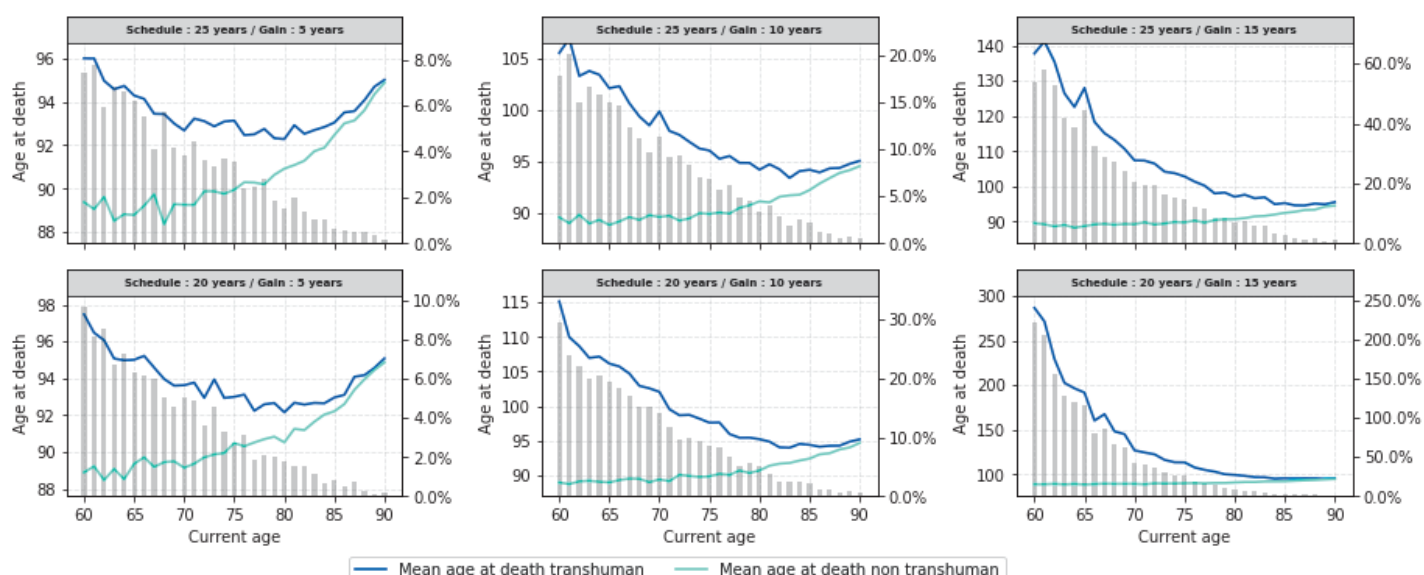


Figure 3.4 – Mortality improvements necessary to attain a target age.

then someone aged 60 today would see their lifespan extend by 7% on average thanks to them (the mean age at death would move from 89 to 96). This gain obviously increases quite rapidly with the offset created: around 7% for 5 years, 17% for 10 years and 50% for 15 years (for a current age of 60, and therapies available every 25 years). Obviously, the capacity of offering such therapies on a regular schedule also deeply impacts longevity (for a 5 year-offset made possible, the gain goes from 7% for therapies every 25 years to 10% for therapies every 20 years, for a current age of 60). As stated by De Grey, only younger people would benefit from those therapies; older people would see their lifespan increased by a few years only (the gap decreases with the age).



GRAPHIQUE 3.5 – Impact of rejuvenation therapies on mean age at death.

3.4 Discussion

The issue tackled in this paper is an illustration of the notion of uncertainty developed by Knight [1921]. While risk is defined as a situation where future possible events are known and can be calculated, uncertainty refers to a situation where they cannot. This is the case with the transhumanist assumption and it raises the question of how to deal with such situations, and more generally with model risk in insurance. Cairns [2000], in his analysis of parameters and model uncertainty in insurance, mentions three sources of uncertainty for a given model: the uncertainty due to the stochastic nature of the phenomenon, the uncertainty in the value of the parameters and the uncertainty in the specification of the probabilistic model with respect to the phenomenon observed. While it is sometimes possible to limit or to assess the model risk or at least one of the sources mentioned above (see e.g. Barrieu and Scandolo [2015]), it is not something feasible when the past does not help to encompass the risk, as it is the case with the transhumanist point of view on longevity.

One particular issue with this transhumanist assumption is its lack of immediate visibility: unless rejuvenation therapies are made available for all in a near future, it would most probably take a long time before being able to acknowledge the scenario through pure statistics. As illustrated by Figure 3.6, the survival curve would continue its rectangularization launched in the mid-twentieth century for some time. Only with the first individuals reaching very old ages would we know with certainty that the hypothesis has become reality (this would take more than 50 years if we consider the first transhumans to be aged 60 in 2020). Now, detecting the change in the longevity trend the quickest possible would obviously be a real issue, that may be tackled through the literature of the quickest detection problem as in El Karoui et al. [2017] for instance, modulo an adaptation of the algorithm.

In that case, the logical scheme seems to adopt a credibility approach based on experts opinion and scientific advances on the matter. Concretely, if the credibility given to the transhumanist assumption is nil for all insurers today (to the best of our knowledge), any major advance regarding longevity should lead to an increase in the credibility given to the assumption, for example following Table 3.3. Note here that it seems that researchers already have some results on the matter (see e.g Hofmann et al. [2015]), which may call for a consideration.

However, raising the credibility parameter for this assumption would not be neutral

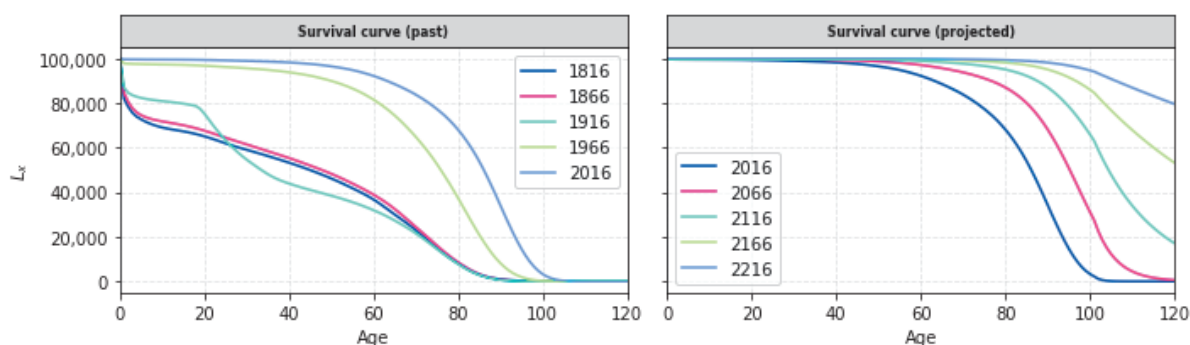


Figure 3.6 – Rectangularization of the survival curve.

Table 3.3 – Evolution of the credibility granted

Event	Credibility granted
-	0 – 1%
Increased longevity for monocellular beings	5%
Increased longevity for invertebrates	20%
Increased longevity for vertebrates	50%
Increased longevity for mammals	85%

for the insurance industry. The major impact would probably concern the solvency level, since it is based on extreme quantiles. To set the ideas, we performed 1,000 simulations with the following parameters:

- we consider 1,500 annuitants aged 60 today;
- 10% of them are transhumans and have an annuity of 15,000€, the rest have an annuity of 10,000€;
- we considered the following mortality parameters:
 - for causes-of-death approach (Section 3.3.1), we consider a mortality quotient $q = 0.1\%$;
 - we consider an constant annual improvement rate of 2% at each age;
 - the minimum mortality quotient is 0.1%;
 - the mortality quotient for supercentenarians today is set to 50%;
- we consider a discount rate of 1%.

Table 3.4 displays the impact of the transhumanist assumption on the provisions and the solvency level for this imaginary portfolio. If there is a non negligible impact on provisions (38% for accidental mortality, 8% for rejuvenation therapies), the sol-

vency capital requirement varies more abruptly (250% for accidental mortality, 50% for rejuvenation therapies), which illustrates our previous comments.

Table 3.4 – Impact of assumption ($\times 10^6$).

	Current trends	Accidental mortality	Rejuvenation therapies
Provisions (Mean)	390	540	420
$Var_{99,5\%}$	400	575	435
SCR (VaR - Mean)	10	35	15

To go further, the transhumanist assumption calls for a deep reflection about longevity management and the transfer of longevity risk, in the vein of Barrieu et al. [2012]. Some authors have worked on the subject, proposing for example longevity mega-funds (see e.g. Debonneuil et al. [2017, 2018a]). More broadly, it is the very notion of retirement that is questioned by transhumanism and the notion of increasing lifespan, especially if only a few people are concerned.

3.5 Conclusion

In this article, we have investigated an extreme assumption regarding longevity: transhumanism. Regardless the credibility we give to it or the ethic issues it raises, the aim was to examine the ins and outs in the light of our knowledge on the subject of longevity as for today. In this context, we have examined some possibilities for longevity in a transhumanist context, showing that they are not out of step with the actual observations. We then discussed some aspects calling for reflection so as to be prepared should the hypothesis come true.

3.6 Appendix

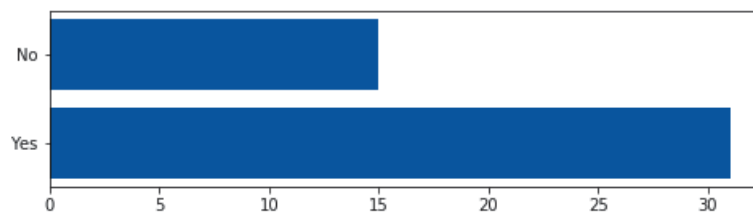
In this appendix, we detail the questions of the survey that we conducted on French ERM-CERA actuaries and the answers that we got.

Survey ERM-CERA

Question 1

Is the evolution of the future trend in life expectancy and the drift in longevity a risk you are following?

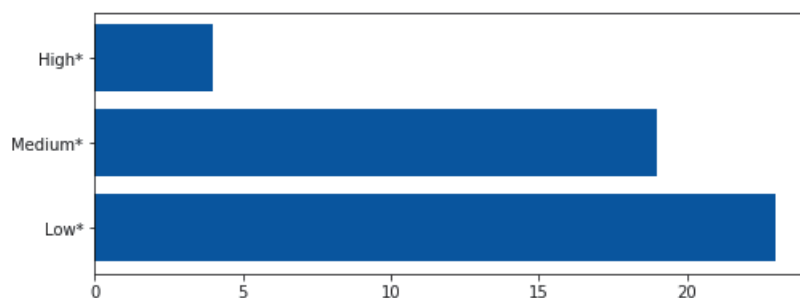
Results:



Question 2

If so, then how would you rate your level of information on the subject?

Results:



High: you are well informed and make contributions.

Medium: you are aware of the work and have some ideas.

Low: you get interested from time to time without having a clear idea.

Question 3

Continuation of the current trend in annual life expectancy gains : how much credibility do you give to this scenario for the next 50 years?

Results:

Min	Max	Mean	Median	Standard deviation
0.00%	90.00%	32.63%	30%	18.68%

Question 4

Acceleration of the current trend in annual life expectancy gains : how much credibility do you give to this scenario for the next 50 years?

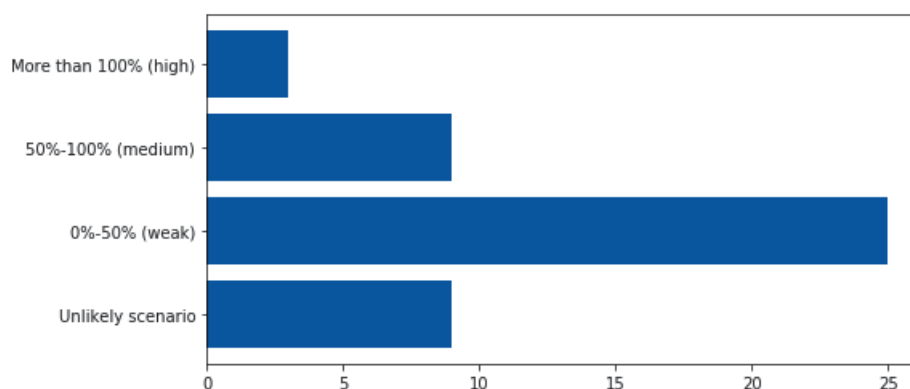
Results:

Min	Max	Mean	Median	Standard deviation
0.00%	95.00%	28.17%	23%	24.55%

Question 5

In your opinion, what could be the magnitude of the intensity of the drift for the scenario in question 4?

Results:



Question 6

Deceleration of the current trend in annual life expectancy gains: how much credibility do you give to this scenario for the next 50 years?

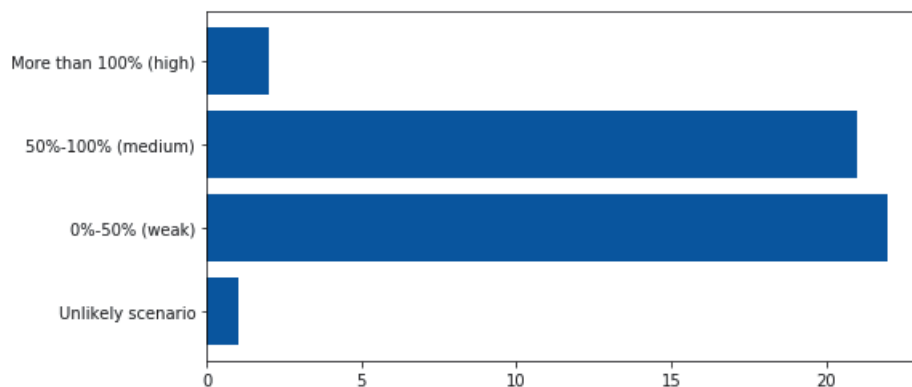
Results:

Min	Max	Mean	Median	Standard deviation
0.00%	100.00%	80.13%	80%	24.74%

Question 7

In your opinion, what could be the magnitude of the intensity of the drift for the scenario in question 6?

Results:



Question 8

Reduction of life expectancy: how much credibility do you give to this scenario for the next 50 years?

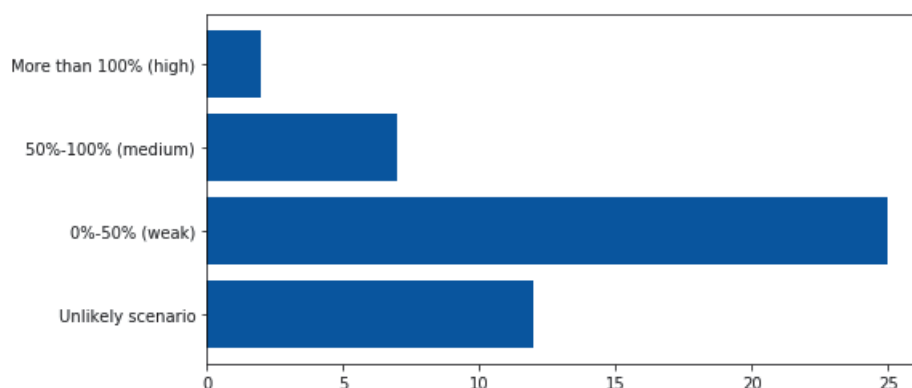
Results:

Min	Max	Mean	Median	Standard deviation
0.00%	100.00%	26.76%	22.50%	23.63%

Question 9

In your opinion, what could be the magnitude of the intensity of the drift for the scenario in question 8?

Results:



Question 10

Transhumanism is a school of thought that anticipates a lifespan potentially infinite, thanks notably to the contribution of science (“The first man to live a thousand years is already born”): how much credibility do you give to this assumption?

Results:

Min	Max	Mean	Median	Standard deviation
0.00%	80.00%	10.91%	2.50%	17.04%

Bibliography

- D. H. Alai, S. Arnold (-Gaille), and M. Sherris. Modelling cause-of-death mortality and the impact of cause-elimination. *Annals of Actuarial Science*, 9(1):167–186, 2015. doi: 10.1017/S174849951400027X.
- K. Andersen-Ranberg, K. Christensen, B. Jeune, A. Skytthe, L. Vasegaard, and J. W. Vaupel. Declining physical abilities with age: a cross-sectional study of older twins and centenarians in Denmark. *Age and Ageing*, 28(4):373–377, 07 1999. ISSN 0002-0729. doi: 10.1093/ageing/28.4.373.

- K. Andersen-Ranberg, M. Schroll, and B. Jeune. Healthy Centenarians Do Not Exist, but Autonomous Centenarians Do: A Population-Based Study of Morbidity Among Danish Centenarians. *Journal of the American Geriatrics Society*, 49(7):900–908, 2001. doi: 10.1046/j.1532-5415.2001.49180.x.
- S. Arnold-Gaille and M. Sherris. Causes-of-Death Mortality: What Do We Know on Their Dependence? *North American Actuarial Journal*, 19(2):116–128, 2015. doi: 10.1080/10920277.2015.1011279.
- P. Barrieu and G. Scandolo. Assessing financial model risk. *European Journal of Operational Research*, 242(2):546 – 556, 2015. ISSN 0377-2217. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.10.032>.
- P. Barrieu, H. Bensusan, N. El Karoui, C. Hillairet, S. Loisel, C. Ravanelli, and Y. Salhi. Understanding, Modeling and Managing Longevity Risk: Key Issues and Main Challenges. *Scandinavian Actuarial Journal*, 2012(3):203–231, 2012.
- H. Booth and L. Tickle. Mortality Modelling and Forecasting: a Review of Methods. *Annals of Actuarial Science*, 3(1-2):3–43, 2008.
- N. Bostrom. A History of Transhumanist Thought. *Journal of Evolution and Technology*, 14(1):1–25, 2005.
- A. Boumezoued, H. Labit Hardy, N. El Karoui, and S. Arnold. Cause-of-death mortality: What can be learned from population dynamics? *Insurance: Mathematics and Economics*, 78:301 – 315, 2018. ISSN 0167-6687. doi: <https://doi.org/10.1016/j.insmatheco.2017.09.015>.
- B. Brunekreef, R. Beelen, G. Hoek, L. Schouten, S. Bausch-Goldbohm, P. Fischer, B. Armstrong, E. Hughes, M. Jerrett, and P. Brandt. Effects of long-term exposure to traffic-related air pollution on respiratory and cardiovascular mortality in the Netherlands: The NLCS-AIR study. *Research report (Health Effects Institute)*, 139: 5–71; discussion 73, 03 2009.
- A. Cairns. A Discussion of Parameter and Model Uncertainty in Insurance. *Insurance: Mathematics and Economics*, 27:313–330, 06 2000. doi: 10.1016/S0167-6687(00)00055-X.

- A. J. G. Cairns, D. Blake, and K. Dowd. Modelling and management of mortality risk: a review. *Scandinavian Actuarial Journal*, 2008(2-3):79–113, 2008. doi: 10.1080/03461230802173608.
- A. Case and A. Deaton. Mortality and Morbidity in the 21st Century. *Brookings Papers on Economic Activity*, Spring 2017, 2017.
- A. Clarke. A Mathematical Method for Calculating Lifespan. *Journal of Young Investigators*, 4 2009.
- A. de Grey. Escape Velocity: Why the Prospect of Extreme Human Life Extension Matters Now. *PLoS Biology*, 2, 06 2004. doi: 10.1371/journal.pbio.0020187.
- E. Debonneuil, S. Loisel, and F. Planchet. Conditions Of interest of a longevity megafund for pension funds. working paper or preprint, Aug 2017.
- E. Debonneuil, A. Eyraud-Loisel, and F. Planchet. Can Pension Funds Partially Manage Longevity Risk by Investing in a Longevity Megafund? *Risks*, 6:67, 07 2018a. doi: 10.3390/risks6030067.
- E. Debonneuil, S. Loisel, and F. Planchet. Do actuaries believe in longevity deceleration? *Insurance: Mathematics and Economics*, 78:325–338, 2018b. ISSN 0167-6687. doi: <https://doi.org/10.1016/j.insmatheco.2017.09.008>. Longevity risk and capital markets: The 2015–16 update.
- M. Denuit and A.-C. Goderniaux. Closing and projecting lifetables using log-linear models, 2005.
- L. E. Donate and M. A. Blasco. Telomeres in cancer and ageing. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 366(1561):76–84, 2011. doi: 10.1098/rstb.2010.0291.
- X. Dong, B. Milholland, and J. Vijg. Evidence for a limit to human lifespan. *Nature*, 538:257–259, 10 2016. doi: 10.1038/nature19793.
- N. El Karoui, S. Loisel, and Y. Salhi. Minimax optimality in robust detection of a disorder time in doubly-stochastic Poisson processes. *The Annals of Applied Probability*, 27(4):2515 – 2538, 2017. doi: 10.1214/16-AAP1266.

- M. Frieri, K. Kumar, and A. Boutin. Antibiotic resistance. *Journal of Infection and Public Health*, 10(4):369–378, 2017. ISSN 1876-0341. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jiph.2016.08.007>.
- J. Gampe. *Human mortality beyond age 110*, pages 219–230. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2010. ISBN 978-3-642-11520-2. doi: 10.1007/978-3-642-11520-2_13.
- N. S. Gavrilova and L. A. Gavrilov. Are We Approaching a Biological Limit to Human Longevity? *The Journals of Gerontology: Series A*, 06 2019. ISSN 1079-5006. doi: 10.1093/gerona/glz164. glz164.
- L. Hayflick. The limited in vitro lifetime of human diploid cell strains. *Experimental Cell Research*, 37(3):614 – 636, 1965. ISSN 0014-4827. doi: [https://doi.org/10.1016/0014-4827\(65\)90211-9](https://doi.org/10.1016/0014-4827(65)90211-9).
- J. W. Hofmann, X. Zhao, M. De Cecco, A. L. Peterson, L. Pagliaroli, J. Manivannan, G. B. Hubbard, Y. Ikeno, Y. Zhang, B. Feng, X. Li, T. Serre, W. Qi, H. Van Remmen, R. A. Miller, K. G. Bath, R. de Cabo, H. Xu, N. Neretti, and J. M. Sedivy. Reduced Expression of MYC Increases Longevity and Enhances Healthspan. *Cell*, 160(3):477 – 488, 2015. ISSN 0092-8674. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cell.2014.12.016>.
- Human Mortality Database. University of California, Berkeley (USA), and Max Planck Institute for Demographic Research (Germany). Available at www.mortality.org (data downloaded on December 2020).
- D. A. Juckett. Cellular aging (The hayflick limit) and species longevity: A unification model based on clonal succession. *Mechanisms of Ageing and Development*, 38(1):49 – 71, 1987. ISSN 0047-6374. doi: [https://doi.org/10.1016/0047-6374\(87\)90110-2](https://doi.org/10.1016/0047-6374(87)90110-2).
- V. Kannisto. On the Survival of Centenarians and the Span of Life. *Population Studies*, 42(3):389–406, 1988. doi: 10.1080/0032472031000143546.
- F. H. Knight. *Risk, Uncertainty and Profit*. 1921.
- R. D. Lee and L. R. Carter. Modeling and Forecasting U. S. Mortality. *Journal of the American Statistical Association*, 87(419):659–671, 1992. ISSN 01621459.
- S. B. Levy. The Challenge of Antibiotic Resistance. *Scientific American*, 278(3):46–53, 1998. ISSN 00368733, 19467087.

- W. M. Makeham. On the Law of Mortality and the Construction of Annuity Tables. *The Assurance Magazine, and Journal of the Institute of Actuaries*, 8(6):301–310, 1860. ISSN 20461658.
- M. Motta, E. Bennati, L. Ferlito, M. Malaguarnera, and L. Motta. Successful aging in centenarians: myths and reality. *Archives of Gerontology and Geriatrics*, 40(3):241 – 251, 2005. ISSN 0167-4943. doi: <https://doi.org/10.1016/j.archger.2004.09.002>.
- H. C. Neu. The Crisis in Antibiotic Resistance. *Science*, 257(5073):1064–1073, 1992. ISSN 0036-8075. doi: [10.1126/science.257.5073.1064](https://doi.org/10.1126/science.257.5073.1064).
- J. Oeppen and J. W. Vaupel. Broken Limits to Life Expectancy. *Science*, 296(5570): 1029–1031, 2002. ISSN 0036-8075. doi: [10.1126/science.1069675](https://doi.org/10.1126/science.1069675).
- S. J. Olshansky, D. J. Passaro, R. C. Hershow, J. Layden, B. A. Carnes, J. Brody, L. Hayflick, R. N. Butler, D. B. Allison, and D. S. Ludwig. A Potential Decline in Life Expectancy in the United States in the 21st Century. *New England Journal of Medicine*, 352(11):1138–1145, 2005. doi: [10.1056/NEJMSr043743](https://doi.org/10.1056/NEJMSr043743).
- A. Quashie and M. Denuit. Modèles d’extrapolation de la mortalité aux grands âges. *ACTU Working Paper*, 2004-13, 2 2005.
- H. Ritchie and M. Roser. Causes of Death. *Our World in Data*, 2019. <https://ourworldindata.org/causes-of-death>.
- F. Robin-Champigneul. Jeanne Calment’s Unique 122-Year Life Span: Facts and Factors; Longevity History in Her Genealogical Tree. *Rejuvenation Research*, 23(1):19–47, 2020. doi: [10.1089/rej.2019.2298](https://doi.org/10.1089/rej.2019.2298). PMID: 31928146.
- J.-M. Robine and J. W. Vaupel. Supercentenarians: slower ageing individuals or senile elderly? *Experimental Gerontology*, 36(4):915 – 930, 2001. ISSN 0531-5565. doi: [https://doi.org/10.1016/S0531-5565\(00\)00250-3](https://doi.org/10.1016/S0531-5565(00)00250-3). Slowly Aging Organisms.
- J.-M. Robine, M. Allard, F. R. Herrmann, and B. Jeune. The Real Facts Supporting Jeanne Calment as the Oldest Ever Human. *The Journals of Gerontology: Series A*, 74: S13–S20, 09 2019. ISSN 1079-5006. doi: [10.1093/gerona/glz198](https://doi.org/10.1093/gerona/glz198).
- C. T. Rubin. *What is the Good of Transhumanism?*, pages 137–156. Springer Netherlands, Dordrecht, 2009. ISBN 978-1-4020-8852-0. doi: [10.1007/978-1-4020-8852-0_9](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8852-0_9).

- L. Samek. Overall human mortality and morbidity due to exposure to air pollution. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, 29(3):417–426, 2016. ISSN 1232-1087. doi: 10.13075/ijomeh.1896.00560.
- S. Sanyal, T. Rochereau, C. N. Maesano, L. Com-Ruelle, and I. Annesi-Maesano. Long-Term Effect of Outdoor Air Pollution on Mortality and Morbidity: A 12-Year Follow-Up Study for Metropolitan France. In *International journal of environmental research and public health*, 2018.
- J. W. Shay and W. E. Wright. Hallmarks of telomeres in ageing research. *The Journal of Pathology*, 211(2):114–123, 2007. doi: <https://doi.org/10.1002/path.2090>.
- A. R. Thatcher. The long-term pattern of adult mortality and the highest attained age. *Journal of the Royal Statistical Society: Series A (Statistics in Society)*, 162(1):5–43, 1999. doi: 10.1111/1467-985X.00119.
- B. M. Weon and J. H. Je. Theoretical estimation of maximum human lifespan. *Biogerontology*, 10(1):65–71, Feb 2009a. ISSN 1573-6768. doi: 10.1007/s10522-008-9156-4.
- B. M. Weon and J. H. Je. Predicting Human Lifespan Limits. *Natural Science*, 02, 08 2009b. doi: 10.4236/ns.2010.29120.
- J. Wilmoth, L. Deegan, H. Lundström, and S. Horiuchi. Increase of Maximum Lifespan in Sweden, 1861-1999. *Science (New York, N.Y.)*, 289:2366–8, 10 2000. doi: 10.1126/science.289.5488.2366.
- R. D. Young. Validated Living Worldwide Supercentenarians, Living and Recently Deceased: February 2018. *Rejuvenation Research*, 21(1):67–69, 2018. doi: 10.1089/rej.2018.2057. PMID: 29390945.
- N. Zak. Evidence That Jeanne Calment Died in 1934—Not 1997. *Rejuvenation Research*, 22(1):3–12, 2019. doi: 10.1089/rej.2018.2167. PMID: 30696353.

Conclusion

Cette thèse s’articule autour de nos travaux concernant la compréhension et la gestion des risques biométriques et comportementaux en assurance vie. Les apports sont multiples et les perspectives pour de futures recherches, nombreuses.

Dans le Chapitre 1, nous montrons comment les méthodologies issues de la *data science* peuvent concourir à une meilleure gestion des versements libres, tout en donnant des pistes de compréhension des phénomènes sous-jacents. En particulier, notre travail s’intéresse à l’évolution temporelle du montant global de versements libres effectués par des assurés sur un ensemble de produits d’épargne. Dans un premier temps, nous utilisons des processus SARIMA pour modéliser chacune des séries et nous montrons les limites d’une telle approche dans le cas où des changements brutaux ont lieu. Pour y remédier, nous proposons d’utiliser un algorithme de *machine learning*, le *Gradient Boosting*, et nous mettons en évidence le fait qu’inclure des variables exogènes telles que les périodes de campagnes commerciales ou le nombre de souscriptions par exemple permet de construire un modèle qui donne de meilleures projections que les séries temporelles lorsque les comparaisons se font via la métrique usuelle du *Root Mean Square Log Error*. Enfin, nous utilisons le cadre proposé par l’approche SHAP (SHapley Additive exPlanations) pour analyser finement le modèle et de mettre en évidence des éléments cohérents avec l’intuition métier, comme le fait que les campagnes commerciales jouent à la hausse sur la prédiction par exemple. Si notre étude s’est concentrée sur les versements libres, le cadre proposé convient parfaitement à d’autres comportements assurés (rachats, arbitrages), sous réserve d’un travail en amont sur les variables explicatives. Ce point est d’ailleurs un des axes possibles pour de futures recherches, à savoir l’intégration de variables dites « économiques » pour améliorer les résultats. Par ailleurs, le choix du *Gradient Boosting* utilisé dans cette thèse pourrait être comparé à d’autres algorithmes, par exemple des réseaux de neurones de type *Long short-term memory* (LSTM); il conviendra cependant d’être attentif à ne pas proposer des modèles trop complexes, dont les prédictions sont difficilement explicables et donc non utilisables pour le métier dans la pratique. Nul doute que de telles méthodologies, ainsi que les travaux autour de l’explicabilité des algorithmes de *machine learning* permettront d’affiner les travaux dans le futur.

Le Chapitre 2 s’intéresse à la notion de transferts en assurance vie, via l’analyse de

l'amendement Fourgous, qui date de 2005, et de la récente loi PACTE. Nous nous attachons à présenter ces législations et ce qu'elles autorisent en termes de transferts pour faire ressortir leurs principaux points communs et leurs différences majeures. Nous analysons ensuite les impacts de l'amendement Fourgous sur deux portefeuilles différents et mettons en évidence les structures particulières des taux de transferts selon les différentes variables que sont l'âge, l'ancienneté ou la provision mathématique. Cette analyse nous amène à proposer une modélisation polynomiale efficace basée sur une régression logistique. L'application de ce modèle pour la prédiction des transferts liés à la loi PACTE a mis en évidence, si besoin était, la difficulté d'anticiper les comportements des assurés. D'une part, l'hétérogénéité d'un portefeuille est difficile à intégrer, même si les travaux autour des mélanges de GLM notamment donnent des résultats intéressants, et d'autre part, l'évolution de ces comportements dans le temps est une réelle problématique, assez peu étudiée en actuariat et donc réservoir pour de futures recherches.

Le Chapitre 3 s'intéresse à une hypothèse extrême en longévité : le transhumanisme, qui anticipe une amélioration exceptionnelle de la durée de vie dans les années à venir, grâce à l'apport de la science notamment. Pour contextualiser cette hypothèse, nous dressons un état des lieux des connaissances sur le sujet et mettons en évidence la porosité entre différentes spécialités telle que la médecine, l'actuariat ou encore la démographie. Les différentes simulations que nous menons mettent en lumière l'impact du transhumanisme, en particulier sur le Solvency Capital Requirement (SCR). Par ailleurs, s'il est difficile d'affecter une probabilité à cette hypothèse, le sondage que nous avons mené auprès d'actuaire expert ERM CERA montre que, même si elle est jugée globalement peu probable, elle n'est pas rejetée par l'ensemble des personnes interrogées, étant même prise au sérieux par une petite partie de l'échantillon. Dans un domaine où l'absence de consensus rend les projections d'autant plus incertaines, il apparaît donc primordial d'être attentif aux évolutions scientifiques et technologiques pour être à même de proposer des modèles qui intègrent au mieux ces composantes, dont les conséquences sortent du simple cadre de la longévité. En particulier, les impacts en termes de dépendance ou de santé restent à investiguer, de même que les impacts financiers, notamment sur les taux d'intérêt à très long terme.

Bibliographie générale

ACPR : Orientations Nationales Complémentaires aux Spécifications Techniques pour l'exercice 2013 de préparation à Solvabilité II. 2013.

J. M. Alho : "The Lee-Carter Method for Forecasting Mortality, with Various Extensions and Applications", Ronald Lee, January 2000. *North American Actuarial Journal*, 4(1):91–93, 2000.

B. Amrani : L'arbitrage dans les contrats d'épargne multi-support, 2013. Mémoire d'actuaire, CNAM.

K. Assaraf : Modélisation de versements libres sous IFRS 17 par des méthodes de machine learning. Mémoire de D.E.A., Université Paris Dauphine, 2020.

A. R. Bacinello : Endogenous model of surrender conditions in equity-linked life insurance. *Insurance : Mathematics and Economics*, 37(2):270–296, 2005.

A. R. Bacinello, E. Biffis et P. Millosovich : Pricing life insurance contracts with early exercise features. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 233(1):27–35, 2009. ISSN 0377-0427. Risk Measures and Solvency.

F. Z. Benabdelkrim : Modélisation des versements libres en assurance-vie : utilisation de méthodes de scoring. Mémoire de D.E.A., ISUP, 2017.

O. Berrada : Modélisation des arbitrages dynamiques par approche machine learning et étude du comportement client sur un portefeuille d'épargne. Mémoire de D.E.A., Université Paris Dauphine, 2017.

M. Beyou : La transférabilité dans les constats d'assurance dépendance. Mémoire de D.E.A., CNAM, 2014.

D. Blake, A. J. G. Cairns, K. Dowd et A. R. Kessler : Still living with mortality : the longevity risk transfer market after one decade. *British Actuarial Journal*, 24, 2018. ISSN 1357-3217, 2044-0456.

C. Briand : Fonds euro-croissance : perspectives offertes par la loi PACTE au marché de l'assurance-épargne. Mémoire de D.E.A., ENSAE, 2019.

- T. Brion : Modèles d'arbitrages dynamiques : Valorisation d'une option d'arbitrage dans le cadre de la Market Consistent Embedded Value, 2009. Mémoire d'actuaire, EURIA.
- N. Brouhns, M. Denuit et J. Vermunt : A Poisson Log-Bilinear Regression Approach to the Construction of Projected Life Tables. *Insurance : Mathematics and Economics*, 31:373–393, 12 2002.
- B. Brunekreef, R. Beelen, G. Hoek, L. Schouten, S. Bausch-Goldbohm, P. Fischer, B. Armstrong, E. Hughes, M. Jerrett et P. Brandt : Effects of long-term exposure to traffic-related air pollution on respiratory and cardiovascular mortality in The Netherlands : The NLCS-AIR study. *Research report (Health Effects Institute)*, 139:5–71 ; discussion 73, 03 2009.
- A. J. G. Cairns, D. Blake, K. Dowd et A. R. Kessler : Phantoms never die : living with unreliable population data. *Journal of the Royal Statistical Society : Series A (Statistics in Society)*, 179(4):975–1005, 2016.
- F. Carrat, J. Luong, H. Lao, A.-V. Sallé, C. Lajaunie et H. Wackernagel : A 'small-world-like' model for comparing interventions aimed at preventing and controlling influenza pandemics. *BMC medicine*, 4:26, 02 2006.
- A. Case et A. Deaton : Rising morbidity and mortality in midlife among white non-Hispanic Americans in the 21st century. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(49):15078–15083, 2015. ISSN 0027-8424.
- A. Case et A. Deaton : Mortality and Morbidity in the 21st Century. *Brookings Papers on Economic Activity*, Spring 2017, 2017.
- T. Chen et C. Guestrin : XGBoost : A Scalable Tree Boosting System. In *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, KDD '16, page 785–794, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery. ISBN 9781450342322.
- A. Coale et E.E Kisker : Defects in data on old age mortality in the United States : New procedures for calculating approximatively accurate mortality schedules and life tables at the highest ages. *Asian and Pacific Population Forum*, (4):1–31, 1990.
- Commission d'Agrément : Guideline mortalité. Rapport technique, Institut des actuaires, 2005.

BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE

- M. Costabile, I. Massabó et E. Russo : A binomial model for valuing equity-linked policies embedding surrender options. *Insurance : Mathematics and Economics*, 42 (3):873–886, 06 2008.
- S. H. Cox et Y. Lin : Annuity Lapse Rate Modeling : Tobit or not Tobit ? 2006.
- J. D. Cummins : *An econometric model of the life insurance sector of the U.S. economy*. Lexington Books, 1975.
- I. D. Currie : Smoothing and forecasting mortality rates with P-splines, 06 2006.
- D. De Giovanni : Lapse Rate Modeling : A Rational Expectation Approach. Finance Research Group Working Papers F-2007-03, University of Aarhus, Aarhus School of Business, Department of Business Studies, 2007.
- A. de Grey : Escape Velocity : Why the Prospect of Extreme Human Life Extension Matters Now. *PLoS Biology*, 2, 06 2004.
- M. Denuit et A.-C. Goderniaux : Closing and projecting lifetables using log-linear models. *Bulletin of the Swiss Association of Actuaries*, pages 29–49, 2005.
- X. Dong, B. Milholland et J. Vijg : Evidence for a limit to human lifespan. *Nature*, 538:257–259, 10 2016.
- V. Enchev, T. Kleinow et A. Cairns : Multi-population mortality models : fitting, forecasting and comparisons. *Scandinavian Actuarial Journal*, 2017:1–24, 01 2016.
- J. Friedman : Greedy function approximation : A gradient boosting machine. *Annals of Statistics*, 29:1189–1232, 2001.
- J. Friedman : Stochastic Gradient Boosting. *Computational Statistics & Data Analysis*, 38:367–378, 02 2002.
- J. Gampe : *Human mortality beyond age 110*, pages 219–230. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2010. ISBN 978-3-642-11520-2.
- R. Gauchon, S. Loisel et J.-L. Rullière : Health-policyholder clustering using health consumption : a useful tool for targeting prevention plans. *European Actuarial Journal*, 10, 08 2020.

- N. S. Gavrilova et L. A. Gavrilov : Are We Approaching a Biological Limit to Human Longevity? *The Journals of Gerontology : Series A*, 06 2019. ISSN 1079-5006. glz164.
- B. Gompertz : 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*, 115:513–583, 1825. ISSN 02610523.
- S. Gutterman et I. T. Vanderhoof : Forecasting Changes in Mortality. *North American Actuarial Journal*, 2(4):135–138, 1998.
- M. Habart Corlosquet, J. Janssen et R. Manca : *Modélisation stochastique du risque de pandémie, Stratégie de couvertures et d'assurance*. Collection Méthodes Stochastiques Appliquées. Hermès/Lavoisier, 2012.
- O. Hamaoui : Modélisation du portefeuille de la gestion privée sous Solvabilité 2, 2012. Mémoire d'actuaire, CNAM.
- L. Hayflick : The limited in vitro lifetime of human diploid cell strains. *Experimental Cell Research*, 37(3):614 – 636, 1965. ISSN 0014-4827.
- L. Heligman et J. H. Pollard : The age pattern of mortality. *Journal of the Institute of Actuaries*, 107(1):49–80, 1980.
- Y. Kagraoka : Modeling Insurance Surrenders by the Negative Binomial Model. 01 2005.
- W. O. Kermack et A. G. McKendrick : A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 115(772):700–721, 1927. ISSN 09501207.
- C. Kim : Modeling Surrender and Lapse Rates With Economic Variables. *North American Actuarial Journal*, 9, 10 2005a.
- C. Kim : Report to the Policyholder Behavior in the Tail Subgroups Project. 01 2005b.
- W. Kuo, C. Tsai et W.-K. Chen : An Empirical Study on the Lapse Rate : The Cointegration Approach. *Journal of Risk and Insurance*, 70(3):489–508, 2003.
- H. Le Bras : *Naissance de la mortalité. L'origine politique de la statistique et de la démographie*. Seuil, 10 2013. ISBN 978-2-02-101512-6. Google-Books-ID : kU2tAQAAQBAJ.

BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE

- R. D. Lee et L. R. Carter : Modeling and Forecasting U.S. Mortality. *Journal of the American Statistical Association*, 87(419):659–671, 1992.
- N. Li et R. Lee : Coherent Mortality Forecasts for a Group of Population : An Extension of the Lee–Carter Method. *Demography*, 42:575–94, 09 2005.
- F. D. K. Liddell : Simple exact analysis of the standardised mortality ratio. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 38:85–88, 1984.
- S. Loisel et X. Milhaud : From deterministic to stochastic surrender risk models : Impact of correlation crises on economic capital. *HAL, Working Papers*, 214, 01 2010.
- S. Loisel, P. Piette et J. Tsai : Applying economic measures to lapse risk management with machine learning approaches. working paper or preprint, 06 2019.
- O. Lopez, X. Milhaud et P.-E. Thérond : Tree-based censored regression with applications in insurance. *Electronic journal of statistics*, 10(2):2685–2716, 09 2016.
- S. M. Lundberg, G. G. Erion et S.-I. Lee : Consistent individualized feature attribution for tree ensembles. *arXiv preprint arXiv :1802.03888*, 2018.
- S. M. Lundberg et S.-I. Lee : A Unified Approach to Interpreting Model Predictions. In I. Guyon, U. V. Luxburg, S. Bengio, H. Wallach, R. Fergus, S. Vishwanathan et R. Garnett, éditeurs : *Advances in Neural Information Processing Systems 30*, pages 4765–4774. Curran Associates, Inc., 2017.
- W. M. Makeham : On the Law of Mortality and the Construction of Annuity Tables. *The Assurance Magazine, and Journal of the Institute of Actuaries*, 8(6):301–310, 1860. ISSN 20461658.
- S. Makki : *An Efficient Classification Model for Analyzing Skewed Data to Detect Frauds in the Financial Sector*. Theses, Université de Lyon ; Université libanaise, 12 2019.
- S. Malek : Impact de la loi Pacte sur le couple rendement/risque du support Croissance. Mémoire de D.E.A., ISFA, 2020.
- R. C. Merton : Lifetime Portfolio Selection under Uncertainty : The Continuous-Time Case. *The Review of Economics and Statistics*, 51(3):247–257, 1969. ISSN 00346535, 15309142.

- R. C. Merton : Optimum consumption and portfolio rules in a continuous-time model. *Journal of Economic Theory*, 3(4):373 – 413, 1971. ISSN 0022-0531.
- A. Michaelson et J. Mulholland : Strategy for Increasing the Global Capacity for Longevity Risk Transfer : Developing Transactions That Attract Capital Markets Investors. *The Journal of Alternative Investments*, 17(1):18–27, 06 2014. ISSN 1520-3255, 2168-8435.
- X. Milhaud, S. Loisel et V. Maume-Deschamps : Surrender triggers in Life Insurance : what main features affect the surrender behavior in a classical economic context? 11, 12 2011.
- T. I. Missov, A. Lenart, L. Nemeth, V. Canudas-Romo et J. W. Vaupel : The Gompertz force of mortality in terms of the modal age at death. *Demographic Research*, S8 (36):1031–1048, 2015.
- C. Mouminoux : *Behavioral Biases and Strategies of Insurance Market Players*. Theses, Université Lyon 1 - Claude Bernard, 10 2018.
- S. J. Olshansky, D. J. Passaro, R. C. Hershow, J. Layden, B. A. Carnes, J. Brody, L. Hayflick, R. N. Butler, D. B. Allison et D. S. Ludwig : A Potential Decline in Life Expectancy in the United States in the 21st Century. *New England Journal of Medicine*, 352 (11):1138–1145, 2005. PMID : 15784668.
- J. F. Outreville : Whole-life insurance lapse rates and the emergency fund hypothesis. *Insurance : Mathematics and Economics*, 9(4):249 – 255, 1990. ISSN 0167-6687.
- E. J. Pesando : The Interest Sensitivity of the Flow of Funds Through Life Insurance Companies : An Econometric Analysis. *The Journal of finance*, 29(4):11105–11121, 1974.
- F. Planchet : Tables de mortalité d’expérience pour les portefeuilles de rentiers (Tables TGH 05 et TGF 05), 2007. Notice de présentation.
- F. Planchet et J. Tomas : Méthodes de positionnement : aspects méthodologiques. Rapport technique, Institut des actuaires. Note de travail II1291-12 v1.5.
- A. Quashie et M. Denuit : Modèles d’extrapolation de la mortalité aux grands âges. *ACTU Working Paper*, 2004-13, 02 2005.

BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE

- A. E. Renshaw et S. Haberman : Statistical analysis of life assurance lapses. *Journal of the Institute of Actuaries (1886-1994)*, 113(3):459–497, 1986. ISSN 00202681.
- A.E. Renshaw et S. Haberman : A cohort-based extension to the Lee-Carter model for mortality reduction factors. *Insurance : Mathematics and Economics*, 38(3):556–570, 06 2006.
- M. T. Ribeiro, S. Singh et C. Guestrin : "Why Should I Trust You?" : Explaining the Predictions of Any Classifier, 2016.
- J.-M. Robine et J.W. Vaupel : Supercentenarians : slower ageing individuals or senile elderly? *Experimental Gerontology*, 36(4):915 – 930, 2001. ISSN 0531-5565. Slowly Aging Organisms.
- S. Sanyal, T. Rochereau, C. N. Maesano, L. Com-Ruelle et I. Annesi-Maesano : Long-Term Effect of Outdoor Air Pollution on Mortality and Morbidity : A 12-Year Follow-Up Study for Metropolitan France. In *International journal of environmental research and public health*, 2018.
- T. K. Siu : Fair valuation of participating policies with surrender options and regime switching. *Insurance : Mathematics and Economics*, 37(3):533–552, 2005. ISSN 0167-6687.
- M. Stern : Euro-croissance : Analyse de la transformation du produit prévue par la loi PACTE. Mémoire de D.E.A., Université Paris Dauphine, 2019.
- R. H. Thaler : *Misbehaving : The Making of Behavioral Economics*. W. W. Norton Company, 06 2016. ISBN 978-0-393-35279-5.
- J. Vallin et F. Meslé : Tables de mortalité françaises pour les XIXe et XXe siècles et projections pour le XXIe siècle. *Institut national d'études démographiques*, 2001.
- A. M. Villegas, S. Haberman, V. K. Kaishev et P. Millossovich : A comparative study of two-population models for the assessment of basis risk in longevity hedges. *ASTIN Bulletin*, 47(3):631–679, 2017.
- W. Weibull : A Statistical Distribution Function of Wide Applicability. *Journal of Applied Mechanics*, 18:293–297, 1951.
- E. T. Whittaker : On a New Method of Graduation. *Proceedings of the Edinburgh Mathematical Society*, 41:63–75, 1922.

M. Wüthrich : Neural networks applied to chain–ladder reserving. *European Actuarial Journal*, 8, 10 2018.