

Mémoire présenté devant le jury de l'EURIA en vue de l'obtention du
Diplôme d'Actuaire EURIA
et de l'admission à l'Institut des Actuaire

le 6 Septembre 2023

Par : Binet-Stephan Emma

Titre : Impact du dérèglement climatique sur les tables de mortalité

Confidentialité : Oui - (Durée: 2 ans)

Les signataires s'engagent à respecter la confidentialité indiquée ci-dessus

**Membre présent du jury de l'Institut
des Actuaire :**

Biessy Guillaume

Fall Papa Cheikh

Lacaze Christelle

Signatures :

Membres présents du jury de l'EURIA : Directeur de mémoire en entreprise :

Franke Brice

Signature :

Entreprise :

PartnerRe

Signature :

Evertse Jeannette

Signature :

Invité :

Tran Thong

Signature :

**Autorisation de publication et de mise en ligne sur un site de diffusion
de documents actuariels**
(après expiration de l'éventuel délai de confidentialité)

Signature du responsable entreprise :

Signature du candidat :

Résumé

Dans un contexte de hausse des températures et en considération de son impact sur la qualité de vie, la composante climatique est devenue une donnée importante à prendre en compte dans la modélisation des taux de mortalité. Il convient de se focaliser rigoureusement sur son influence sur les aspects démographiques d'une population ainsi que budgétaires pour les compagnies d'assurance et de réassurance.

À long terme, une hausse de la température pourrait entraîner des variations significatives des provisions des compagnies d'assurance et de réassurance. Nécessairement, l'estimation et la projection de la mortalité à venir nécessite une prise en considération.

L'objectif de ce mémoire est de parvenir à quantifier l'impact du dérèglement climatique sur les portefeuilles de prévoyance et de rentes viagères de certaines régions de PartnerRe ainsi que d'analyser les écarts probables entre ces derniers notamment sur des hypothèses techniques actuarielles. Les régions concernées sont le Royaume-Uni/Irlande, l'Europe continentale, le Moyen-Orient et l'Amérique latine.

L'étude menée consiste à intégrer la composante de température au modèle standard de Lee-Carter (1992) en s'assurant de sa significativité afin d'estimer les taux de mortalité futurs suite à l'augmentation de la température. La sélection de données représente un point important de la modélisation, tout comme le choix des différents paramètres et la validation du modèle. L'enjeu de ce mémoire est de réussir à proposer une estimation approximative en prenant en considération la quantité limitée de données à disposition.

Après validation du modèle, il convient de prédire les taux de mortalité à horizon 2100 en tenant compte des différentes prédictions de la hausse de température publiées par le GIEC. D'un autre côté, l'impact financier est mesuré sur les *Best Estimate Liabilities* sous Solvabilité II. Une proposition d'une ouverture sur les autres conséquences du dérèglement climatique et autres types de risques techniques impactés comme la morbidité et le rachat sont également présentées.

Mots clefs : Dérèglement climatique, Température, Tables d'incidences, Lee-Carter, Prévoyance, Épargne, Mortalité, Longévité, Morbidité, Solvabilité II.

Abstract

In a context of rising temperatures and considering its impact on the quality of life, the climate component has become an important factor to take into account in the modeling of mortality rates. It is recommended to rigorously focus on its demographic aspects within a population as well as budgetary implications for insurance and reinsurance companies.

An increase in temperatures could lead to significant variations in insurers and reinsurers' reserves. It is therefore necessary to carefully consider the impact on future mortality in light of climate change.

The aim of this thesis is to quantify the impact of climate change on protection and savings portfolios of certain regions within PartnerRe, as well as analysing the probable gap between the various climate change scenarios especially on actuarial hypothesis. The regions in question are the United Kingdom, Europe, Middle East and Latin America.

The conducted study involves integrating the temperature component into the standard Lee-Carter model (1992) while ensuring its significance. Data selection represents a crucial aspect of modeling, as does choosing the different factors and the validation of the model. The challenge of this thesis is to provide an approximate estimation while considering the limited quantity of available data.

After validating the model, it is recommended to predict incidence rates up to the year 2100, taking into account different temperature rise predictions published by the IPCC (*GIEC*). On the other hand, the financial impact is measured through the Best Estimate Liabilities under Solvency II. A proposal is also made to explore other consequences of climate change and other types of technical impacted risks such as morbidity and lapses.

Keywords : Climate change, Temperature, Incidence tables, Lee-Carter, Protection, Savings, Mortality, Longevity, Morbidity, Solvency II.

Remerciements

Dans un premier temps, mes remerciements vont à l'ensemble du pôle Life & Health - EMELA de la compagnie PartnerRe, et plus particulièrement à l'équipe EMELA LT Protection dirigée par Thong TRAN au sein de laquelle j'ai effectué mon alternance. Merci notamment à ma tutrice Jeannette EVERTSE pour la transmission de ses connaissances de la réassurance et pour ses conseils précieux.

Je tiens aussi à exprimer ma reconnaissance envers Achim REGENAUER, Pietro MILLOSOVICH et Valentin GERMAIN pour leur disponibilité et le partage de leurs connaissances sur différents sujets traités dans ce mémoire.

Ensuite, je salue Laurence ABIVEN et Hany FARAG pour le temps passé sur la relecture du présent mémoire.

Merci également à l'ensemble des enseignants et des intervenants de l'EURO Institut d'Actuariat (EURIA) pour leur enseignement tout aussi important et en particulier Franck VERMET pour le suivi du présent mémoire. Il est évident qu'une grande partie de ce mémoire n'aurait pas pu être réalisée sans les connaissances assimilées depuis ma première année.

Enfin, je suis reconnaissante envers l'ensemble de mes proches : mes parents Jean-Baptiste et Mary-Katrin, ma soeur Emilie, Quentin, mes amies et amis.

Note de synthèse

Contexte

La hausse des températures a une influence sur les aspects démographiques d'une population mais elle a également des impacts budgétaires pour les compagnies d'assurance et de réassurance. A long terme, la tendance climatique pourrait entraîner des variations significatives des provisions de ces compagnies.

Aujourd'hui, PartnerRe affirme son engagement vis-à-vis du dérèglement climatique. En particulier, l'enjeu de ce mémoire est de parvenir à quantifier son impact sur les portefeuilles de prévoyance et de rentes viagères de la compagnie - notamment sur les hypothèses techniques actuarielles - qui se situent au Royaume-Uni/Irlande, en Europe continentale, au Moyen-Orient et en Amérique latine.

L'étude menée consiste à intégrer la composante de température au modèle standard de Lee-Carter (1992) afin d'estimer les taux de mortalité futurs suite à l'augmentation de la température. Un intérêt particulier est porté sur le choix des paramètres du modèle et sur sa validation. Ensuite, il convient de prédire les taux d'incidence à horizon 2100 en prenant en considération cinq scénarios d'évolution de la température publiés par le GIEC. A partir de ces projections, un impact financier peut être mesuré sur les *Best Estimate Liabilities* sous Solvabilité II et des scénarios croisés sont également imaginés avec un impact sur les risques de morbidité et de rachat notamment.

Théorie d'estimation

Le modèle mis en place dans le cadre de ce mémoire s'inspire du modèle de Lee-Carter par cause de décès [GERMAIN, 2022] et s'exprime de la façon suivante :

$$\ln(\mu_{x,t}) = \alpha_x + \delta_x T_t + \beta_x \kappa_t + \epsilon_{x,t} \quad (1)$$

- $\mu_{x,t}$: le taux de mortalité instantané à l'âge x et l'année t ,
- α_x : la forme générale de la mortalité par âge, aussi la valeur moyenne de $\ln(\mu_{x,t})$ au cours du temps,
- δ_x : la sensibilité de la mortalité par âge par rapport à T_t ,
- T_t : la température centrée par année,
- β_x : la sensibilité de la mortalité par âge par rapport à κ_t ,
- κ_t : la dynamique temporelle décrivant l'évolution générale de la mortalité,
- $\epsilon_{x,t}$: le paramètre aléatoire non capturé par le modèle (supposé suivre une loi normale centrée).

Dans un premier temps, il convient de se tourner vers une population restreinte basée sur les causes de décès en lien avec l'évolution de la température. Sur cette population, la température est le facteur majeur influençant la mortalité et les autres facteurs sont

supposés négligeables. Dans ce contexte, les taux de mortalité de la population restreinte peuvent s'exprimer comme :

$$\ln(\mu_{x,t}^{(1)}) = \alpha_x^{(1)} + \delta_x T_t + \epsilon_{x,t} \quad (2)$$

- $\ln(\mu_{x,t}^{(1)})$: le taux de mortalité instantané de la population restreinte,
- $\alpha_x^{(1)}$: la forme générale de la mortalité associée à la population restreinte,
- δ_x : la sensibilité de la mortalité par rapport à T_t ,
- T_t : la température par année centrée,
- $\epsilon_{x,t}$: les résidus.

Ce modèle se résout sous contraintes ($\sum_x \delta_x = 1$ et $\sum_t T_t = 0$) par la méthode des moindres carrés.

Dans un second temps, il convient d'intégrer les paramètres δ_x et T_t dans une population globale, comprenant toutes les causes de décès. Le modèle devient donc :

$$\ln(\mu_{x,t}) = \hat{\alpha}_x + \hat{\delta}_x T_t + \hat{\beta}_x \hat{\kappa}_t + \epsilon_{x,t} \quad (3)$$

où chacune des composantes peut être déterminée par la méthode des moindres carrés également.

Choix des paramètres

Une étude est menée sur la base des données fournies par les plateformes en ligne suivantes : *Human Mortality Database* [HMD, 2023] (données de mortalité générale par pays), *Global Health Data* [Hea, 2023] (données de mortalité par causes de décès par pays) et *National Centers for environmental information* [Cli, 2023] (températures par pays) qui sont considérées comme des sources fiables. Néanmoins, il convient d'avoir un regard critique sur les données de taux de décès par causes référencés dans la deuxième base de données puisque les directives d'enregistrement peuvent différer d'un pays à un autre et d'une source à l'autre.

Une attention particulière est portée sur le facteur multiplicatif δ_x du modèle de Lee-Carter température. Pour cause, il s'avère que la détermination du δ_x est extrêmement sensible aux conditions de calibration :

- choix du pays : Royaume-Uni, France, Israël,
- choix des causes de décès : maladies vectorielles (Dengue, Fièvre jaune, ...), asthme ou autres causes (infections de la peau, inflammations digestives, exposition à la chaleur et au froid, ...),
- choix des bandes d'âges : 5, 15 ou 45 ans,
- choix du sexe : femmes, hommes ou les deux,

- choix de la température : minimale, moyenne ou maximale,
- choix du niveau socio-économique : élevé, élevé-moyen, moyen, faible-moyen, faible.

Il s'avère que la courbe du paramètre δ_x pour le Royaume-Uni est positive et croissante, ce qui signifie que dans un contexte de hausse de température, les taux de mortalité augmentent avec l'âge. En France en revanche, la courbe du δ_x semble décroissante avec des valeurs hautes aux âges faibles et élevés (~ 80 ans). Cela s'interprète comme une diminution progressive du taux de décès avec l'augmentation de la température avec cependant une grande sensibilité aux grands âges. En Israël finalement, la courbe du δ_x est positive avec des valeurs hautes aux grands âges (~ 90 ans). La température semble donc avoir un impact important aux âges faibles ainsi qu'aux âges élevés, ce qui semble cohérent au vu de la vulnérabilité des populations jeunes et âgées face aux fortes chaleurs.

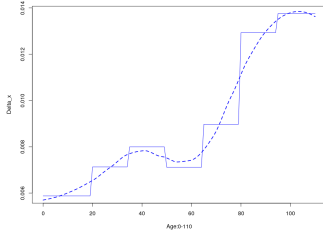


FIGURE 1 – Lee-Carter température - δ_t RU

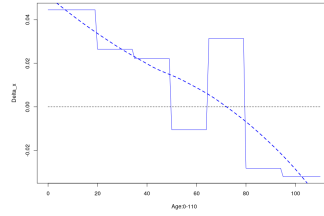


FIGURE 2 – Lee-Carter température - δ_t FR

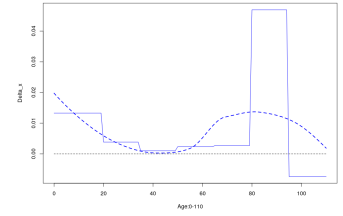


FIGURE 3 – Lee-Carter température - δ_t ISR

Les causes de décès influencées par le dérèglement climatique retenues sont les maladies vectorielles : ce choix a été effectué sur la base d'analyses statistiques, graphiques et d'une documentation rigoureuse au sujet du lien entre la température et les causes de décès. En particulier, les deux autres listes de causes de décès ont dû être rejetées pour cette modélisation du fait - entre autre - de la qualité des données. Une seconde analyse graphique a également permis de définir des tranches de 15 ans comme les plus pertinentes pour la calibration du δ_x afin de trouver un équilibre entre volatilité et plausibilité. Aussi, l'étude s'est concentrée sur des populations de femmes et d'hommes séparément, néanmoins c'est une étude simultanée qui a été retenue, permettant d'avoir une vision d'ensemble de la mortalité associée au portefeuille mixte étudié. D'un autre côté, la température maximale a été retenue pour ce modèle au regard des cohérences concernant le calcul d'espérances de vie résiduelles. Enfin, une étude par niveau socio-économique a été effectuée mais n'a pas été retenue puisque dans ce cas, le pays n'est pas référencé, entraînant des incohérences en terme d'exposition de portefeuille.

Validation du modèle

Afin de s'assurer de la robustesse du modèle de Lee-Carter température, des tests statistiques ont été réalisés :

- évaluation sur l'ensemble d'entraînement : les tests statistiques sont effectués sur les données sur lesquelles le modèle s'est entraîné,
- évaluation sur une projection à un an : les tests statistiques sont effectués sur une projection à un an, sur laquelle le modèle ne s'est pas entraîné.

Pour conclure, le modèle de Lee-Carter température est comparé à d'autres modèles de taux de mortalité considérés comme robustes dans le monde de l'actuariat : le modèle de Lee-Carter, le modèle de Plat, le modèle de SPO. En conclusion, le modèle de Lee-Carter température est jugé pertinent, étant relativement proche des autres modèles en terme de résultats aux tests statistiques et relativement performant sur la plage projetée.

Plage projetée

Pays	Test	Lee-Carter	Lee-Carter température	Plat	SPO
RU	Erreur d'estimation	7.4616%	7.3139%	14.0997%	19.0208%
	MAPE	4.9119%	4.9106%	9.6536%	12.1958%
	R^2	99.9083 %	99.8734%	96.6156%	94.9851%
	SMR	97.4134%	98.0424%	96.1271 %	95.5002 %
FR	Erreur d'estimation	8.0848 %	8.2026%	7.6568 %	48.9587%
	MAPE	5.6616%	5.6159%	4.6052%	49.8312%
	R^2	99.9957 %	99.9584 %	99.6605%	97.4383%
	SMR	98.6849%	101.0838%	101.0791 %	114.147%
ISR	Erreur d'estimation	13.3792 %	13.3708 %	30.3380%	31.1990%
	MAPE	8.7667%	8.6816%	13.9786%	14.5538%
	R^2	99.1789%	99.9330 %	75.15552 %	73.6489 %
	SMR	99.1789%	99.0734%	96.0404 %	92.9606 %

Impacts financiers

Enfin, les taux de mortalité sont projetés à partir des paramètres du modèle de Lee-Carter température. Des *Best Estimates Liabilities* de scénario central (avec hypothèse de stagnation de la température à long terme) et choqués (avec hypothèses d'augmentation de la température sur la base des scénarios du GIEC) sont par la suite déterminés pour calculer l'impact financier du dérèglement climatique sur les tables de mortalité.

Dans un premier temps, il convient de faire l'hypothèse que la hausse des températures a un impact sur les risques de mortalité et de longévité uniquement. Les revenus financiers de PartnerRe s'en trouvent impactés globalement favorablement du fait d'un investissement majoritaire dans les contrats visant à couvrir le risque de longévité. L'évolution de la valeur actuelle probable de sinistres varie alors dans l'intervalle $[-0.0075\%; -0.0014\%]$ par rapport à un scénario où la température stagne à horizon 2099.

Dans un second temps, d'autres scénarios sont imaginés, tels que des impacts additionnels sur le risque de morbidité et le risque de rachat. Dans ce cas, les revenus financiers de PartnerRe peuvent être impactés à la hausse ou à la baisse en fonction du scénario choisi.

Pourcentage d'impact des chocs sur la VAP de sinistres

Risques	Scénario 1 +1.4°C	Scénario 2 +1.8°C	Scénario 3 +2.7°C	Scénario 4 +3.6°C	Scénario 5 +4.4°C
mortalité et longévité	-0.0042%	-0.0075%	-0.0074%	-0.0025%	-0.0014%
mortalité et longévité (+10% de rachat)	-0.7321%	-0.7353%	-0.7352%	-0.7303%	-0.7282%
mortalité, longévité (−10% de rachat)	0.8068%	0.8051%	0.8068%	0.8135%	0.8189%
mortalité, longévité et morbidité	0.0025%	0.0000%	0.0016%	0.0074%	0.0133%
mortalité, longévité et morbidité (+10% de rachat)	-0.7937%	-0.7962%	-0.7949%	-0.7893%	-0.7852%
mortalité, longévité et morbidité (−10% de rachat)	0.8909%	0.8901%	0.8935%	0.9012%	0.9087%

Conclusion

En conclusion, le modèle proposé permet de tester différents scénarios de températures et des impacts sur le calcul du *Best Estimate Liabilities* sont observés. Dans l'hypothèse où les conditions de l'accord de Paris sont respectées (élévation de la température limitée à +2°C à long terme), l'impact financier sur les montants de sinistres devrait par exemple être compris dans l'intervalle $[-0.7949\%; 0.8935\%]$ selon des scénarios d'augmentation de taux de rachat et de diminution de taux de rachat respectivement. Il convient néanmoins de souligner que l'impact financier est relativement faible et qu'il peut être principalement dû à la cause de décès sélectionnée qui n'est pas forcément représentative du dérèglement climatique mais qui a la meilleure qualité de données.

Ce mémoire est avant tout un travail de recherche et d'initiation pour des modélisations de taux de mortalité visant à intégrer la composante de température. Dans ce sens, il convient de *challenge* et de mettre en doute la robustesse du modèle de Lee-Carter température proposé. En particulier, la sensibilité du modèle face au choix des paramètres révèle l'inter-corrélation des divers éléments ayant un impact sur les résultats.

Executive summary

Context

The rise in temperatures has an influence on the demographic aspects of a population, but it also has budgetary impacts for insurance and reinsurance companies. In the long term, the climate trend could lead to significant variations when calculating life insurance reserves.

Today, PartnerRe asserts its commitment to fighting against climate change. In particular, the aim of this thesis is to quantify its impact on the life and savings portfolios of the company, which mainly focuses on the United Kingdom, Europe, Middle East and Latin America.

The conducted study involves integrating the temperature component into the standard Lee-Carter model (1992). A main aspect is the choice of parameters and the validation of the model. It is then important to predict incidence rates up to the year 2100, taking into consideration five temperature evolution scenarios published by the IPCC (*GIEC*). Based on these projections, the financial impact is measured by the change in the Best Estimate Liabilities under Solvency II and crossed scenarios are made on the impact of climate change on morbidity and lapses.

Estimation Theory

The model established in the context of this thesis is inspired by the Lee-Carter model by cause of death [GERMAIN, 2022] and is expressed as follows :

$$\ln(\mu_{x,t}) = \alpha_x + \delta_t T_t + \beta_x \kappa_t + \epsilon_{x,t} \quad (4)$$

- $\mu_{x,t}$: instantaneous mortality rate at age x and year t ,
- α_x : the general shape of age-specific mortality, also the mean value of $\ln(\mu_{x,t})$ over time,
- δ_x : sensitivity of age-specific mortality regarding T_t ,
- T_t : centered temperature by year,
- β_x : sensitivity of age-specific mortality regarding κ_t ,
- κ_t : temporal dynamics describing the overall mortality evolution,
- $\epsilon_{x,t}$: unmodeled random parameter (assumed to follow a centered normal distribution).

At first, a focus is done on a restricted population based on death causes related to temperature changes. With this population, temperature is the major factor influencing mortality, and other factors are assumed to be negligible. In this context, mortality rates for the restricted population can be expressed as :

$$\ln(\mu_{x,t}^{(1)}) = \alpha_x^{(1)} + \delta_x T_t + \epsilon_{x,t} \quad (5)$$

- $\ln(\mu_{x,t}^{(1)})$: instantaneous mortality rate of the restricted population,
- $\alpha_x^{(1)}$: general shape of mortality of the restricted population,
- δ_x : sensitivity of mortality regarding T_t ,
- T_t : centered temperature by year,
- $\epsilon_{x,t}$: residuals.

This model is solved under constraints ($\sum_x \delta_x = 1$ and $\sum_t T_t = 0$) using the least squares method.

Then, the parameters δ_x and T_t are integrated into a global population, with every causes of death. The model thus becomes :

$$\ln(\mu_{x,t}) = \hat{\alpha}_x + \hat{\delta}_x T_t + \hat{\beta}_x \hat{\kappa}_t + \epsilon_{x,t} \quad (6)$$

where each of its components can be determined using the least squares method.

Choice of parameters

A study is based on the data provided by the following online platforms : Human Mortality Database [HMD, 2023] (general mortality data by country), Global Health Data [Hea, 2023] (mortality data by causes of death by country), and the National Centers for Environmental Information [Cli, 2023] (temperatures by country), which are considered reliable sources. Nevertheless, it is important to have a critical perspective on death rates by causes referenced in the second database, as recording guidelines may vary from one country to another and from one source to another.

Special attention is given to the multiplicative factor δ_x in the temperature Lee-Carter model. This is because the determination of δ_x is extremely sensitive to calibration conditions :

- choice of country : United Kingdom, France, Israel,
- choice of causes of death : vector-borne diseases (Dengue, Yellow Fever, ...), asthma or other causes (skin infections, digestive inflammations, exposure to heat and cold, ...),
- choice of age groups : 5, 15, or 45 years,
- choice of gender : women, men or both,
- choice of temperature : minimum, average or maximum,
- choice of socio-economic level : high, high-medium, medium, low-medium, low.

The curve of the δ_x parameter indicates an increase in the mortality rate associated to temperature for the United Kingdom. However, in France, the δ_x curve is interpreted

as a gradual decrease in the risk of death with increasing temperature. Nevertheless, peaks of sensitivity appear at young ages and old ages (~ 80 years). Finally, in Israel, temperature seems to have a significant impact at young ages as well as old ages (~ 90 years), which is consistent with the vulnerability of populations to heat and cold at these ages.

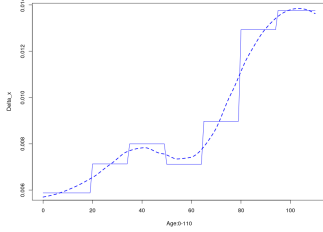


FIGURE 4 – Temperature Lee-Carter - δ_t UK

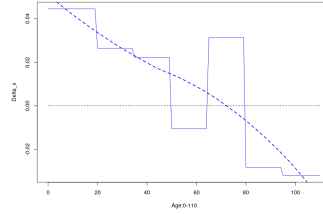


FIGURE 5 – Temperature Lee-Carter - δ_t FR

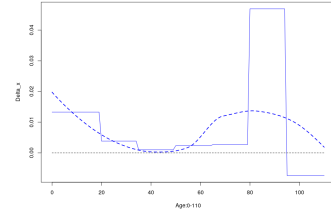


FIGURE 6 – Temperature Lee-Carter - δ_t ISR

The selected causes of death influenced by climate change are vector-borne diseases. This choice is made based on statistical and graphical analyses, as well as rigorous documentation regarding the link between temperature and causes of death. In particular, the other two lists of causes of death have to be rejected for this modeling, partly due to data quality issues. A second graphical analysis also permits to determine 15-year age groups as the most relevant for calibrating δ_x in order to strike a balance between volatility and plausibility. In addition, the study initially focuses on populations of women and men separately, but a simultaneous study is ultimately chosen to provide an overall view of mortality associated with the mixed portfolio under study. On the other hand, the maximum temperature is chosen for this model due to consistencies in residual life expectancy calculations. Finally, a study by socioeconomic level is conducted but not retained because, in this case, the country is not referenced, leading to inconsistencies in portfolio exposure.

Validation of the model

To ensure the robustness of the temperature Lee-Carter model, statistical tests are conducted :

- In-sample evaluation : statistical tests are performed on the same data on which the model was trained.
- One-year projection evaluation : statistical tests are performed on a one-year projection on which the model was not trained.

As a conclusion, the temperature Lee-Carter model is compared to other mortality rate models considered reliable in the actuarial world : the Lee-Carter model, the Plat model, and the SPO model. Ultimately, the temperature Lee-Carter model is deemed

relevant, as it shows results in statistical tests that are relatively close to other models and performs relatively well within the projected range.

One-year projection evaluation

Country	Test	Lee-Carter	Lee-Carter temperature	Plat	SPO
UK	Estimation error	7.4616%	7.3139%	14.0997%	19.0208%
	MAPE	4.9119%	4.9106%	9.6536%	12.1958%
	R^2	99.9083 %	99.8734%	96.6156%	94.9851%
	SMR	97.4134%	98.0424%	96.1271 %	95.5002 %
FR	Estimation error	8.0848 %	8.2026%	7.6568 %	48.9587%
	MAPE	5.6616%	5.6159%	4.6052%	49.8312%
	R^2	99.9957 %	99.9584 %	99.6605%	97.4383%
	SMR	98.6849%	101.0838%	101.0791 %	114.147%
ISR	Estimation error	13.3792 %	13.3708 %	30.3380%	31.1990%
	MAPE	8.7667%	8.6816%	13.9786%	14.5538%
	R^2	99.1789%	99.9330 %	75.15552 %	73.6489 %
	SMR	99.1789%	99.0734%	96.0404 %	92.9606 %

Financial Impacts

Finally, mortality rates are projected based on the parameters of the Lee-Carter temperature model. Best Estimate Liabilities for the central scenario (assuming long-term temperature stagnation) and shocked scenarios (assuming temperature increases based on IPCC scenarios) are subsequently determined to calculate the financial impact of climate change on mortality tables.

Initially, it is assumed that the rise in temperatures has an impact only on mortality and longevity risks. Thus, PartnerRe's financial income is positively affected due to a majority investment in contracts covering longevity risk. The evolution of the probable present value of claims then varies within the range of $[-0.0075\%; -0.0014\%]$ compared to a scenario where temperatures remain constant until 2099.

In a second phase, other scenarios are considered, including additional impacts on morbidity risk and lapse risk. In this case, PartnerRe's financial income may be either positively or negatively affected depending on the chosen scenario.

Percentage of choc impacts on claims VAP

Risks	Scenario 1 $+1.4^{\circ}C$	Scenario 2 $+1.8^{\circ}C$	Scenario 3 $+2.7^{\circ}C$	Scenario 4 $+3.6^{\circ}C$	Scenario 5 $+4.4^{\circ}C$
mortality and longevity	-0.0042%	-0.0075%	-0.0074%	-0.0025%	-0.0014%
mortality and longevity (+10% lapse)	-0.7321%	-0.7353%	-0.7352%	-0.7303%	-0.7282%
mortality, longevity (-10% lapse)	0.8068%	0.8051%	0.8068%	0.8135%	0.8189%
mortality, longevity and morbidity	0.0025%	0.0000%	0.0016%	0.0074%	0.0133%
mortality, longevity and morbidity (+10% lapse)	-0.7937%	-0.7962%	-0.7949%	-0.7893%	-0.7852%
mortality, longevity and morbidity (-10% lapse)	0.8909%	0.8901%	0.8935%	0.9012%	0.9087%

Conclusion

In conclusion, the proposed model allows for testing different temperature scenarios, and impacts on the calculation of Best Estimate Liabilities are observed. Assuming that the conditions of the Paris Agreement will be respected (long-term temperature increase limited to 2°), the financial impact on claims amounts should, for example, stay within the range of $[-0.7949\%; 0.8935\%]$ for scenarios of increased and decreased lapse rates, respectively. However, it is important to note that the financial impact is relatively small and may be primarily due to the selected cause of death, which may not be representative of climate change.

This thesis is a research and introductory work for mortality rate modeling aiming to incorporate the temperature component. In this regard, it is important to challenge and question the robustness of the proposed temperature Lee-Carter model. Specifically, the sensitivity of the model to the choice of parameters reveals the intercorrelation of various elements that impact results.

Table des matières

1	Introduction et cadre de l'étude	1
1.1	Dérèglement climatique	1
1.1.1	Définition et origines du dérèglement climatique	1
1.1.2	Conséquences du dérèglement climatique	2
1.1.3	Dérèglement climatique et assurance	6
1.2	Présentation des produits de réassurance traités dans l'étude	8
1.2.1	Définition des produits d'assurance prévoyance et épargne	9
1.2.2	Spécificité du portefeuille de PartnerRe	10
1.3	Contexte règlementaire : Best Estimate Liabilities sous Solvabilité II	12
1.3.1	Solvabilité II	12
1.3.2	<i>Best Estimate Liability</i>	14
1.3.3	SCR et marge pour risque	15
1.3.4	ORSA	17
1.3.5	Place du dérèglement climatique dans Solvabilité II	17
2	Méthode de modélisation	19
2.1	Présentation des données	19
2.1.1	Portefeuille de PartnerRe	19
2.1.2	Données de Mortalité	22
2.1.3	Données de températures	24
2.2	Histoire de la modélisation de la mortalité et théorie d'estimation	26
2.2.1	Modèle de Lee-Carter	27
2.2.2	Modèle de Plat	30
2.2.3	Modèle de SPO	31
2.2.4	Modèle de Lee-Carter par cause de décès	32
2.2.5	Modèle Lee-Carter température	33
2.2.6	Réseaux de neurones	35
2.2.7	Prédictions	36
2.2.8	Fermetures de tables	38
2.3	Validation du modèle	38
2.3.1	Tests statistiques	38
2.3.2	Plausibilité biométrique	40
3	Valeurs numériques	43

3.1	Cadre de l'étude	43
3.2	Modèle de Lee-Carter	44
3.3	Modèle de Lee-Carter température	49
3.3.1	Différents paramètres obtenus	49
3.3.2	Sensibilité du modèle au choix de différents paramètres	54
3.4	Modèle de Plat	78
3.5	Modèle de SPO	80
3.5.1	Différents paramètres obtenus	80
3.5.2	Sensibilité du modèle au choix de différents paramètres	82
3.6	Validation du modèle	92
3.7	Prédiction des taux de mortalité	94
3.7.1	Modèle de Lee-Carter	94
3.7.2	Modèle de Lee-Carter température	94
3.7.3	Modèle de Plat	95
3.7.4	Modèle de SPO	96
3.7.5	Fermetures de tables	97
3.8	Conclusion	98
4	Impacts financiers du dérèglement climatique	101
4.1	Introduction et calcul du <i>Best Estimate Liabilities</i> sans réchauffement climatique	101
4.2	Calcul du <i>Best Estimate Liabilities</i> avec réchauffement climatique	102
4.3	Réflexion sur les autres conséquences et risques du dérèglement climatique	105
4.3.1	Risque de morbidité	105
4.3.2	Chocs de rachat	107
4.4	Conclusion	111
5	Conclusion	113
5.1	Modèle de Lee-Carter température et limites	113
5.2	Ouverture	115

Chapitre 1

Introduction et cadre de l'étude

Dans un contexte de hausse des températures, la composante climatique est une donnée qu'il convient de considérer et de comprendre afin de pouvoir réagir au mieux à ses impacts. Aujourd'hui, les dommages liés à la tendance climatique se répercutent dans divers domaines y compris celui des assurances qui doivent prendre des engagements financiers à ce sujet. *The European Insurance Occupational Pensions Authority* (EIOPA) et l'Autorité de Contrôle Prudentiel et de Résolution (ACPR) ont par ailleurs mis en place des réglementations afin de les aider à y faire face.

Alors que la réassurance joue un rôle primordial quant à la protection des portefeuilles d'assurance, ce mémoire a pour objectif de présenter PartnerRe comme un acteur engagé vis-à-vis du dérèglement climatique.

1.1 Dérèglement climatique

En premier lieu, il convient de définir le dérèglement climatique en évoquant ses origines et ses conséquences en mettant l'accent sur son impact au sein des compagnies d'assurance.

1.1.1 Définition et origines du dérèglement climatique

La Terre - troisième planète du système solaire - se caractérise par l'unique écosystème connu composé d'organismes vivants qui contribuent à une certaine stabilité. Les différentes forces au sein de la lithosphère, l'atmosphère et l'hydrosphère interagissent entre elles et sont capables de se compenser mutuellement, résultant en une situation stable et harmonieuse. En particulier, cet équilibre météorologique et biogéométrique contribue à la survie de l'humanité.

Principalement influencées par des variations de l'activité solaire, de concentration de gaz à effet de serre ou de mouvements des plaques tectoniques, la Terre a rencontré plusieurs ères de température allant de grandes périodes de refroidissement à d'autres

de grands réchauffements. Néanmoins, l'historique de températures révèle que depuis le début de l'ère industrielle (*XVIII^e* siècle), les activités humaines influencent gravement ce phénomène. En somme, une augmentation anormale et rapide des températures moyennes connue sous le nom de "dérèglement climatique".

De manière plus approfondie, le dérèglement climatique prend sa source dans différents phénomènes tels que l'agriculture intensive, la combustion de combustibles fossiles ou la déforestation. En cause, le développement exponentiel dans les domaines des transports, de l'industrie et de la production d'énergie. Ces activités provoquent malheureusement l'émission massive de gaz à effet de serre (GES) qui ont un impact direct sur la température moyenne de la Terre, le niveau de la mer et le nombre d'événements climatiques extrêmes. En effet, le dioxyde de carbone, de méthane et de protoxyde d'azote dans l'atmosphère sont les majeurs gaz à effet de serre émis principalement par l'agriculture et la combustion des combustibles fossiles. Ils y stagnent et la température moyenne de la Terre augmente.

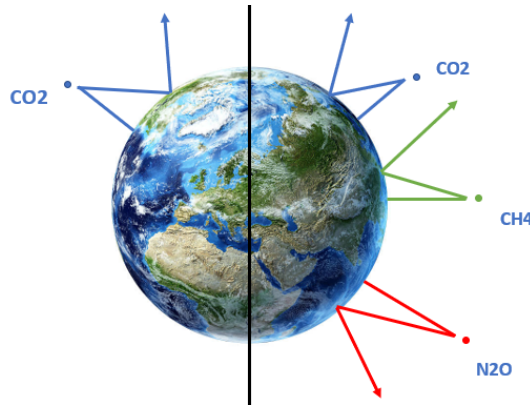


FIGURE 1.1 – La Terre sans et avec GES

Le réchauffement de la Terre par l'effet de serre est un phénomène naturel et nécessaire au maintien d'une température confortable pour les êtres vivants. En particulier, sans effet de serre, la température moyenne y serait négative (-17.8°C). Néanmoins, la révolution industrielle oriente la tendance de la température vers des valeurs excessives et risquées. Il est essentiel de prendre conscience de cette orientation, de la comprendre et de l'anticiper afin de garantir la pérennité de la vie humaine.

1.1.2 Conséquences du dérèglement climatique

La précédente définition du dérèglement climatique suggère des conséquences quant à la pérennité de la vie humaine. Il s'agit donc d'énumérer ses impacts tels qu'ils sont connus aujourd'hui.

Pics de chaleur

La première conséquence du dérèglement climatique est le réchauffement ponctuel et permanent de certaines zones terrestres, en lien avec la réflexion excessive d'infrarouges. En effet, si la température augmente globalement, les pics de chaleurs et les canicules aussi sont amenés à se répéter et à être plus intenses. Un article du journal "La Croix" [LC, 2023] recense des températures records en Europe au dessus des normales de saison : *"de fortes vagues de chaleurs s'abattent sur la péninsule italienne et ses îles avec 40 degrés et au-delà (48°C en Sardaigne), jusqu'à la Grèce, où des records historiques de température sont battus"*. En résultent des incendies avec des dizaines de milliers d'hectares brûlés et le même nombre de personnes évacuées. La désertification progressive et la pénurie d'eau des zones touchées est également visible, sans parler de la surmortalité due aux événements caniculaires extrêmes qui s'explique par une moins bonne résistance à la chaleur des personnes vulnérables d'après un article du journal "Ta Météo" [FERNANDEZ, 2023]. La sécheresse et les pénuries d'eau contribuent également à des pénuries alimentaires et accentuent la hausse des prix des denrées alimentaires, entraînant une malnutrition chez les populations vulnérables.

Catastrophes naturelles

Les catastrophes naturelles liées au réchauffement climatique (incendies, intempéries) dégradent cultures et habitations. Toutes les zones sont touchées : d'un côté, les régions intérieures et terrestres (où la population vit de l'agriculture) rencontrent une désertification progressive. De l'autre, les régions côtières (où la population vit des activités en lien avec le littoral) voient leur activité compromise par l'avancée de la mer. Ces événements extrêmes peuvent notamment amener à des mouvements de populations et certaines industries sont amenées à disparaître en lien avec une réorientation économique. Les catastrophes naturelles et les migrations de masse contribuent également à déstabiliser le système financier, ce qui amène progressivement à des crises financières.

Montée des eaux

Une autre conséquence majeure visible du dérèglement climatique est le réchauffement des océans. Les molécules d'eau prennent du volume, ce qui entraîne la montée du niveau de la mer et qui a de lourdes conséquences pour les 20% de la population mondiale vivant à quelques dizaines de kilomètres des côtes d'après le livre "Le climat en 100 questions" [HUET et RAMSTEIN, 2022]. Par exemple, jusqu'en janvier 2023, le Finistère était en vigilance orange avec plusieurs villes telles que *"Châteaulin, Quimperlé et Pleyben sous les eaux"* rappelle le journal "Météo-France" [France, 2023].

Acidité des océans

Mais encore, le réchauffement de la Terre a un impact sur l'acidité des océans. En effet, d'après un article de "Océan et Climat" [COLENTZ, 2023], une grande partie du

CO_2 générée par l'activité humaine est absorbée et dissoute en acide carbonique par les océans depuis la fin du *XVIII^e* siècle. Cela permet à la Terre de réduire les impacts terrestres du changement de température. Néanmoins, le nombre d'ions hydrogènes augmente dans l'océan tandis que le nombre d'ions carbonates diminue, perturbant ainsi les apports calcaires de l'écosystème marin. Cette acidification affecte en particulier les chaînes alimentaires marines et peut nuire aux activités maritimes telles que la pêche, créant des insécurités alimentaires. La perte de biodiversité marine peut également renforcer l'érosion côtière.

Perturbation de la faune et la flore

Dans la continuité des premières conséquences au dérèglement climatique évoquées, ce sont les biodiversités terrestres et marines qui sont mises en péril. De part la destruction de leur habitat et des changements d'apports énergétiques, la faune et la flore se voient affaiblies et les protagonistes peuvent rencontrer la nécessité de migrer. Par exemple, certains animaux sauvages se rapprochent des agglomérations afin d'y trouver des ressources alimentaires. Mais le réchauffement climatique peut perturber la pérennité des espèces avant même la naissance des nouveaux-nés : par exemple, une température optimale d'incubation des poissons est d'une vingtaine de degrés et un réchauffement excessif de l'eau peut provoquer différents scénarios, selon l'article de "Océan et Climat" [COLENTZ, 2023] : développement incorrect de l'embryon, mauvaise éclosion, malformation, faiblesse générale, retard de croissance.

A l'opposé, le dérèglement climatique peut engendrer la prolifération de certaines espèces comme les moustiques ou les tiques. Dans ce cas, les conséquences peuvent être la transmission de maladies : paludisme, dengue, fièvre jaune, fièvre du Nil occidental, maladie de Lyme, fièvre de la vallée du Rift. Il arrive également que des essaims d'insectes détruisent les cultures, entraînant une insécurité alimentaire.

Augmentation du nombre de décès

La santé humaine est évidemment impactée par le dérèglement climatique et de nombreuses personnes à risques décèdent ou voient leur niveau de vie détérioré. Un article en ligne de l'"Organisation Mondiale de la Santé" [de la Santé, 2021] annonce "*250 000 décès supplémentaires par an*" entre 2030 et 2050 à cause de l'augmentation de la température.

Il est important de distinguer les différentes causes de décès dues au dérèglement climatique. En accord avec *World Health Organization* [Organization, 2018], il y a d'un côté les impacts directs et de l'autre les impacts indirects de la température sur la santé :

Les causes directes :

La température comme facteur de décès :

- déshydratation,
- épuisement,
- crampes musculaires,
- décompensation cardio-vasculaire.

La température comme facteur d'aggravation des maladies :

- maladies respiratoires en lien avec la pollution de l'air (asthme, allergies),
- maladies cardio-vasculaires,
- maladies de peau en lien avec l'exposition à la chaleur, au soleil et aux radiations,
- maladies rénales et inflammations de l'intestin en lien avec la mal-nutrition et la sous-nutrition causées par la destruction des écosystèmes (diabète, obésité),
- maladies infectieuses vectorielles en lien avec l'augmentation des températures en hiver, ainsi que les fortes pluies qui sont propices à la prolifération des insectes vecteurs de maladies telles que la maladie de dengue, zika, fièvre jaune, chikungunya et certains types d'encéphalite,
- maladies mentales ou de stress en lien avec des mouvements massifs de population causés par la destruction des logements, la chaleur ou la ruine économique. N'est pas à négliger le stress mental post traumatique et une augmentation du nombre de suicides, selon un article rédigé par le journal "Guardian" [Guardian, 2023].

Les causes indirectes :

La température comme perturbateur dans le domaine médical :

- augmentation du nombre d'appels,
- augmentation du nombre de patients,
- manque de médecins,
- augmentation du temps de réaction des secours.

La température comme perturbateur dans l'infrastructure :

- accidents de travail en lien avec l'exposition à la chaleur,
- efficacité de production,
- modification de la composition des sols en lien avec des inondations ou des incendies,
- mouvements de population.

Des conséquences durables

La Terre étant lente à réagir, la température continuera d'augmenter bien après une réponse des humains. Cinq scénarios ont d'ailleurs été prédits par le *Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat*¹ (GIEC) allant de 1.4 à 4.4 degrés supplémentaires d'ici 2100.

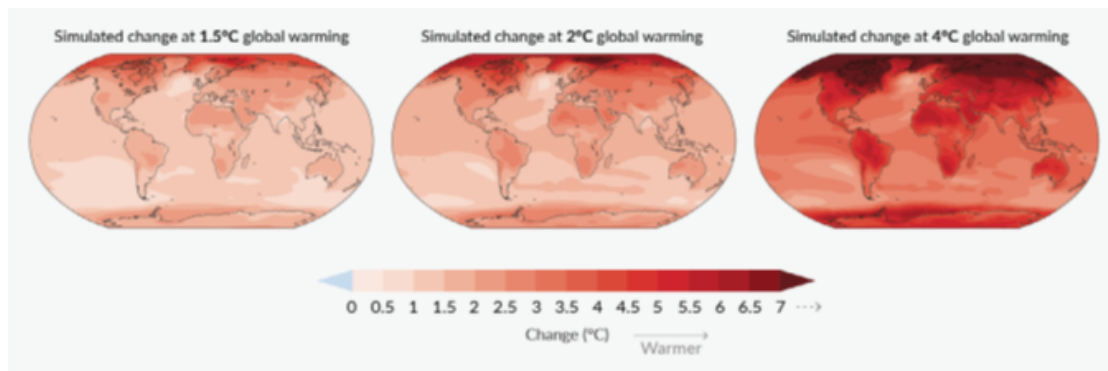


FIGURE 1.2 – Simulations de différents scénarios d'évolution de la température (1.5°C, 2°C, 4°C) depuis la période préindustrielle (1850-1900) [App, 2022]

Le GIEC est une organisation reconnue pour son expertise dans l'évaluation du changement climatique. Ses rapports sont basés sur des recherches récentes et fiables et décrivent de manière détaillée les impacts actuels et futurs du dérèglement climatique sur l'environnement, la société et l'économie. Les prédictions du GIEC seront détaillées partie 2.1.3.

Un engagement a néanmoins été pris par plusieurs pays des États membres lors de la signature de l'accord de Paris en 2015. D'après le Conseil européen [européen, 2015], l'objectif est de faire devenir l'Union Européenne comme "*climatiquement neutre d'ici 2050*" et de ne pas excéder une élévation de la température de +2°C à long terme.

1.1.3 Dérèglement climatique et assurance

Il a été vu précédemment les conséquences du dérèglement climatique du point de vue de l'écosystème et de la santé. Néanmoins, il a également un impact financier comme le souligne l'article de FUTURA [FOURNASSON, 2023] par son titre accrocheur "*275 milliard de dollars, c'est le coût des catastrophes naturelles dans le monde en 2022*". La journaliste scientifique recense ouragans, tempêtes, inondations, séismes, sécheresses mais également d'autres aléas climatiques extrêmes en indiquant leur nombre en croissance dans un contexte de dérèglement climatique. Du point de vue financier, les premières victimes du dérèglement climatique sont l'Etat, les assureurs et les réassureurs

1. *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* en anglais

qui doivent faire face à cette montée des coûts.

En effet, les secteurs de l'assurance, de la finance ou du management ne sont pas épargnés et de nombreux assureurs sont désormais sollicités à s'engager vis-à-vis du dérèglement climatique. Dans ce sens, l'EIOPA [App, 2022] et l'ACPR [ACP, 2022] ont publié des aides et des réglementations pour intégrer les mouvements climatiques dans leurs évaluations des risques et de solvabilité. Ces aides visent notamment à accompagner les différents acteurs dans l'évaluation des impacts liés à leur activité.

L'Association Actuarielle Internationale et le GIEC [AELLEN, 2022] suggèrent deux façons de communiquer sur les enjeux du dérèglement climatique pour les entreprises. La première idée consiste à les intégrer dans leurs rapports extra-financiers, complétant les rapports financiers traditionnels. La deuxième propose de les intégrer à l'exercice ORSA (*Own Risk and Solvency Assessment*). Cette deuxième solution permet d'identifier les enjeux climatiques propres à l'entreprise avec un niveau de détails élevé quant à leur interaction avec d'autres risques. Ce point sera détaillé en partie 1.3.4.

L'EIOPA [App, 2022] considère au moins deux scénarios futurs concernant la hausse des températures. Le premier étant le scénario optimiste avec une augmentation de la température inférieure à 1.5 degrés et le dernier étant le pessimiste avec une augmentation de la température supérieure à 2 degrés. En accord avec la partie 1.1.2, l'article de l'EIOPA [App, 2022] explique que le changement climatique se manifeste avec des conséquences en terme de pics de chaleurs et de froid, d'humidité et de sécheresse, de vent, de neige et de glace ou de pollution d'air (dioxyde de carbone et radiation). La première réaction de la part des compagnies d'assurances est de distinguer les trois types de risques impliqués dans le changement climatique :

- risque physique : impact direct du dérèglement climatique sur les personnes et les biens résultant d'une augmentation de la fréquence de sinistre et de leur coût. L'article de l'EIOPA en distingue deux types : chronique et aiguë,
- risque de transition : impact économique et financier en réponse au risque physique. L'article de l'EIOPA énumère par exemple des sous-risques de transition tels que : risques politiques, risques légaux, risques technologiques, risque de réputation, risque de marché,
- risque de responsabilité : impact financier dans le cas où une compagnie d'assurance ne prendrait pas en considération le dérèglement climatique.

Dans le cadre de ce mémoire et dans un contexte de dérèglement climatique, seuls les risques physiques et de transition seront mentionnés. En effet, la hausse des températures moyennes rime avec les risques de catastrophes naturelles, de décès, d'erreur ou d'évolution future et il ne sera pas mentionné la notion de sanction ou de responsabilité face au dérèglement climatique.

Il peut également être pertinent de distinguer les "*facteurs de risques internes (qui impliquent l'ensemble des métiers et fonctions des organismes) et externes (comportements de marché, politiques publiques, etc.) aux établissements qui peuvent limiter la capacité des (ré)assureurs à adapter et optimiser leur stratégie face au changement climatique*" comme le fait l'ACPR. Il est également possible de différencier les risques courts termes (risque de dommages de biens) et les risques longs termes (risque de longévité, risque de décès).

Ces risques impactent à échelles différentes la solvabilité et le besoin en capital des compagnies d'assurance c'est pourquoi il est essentiel de savoir interpréter les risques ainsi que les exigences qui en découlent. Les réglementations en vigueur informent que des analyses vont désormais devoir être effectuées en s'appuyant sur des jeux de données construits ou déjà disponibles dans les compagnies. L'objectif est de tester leur résistance et leur robustesse face au dérèglement climatique. Des impacts devront être évalués à court et long terme pour évaluer les nouveaux revenus et dépenses des entreprises. L'EIOPA préconise ainsi de prolonger les périodes d'études sur plusieurs décennies, telles que :

	Court terme	Moyen terme	Long terme
Étude générale	5 ans	10 ans	30 ans
Étude demandée dans le cadre du dérèglement climatique	10 ans	30 ans	80 ans

Il est important de souligner que l'article de l'EIOPA [App, 2022] soutient que les compagnies d'assurance ont l'avantage de pouvoir :

- communiquer autour de leurs actions en lien avec le dérèglement climatiques : avancées, impacts et découvertes,
- sensibiliser les associés et assurés sur les risques du dérèglement climatique,
- participer financièrement à l'atteinte des objectifs environnementaux dans un but collectif,
- trouver des solutions durables,
- se positionner en tant qu'investisseurs dans les conseils d'administration.

1.2 Présentation des produits de réassurance traités dans l'étude

Il a été mentionné que PartnerRe s'engage comme réassureur vis-à-vis du dérèglement climatique. Dans ce contexte, ce mémoire a pour but d'analyser l'impact du changement de température sur les produits intégrant des risques en lien avec l'augmentation de la température. Les produits sélectionnés sont ainsi des produits de prévoyance et de rentes

viagères dans lesquels interviennent les risques de mortalité et de longévité.

1.2.1 Définition des produits d'assurance prévoyance et épargne

La présente partie est dédiée à l'étude des produits d'assurance prévoyance et épargne qui visent à assurer la sécurité financière et la protection des individus face aux risques.

Produits d'assurance prévoyance

En accord avec la loi EVIN du 31 décembre 1989, l'assurance prévoyance a pour but *"la prévention et la couverture du risque décès, des risques portant atteinte à l'intégrité physique de la personne ou liés à la maternité ou des risques d'incapacité de travail ou d'invalidité ou du risque chômage"*.

Plus globalement, l'objectif de ce service est de permettre aux assurés de surmonter financièrement certaines épreuves de la vie. Il peut être appliqué par des compagnies régies par le code des assurances, le code de la sécurité sociale ou le code de la mutualité. D'un autre côté, l'objectif de l'assureur en charge de ce service est de modéliser les garanties de prévoyance proposées par la compagnie d'assurance et ainsi de maintenir les niveaux des provisions suffisantes pour garantir sa solvabilité et son engagement vis-à-vis de l'assuré.

En général, la souscription d'un contrat de prévoyance se fait sous conditions particulières. C'est-à-dire que l'assureur est en droit de demander aux assurés leurs caractéristiques particulières afin d'ajuster ses tarifs. Le contrat peut être individuel ou collectif et dure jusqu'à sa clôture. En contrepartie de ces services et d'une prise en charge de l'assureur en cas de sinistre sous forme de capital ou de rente, les assurés ont le devoir de verser, à intervalle régulier ou ponctuellement, un montant fixe sur un principe de "fonds perdus". C'est à dire que la rente versée ne lui permet pas de constituer un capital.

Dans le cadre de l'assurance prévoyance, différents contrats peuvent être souscrits (ensemble ou séparément) avec des garanties telles que :

- accidents de la vie,
- décès/obsèques,
- incapacité/invalidité,
- dépendance,
- arrêt de travail et maintien de salaire,
- éducation.

Enfin, il peut exister une clause de rachat de l'assurance prévoyance. Cette option permet à l'assuré de mettre fin à son contrat avant sa maturité. Dans ce cas, l'assureur doit uniquement restituer le trop perçu de prime à l'assuré.

Dans le cadre de ce mémoire, les risques liés à l'assurance décès temporaire vont être étudiés en détail et des sensibilités vont être proposées pour les risques d'incapacité/invalidité et de dépendance.

Produits d'assurance épargne

D'un autre côté, l'assurance épargne a pour objectif de couvrir les assurés contre certains risques financiers tels que celui d'une longévité accrue. Elle peut être souscrite par des assurés désireux de se protéger contre le risque d'épuiser prématurément leurs ressources financières. Dans un contexte d'augmentation de l'espérance de vie, de vieillissement de la population ainsi que de prise de conscience des risques financiers liés à une longévité accrue, l'assurance épargne rencontre aujourd'hui une forte demande.

L'assurance épargne permet à l'assuré de constituer progressivement une épargne sur une période déterminée, appelée période de constitution. Durant cette même période, l'assuré a le devoir de verser régulièrement des primes qui sont généralement investies dans des fonds ou des placements financiers par la compagnie d'assurance. La période de constitution passée, l'assuré peut récupérer son épargne sous forme de capital ou de rente durant la période dite de restitution. La durée des contrats d'épargne peut être prolongée et les prestations peuvent s'adapter à certains changements de situations.

En particulier, le risque de longévité représente le risque de sous-estimations du taux de survie des assurés, c'est-à-dire le risque que les assurés vivent plus longtemps que les estimations. De cette façon, les provisions destinées au versement des primes peut être insuffisantes pour couvrir l'engagement de l'assureur.

1.2.2 Spécificité du portefeuille de PartnerRe

Ce mémoire est réalisé au sein du groupe international de réassurance PartnerRe fondé en 1993 aux Bermudes. PartnerRe se penche sur des risques Vie & Santé, mais également sur des risques Non-Vie tels que des risques de Biens & Responsabilité Civile. Par exemple, il est possible de retrouver parmi ces derniers, les sujets suivants : agriculture, aviation et espace, cyber risque, nucléaire, sport et loisirs ou encore terrorisme.

Plus précisément, ce mémoire est effectué dans le groupe **Actuariat - EMELA (Europe, Middle East, Latin America) - Life & Health** composé des équipes "prévoyance", "longévité", "consolidation" et "garantie plancher".

Réassurance

La définition la plus répandue de la réassurance est la suivante : *"La réassurance est l'assurance de l'assurance"*. Il convient cependant de souligner en addition à cette définition son avantage réglementaire, financier et commercial. En effet, la réassurance est

un avantage pour la compagnie d'assurance car elle lui permet de se défaire de certains risques tout en gardant intacte et sans division le contrat. Dans certains cas, elle permet aussi de souscrire à plus de risques.

Il existe différents types de réassurance :

- proportionnelle/non-proportionnelle permettant de transférer le risque de l'assureur chez le réassureur,

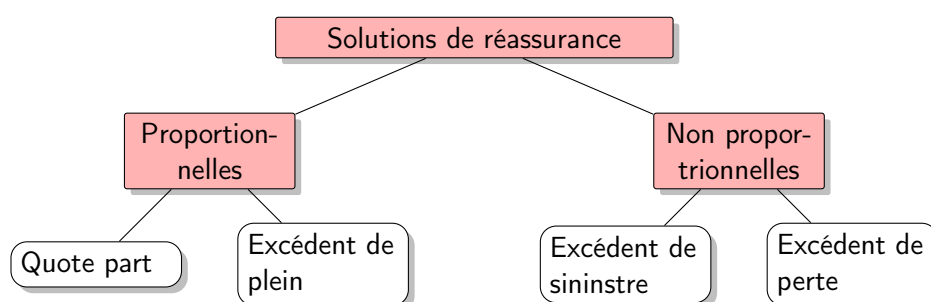


FIGURE 1.3 – Organigramme des solutions de transfert du risque

- facultative/obligatoire concernant les conditions de souscription.

D'un côté, la réassurance par quote part consiste en la prise en charge d'une proportion définie du portefeuille assuré par le réassureur. D'un autre côté, l'excédent de plein consiste en une prise en charge d'une proportion des sinistres excédant un certain montant (appelé plein de rétention). Il existe également des solutions de réassurance non proportionnelles comme la réassurance par excédent de sinistre par risque ou par événement. Enfin, la réassurance peut se faire par excédent de perte annuelle où l'objectif de l'assureur est de se couvrir contre les risques de mauvais résultats.

Une notion intéressante en réassurance est également celle des "captives" qui font référence à des entités créées dans le but d'assumer les risques liés aux activités principales de la compagnie ou à des risques spécifiques qui peuvent ne pas être bien couverts sur le marché traditionnel de l'assurance et de la réassurance.

Produits de réassurance prévoyance

La réassurance prévoyance est primordiale quant à la gestion des risques liés aux prestations de prévoyance offertes par les compagnies d'assurance. Afin de se défaire de certains risques tels que le risque de mortalité, l'assureur propose une prime à la compagnie de réassurance. En échange, la réassurance peut accepter de prendre en charge les impacts financiers de prévoyance en cas de sinistralité. Cela permet de mieux équilibrer le portefeuille de risques et de réduire l'impact potentiel de pertes exceptionnelles. La

contribution de réassurance dans l'évaluation des risques des contrats de prévoyance est également bénéfique pour les assureurs en raison de leur haut niveau d'expertise, leurs connaissances des risques et de tendances démographiques.

Produits de réassurance épargne

En ce qui concerne PartnerRe et ce mémoire en particulier, seuls des contrats d'épargne en phase de restitution sont traités, également appelés rentes viagères.

Il arrive qu'au fil des années, les taux de mortalité évoluent différemment des estimations des assureurs. Afin de se protéger contre le risque de longévité, la compagnie d'assurance peut souscrire à une réassurance épargne et offrir des primes fixes à la compagnie de réassurance. Les compagnies de réassurance, grâce à leur vision plus large du marché, peuvent alors faire de meilleures estimations. En contrepartie, elle prendra en charge les impacts financiers liés à cette différence d'estimation de la durée de vie des assurés. En ce qui concerne la rente viagère, contrairement à la plupart de contrat de réassurance en prévoyance, la prime versée au réassureur est une prime de réassurance fixe, indépendante du risque supporté.

1.3 Contexte réglementaire : Best Estimate Liabilities sous Solvabilité II

Après avoir mentionné les produits d'assurance et de réassurance étroitement liés au dérèglement climatique, il convient de rappeler leur encadrement par une réglementation stricte des organisations gouvernementales. En effet, le dérèglement climatique peut avoir des impacts réglementaires significatifs si les organisations de supervision décident de mettre en place des normes spécifiques pour guider les compagnies à s'y adapter. De cette façon, expliquer comment la réglementation affecte les produits d'assurance et de réassurance montre comment les entreprises d'assurance et de réassurance s'inscrivent dans des initiatives d'atténuation des effets du changement climatique.

1.3.1 Solvabilité II

Solvabilité II est une réglementation entrée en vigueur en Europe au 1^{er} janvier 2016. Elle vise à renforcer la performance des calculs de capital de solvabilité requis pour les assureurs et réassureurs. Elle vise aussi à améliorer la gestion des risques dans leur gouvernance. En particulier, Solvabilité II fait partie des réponses apportées face à certains événements majeurs (tels que la crise financière de 2008) qui ont influencé la réglementation de l'assurance.

Solvabilité II se caractérise avant tout par ses 3 piliers :

- Pilier 1 : Des exigences quantitatives
- Pilier 2 : Des exigences qualitatives
- Pilier 3 : Des exigences de reporting prudentiel

Elle a introduit un changement significatif dans la réglementation des compagnies d'assurance, en mettant l'accent sur l'évaluation des risques, la transparence et la gestion prudente. Ce cadre réglementaire vise à renforcer la stabilité et la solidité du secteur de l'assurance dans l'Union Européenne, ainsi qu'à protéger les intérêts des assurés. Désormais, le cadre réglementaire assure une solvabilité à long terme des compagnies d'assurance et de réassurance en calculant de façon honnête, précise et prudente l'ensemble des risques auxquels elles sont exposées. Conscientes des menaces, les compagnies sont en mesure de s'assurer de disposer de suffisamment de ressources pour y faire face en les identifiant.

Dans un premier temps, cette réforme veille à la bonne évaluation et aux bonnes estimations des risques et des flux de la compagnie. Il convient alors de mentionner le *Best Estimate Liabilities* (BEL), le *Solvency Capital Requirement* (SCR) et le *Minimum Capital Requirement* (MCR) qui seront définis dans les sections 1.3.2 et 1.3.3. Ces éléments apparaissent notamment dans le bilan prudentiel des compagnies d'assurance et de réassurance, un outil essentiel pour évaluer leur solidité financière et leur capacité de résistance face aux risques.

Actif	Passif
Actifs en valeur de marché	Excédent de marge
	SCR - MCR
	MCR
	Marge pour risque
	<i>Best Estimate Liabilities</i>
Total Actif	Total Passif

TABLE 1.1 – Bilan prudentiel sous la directive Solvabilité II

Solvabilité II garantit une consolidation robuste de la gouvernance de la compagnie en addition avec une application du principe de prudence. Cela implique la mise en oeuvre de procédures et politiques strictes.

Enfin, Solvabilité II s'assure de la transparence des compagnies d'assurance et de réassurance. Dans ce contexte, les compagnies doivent fournir de façon régulière des informations spécifiques sur leur portefeuille et leur situation aux autorités de contrôle, l'objectif étant de protéger les assurés et de tenir les engagements des compagnies.

1.3.2 *Best Estimate Liability*

La notion de *Best Estimate Liability* (BEL) ayant été mentionnée précédemment, il convient désormais de le définir.

Le BEL intervient en particulier dans un contexte d'évaluation des réserves techniques d'une compagnie d'assurance ou de réassurance. Il correspond à une estimation réaliste et prudente de son engagement futur envers ses assurés. Son calcul permet notamment de couvrir les différents risques à payer à l'avenir. L'ACPR donne d'ailleurs sa propre définition du BEL comme *"la meilleure estimation des engagements de l'assureur (ou du réassureur) qui est une moyenne pondérée probable des flux futurs de trésorerie actualisés avec la courbe des taux sans risques applicable à la date d'évaluation. Les paramètres de calcul doivent être choisis de manière à refléter la réalité et les hypothèses de calcul nécessitent des justifications actuarielles et statistiques adéquates"* [ACP, 2022].

Afin de mener à bien l'évaluation du BEL, différents paramètres doivent être pris en considération : le type d'assurance ou de réassurance considéré, les caractéristiques du contrat, la probabilité de sinistres, les particularités de l'assuré, le montant du sinistre prévu et le montant de sinistres remboursé.

Différents modèles statistiques et actuariels peuvent être pertinents afin de calculer le BEL. En fonction des juridictions et réglementations appliquées et du type d'assurance ou de réassurance, les modèles peuvent varier. De façon générale, il est pertinent de se référer à des données historiques afin de valider le modèle utilisé dans le but de justifier son emploi, sa pertinence et sa justesse. Seulement ensuite, le calcul du BEL est effectué :

$$BEL = \sum_{t=0}^n \frac{Flux\ sortants\ probables_t - Flux\ entrants\ probables_t}{(1 + r_t)^t} \quad (1.1)$$

Ici, t représente un pas de temps et r_t le taux d'actualisation sans risque choisi par l'EIOPA. La dernière période d'engagement de l'assureur ou du réassureur est représenté par n . D'un côté, les flux sortants comprennent : les sinistres payés, les commissions engagées, les coûts de courtage et les frais de gestion. De l'autre, les flux entrants comprennent toutes les primes souscrites. Puisque ces flux sont estimés, il convient également de les probabiliser et de tenir compte de leur incertitude.

Le calcul du BEL impacte en particulier la solvabilité de la compagnie d'assurance ou de réassurance et ses performances en terme de réponses aux engagements. L'interprétation d'un BEL faible impliquerait des provisions de mêmes tailles et un risque pour la compagnie de se trouver incapable de répondre à ses exigences. A l'inverse, un BEL

élevé impacterait sa rentabilité.

1.3.3 SCR et marge pour risque

D'un autre coté, le *Solvency Capital Requirement* (SCR) est défini par l'ACPR comme "le capital de solvabilité requis et correspondant au niveau des fonds propres que la compagnie d'assurance devra détenir pour limiter sa probabilité de ruine à 0.5% sur un an" [ACP, 2022].

La directive permet aux assureurs et aux réassureurs d'évaluer le capital requis par le biais de modèles internes. Cette solution, même si elle doit être approuvée par des régulateurs, permet aux compagnies de tenir compte des risques correspondant le mieux à leur profil. Une seconde solution est d'opter pour un calcul standardisé du capital requis avec une formule prédéterminée proposée par l'EIOPA :

$$SCR_{combine} = \sqrt{\sum_{i \times j} Corr_{i,j} \times SCR_i \times SCR_j} \quad (1.2)$$

Ici, $\{i, j\}$ sont les différents types de risques couverts par le SCR présentés figure 1.4. Respectivement, les $\{SCR_i, SCR_j\}$ représentent les montants de capital nécessaires pour les différents types de risque. Cette formule permet en particulier d'agréger les différents risques au sein d'une compagnie d'assurance ou de réassurance. Les risques n'étant pas totalement indépendants les uns des autres, il convient alors d'utiliser des matrices de corrélation des risques afin de combiner les SCR. Chaque SCR individuel se calcule comme suit :

$$SCR_i = NAV_0 - NAV_0^R = BEL_0^R - BEL_0 \quad (1.3)$$

Où NAV_0^R mesure la valeur économique au niveau 0.5% en cas de survenance du risque R.

D'après l'article de l'EIOPA [App, 2022], le dérèglement climatique a un impact sur les risques suivants : **de souscription**, **de marché**, **de crédit et contrepartie**, opérationnel, de réputation, de stratégie. Dans le cadre de ce mémoire, les risques étudiés appartiennent principalement aux risques de souscription vie et aux risques de marché.

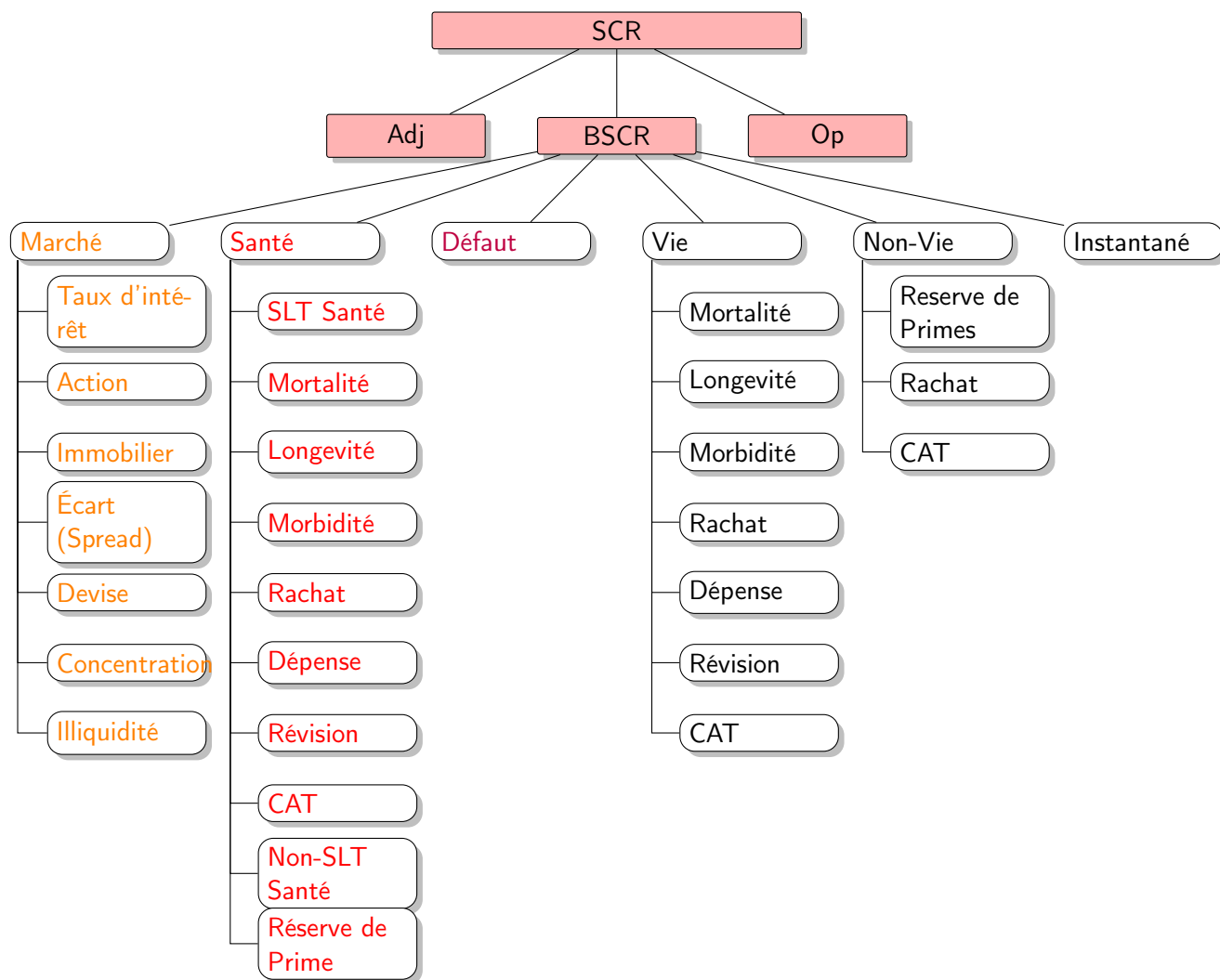


FIGURE 1.4 – Risques dans la formule standard

Après avoir défini le SCR, le *Minimum Capital Requirement* (MCR) se traduit par "*le minimum de montant des fonds propres requis. Dans le cas où la compagnie possède un capital inférieur au montant MCR, une intervention prudentielle aura lieu*" selon l'article de l'ACPR [ACP, 2022].

Enfin, la marge pour risque (MR) est "*équivalente au coût du transfert des engagements de l'assureur (ou du réassureur) à un tiers dans le cas où l'assureur (ou réassureur) fait faillite*" d'après la même source. En particulier, elle se détermine en formule standard avec le *Cost of Capital* (CoC) et le SCR :

$$MR = CoC \times \sum_{t=0}^n \frac{SCR_t}{(1 + r_{t+1})^{t+1}} \quad (1.4)$$

1.3.4 ORSA

L'*Own Risk and Solvency Assessment* (ORSA) est un processus interne que chaque entreprise soumise à Solvabilité II doit mettre en oeuvre dans le but d'identifier ses activités et risques ainsi que dans le but de respecter les exigences en capital. Il s'agit d'un outil d'aide à la décision pour les compagnies d'assurance qui permet d'avoir une vision complète et homogène des risques.

L'ORSA est défini dans l'article [App, 2022] tel un évaluateur du besoin global de solvabilité d'une compagnie, et un évaluateur du respect permanent des obligations réglementaires concernant le SCR, le MCR et les calculs des provisions techniques. Il est également mentionné son rôle d'évaluateur de l'écart entre le profil de risque de l'entreprise et les hypothèses qui sous-tendent le capital solvabilité requis.

En somme, dans un contexte où il est suggéré de mettre en place des indicateurs et des processus d'évaluation de besoin en solvabilité, l'ORSA semble être une solution parfaite, permettant d'identifier le lien étroit entre le niveau de risque nécessaire à une bonne rentabilité et un bon niveau de solvabilité.

1.3.5 Place du dérèglement climatique dans Solvabilité II

Le dérèglement climatique peut avoir un impact significatif sur la solvabilité des entreprises soumises à la réglementation Solvabilité II, qui concerne principalement les assureurs et les réassureurs au sein de l'Union Européenne. Depuis peu, il y a une réelle volonté d'intégrer le dérèglement climatique dans ORSA, sur la base des dernières publications de l'EIOPA [App, 2022]. Il convient néanmoins de souligner que l'EIOPA ne considère pas encore le risque de responsabilité comme un risque en lien avec le dérèglement climatique : c'est le cas uniquement pour certains risques physiques et de transition.

Dans son rapport, l'EIOPA privilégie au moins deux scénarios concernant l'évolution de la température :

- optimiste : une augmentation de la température inférieure à 1.5 degrés (en lien avec l'engagement que souhaite tenir l'Union Européenne),
- pessimiste : une augmentation de la température supérieure à 2 degrés.

En fonction du scénario choisi, les risques impactant la solvabilité et le besoin en capital des compagnies d'assurance et de réassurance sont différents. Après avoir identifié l'un de ces scénarios et éventuellement après avoir complété les données historiques liées à la température, la pensée d'une stratégie robuste et d'une politique de gestion adéquate s'imposent. L'objectif étant de transformer les trajectoires dérèglement climatique en risques réels. Il est essentiel de décomposer l'étude en quatre analyses :

- définition de la zone impactée par le dérèglement climatique,
- recherche des éventuels impacts sur l'entreprise et classification des risques (physique ou de transition),
- analyse qualitative ou quantitative concernant l'actif et le passif de la compagnie,
- intégration des analyses précédentes à l'ORSA et évaluation d'autres scénarios de changement climatiques.

Enfin, l'EIOPA propose plusieurs métriques sur la base desquels l'évaluation des impacts peut être faite (SCR, Loss Ratio, *Sum at risk*, ...).

Chapitre 2

Méthode de modélisation

Le cadre de l'étude ayant été posé, il convient de reconnaître qu'il est nécessaire pour les compagnies d'assurance et de réassurance d'estimer au mieux les taux de mortalité de leurs assurés. Or, le dérèglement climatique est un enjeu majeur pour ces compagnies en raison de son implication sur les risques et les pertes liés aux pics de chaleurs par exemple. Dans ce contexte, l'objectif du présent mémoire est d'intégrer cette condition dans un modèle de calcul de taux de mortalité.

2.1 Présentation des données

Un travail préliminaire consiste à sélectionner différentes régions du portefeuille et de rechercher des bases de données nécessaires à la réalisation de l'étude. Des données de mortalité, mais également de température sont présentées.

2.1.1 Portefeuille de PartnerRe

Tout d'abord, il convient d'analyser attentivement le portefeuille de PartnerRe et ses caractéristiques afin d'identifier les régions et les pays qui seront retenus dans le cadre de cette étude. Une investigation par régions ou par pays est pertinente dans le sens où une population peut varier de façon significative d'une région à une autre (politique, culture, exposition au climat, ...). De cette façon, elles peuvent ne pas avoir la même résistance face au dérèglement climatique.

Traités et caractéristiques

PartnerRe possède une bibliothèque de traités aux caractéristiques différentes. Dans le cadre de ce mémoire, onze variables en particulier sont étudiées :

- numéro d'identité du traité,
- région et pays du traité (*France, Israël, Royaume-Uni, ...*),

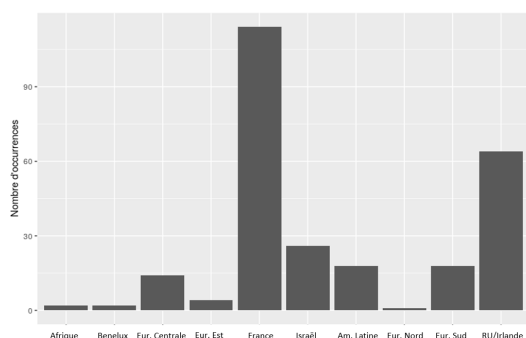


FIGURE 2.2 – Nombre de traités EMELA

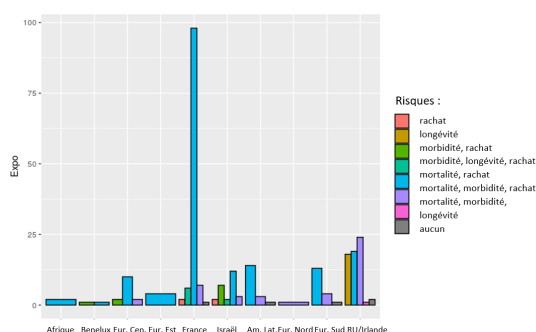


FIGURE 2.3 – Couvertures EMELA

Le Royaume-Uni, la France et Israël ont visiblement le plus d'impact sur le portefeuille (il s'agit en particulier des pays étudiés dans le détail dans la suite de ce mémoire). En connaissance de causes, il est primordial d'apporter une attention particulière aux risques de mortalité, longévité, morbidité et de rachat afin de mettre en place des stratégies appropriées et une politique de gestion de ces risques.

Traités et valeur actuelle probable

Désormais, il convient d'étudier le coût de ces traités et de ces risques pour le portefeuille sur la base d'une seconde base de données interne indiquant pour 2022 : le montant des sinistres par traité et le Best Estimate associé.

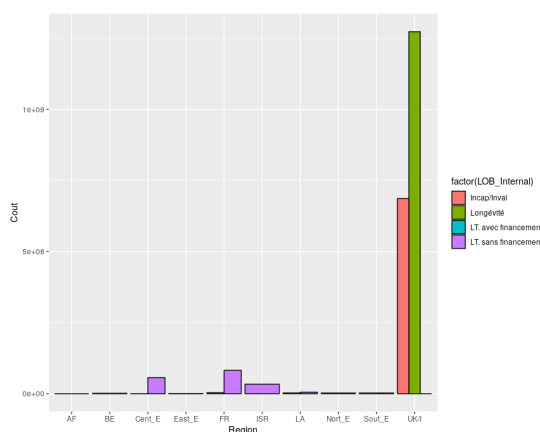


FIGURE 2.4 – BEL EMELA

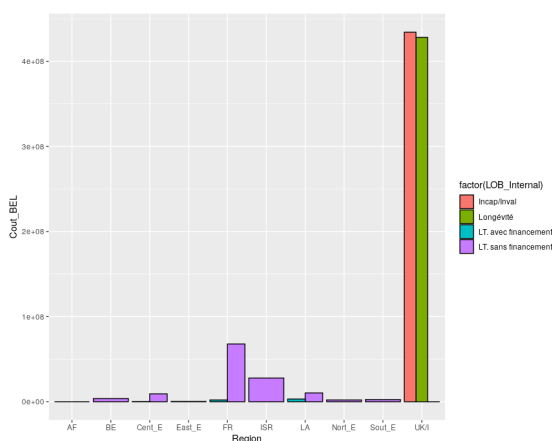


FIGURE 2.5 – VAP de sinistres EMELA

Les régions les plus coûteuses en 2022 sont le Royaume-Uni/Irlande et l'Europe continentale avec les couvertures visant à couvrir les risques de mortalité, de longévité et

d'incapacité/invalidité. Sur la base de cette étude, en valeur de BEL, la région Royaume-Uni/Irlande représente 91.18% du portefeuille, tandis que l'Europe continentale (incluant la France), le Moyen-Orient et l'Amérique latine représentent respectivement 6.60%, 1.56% et 0.36%. En montant de sinistre en revanche, le Royaume-Uni/Irlande représente 86.78% du portefeuille tandis que l'Europe continentale, le Moyen-Orient et l'Amérique latine ont respectivement un poids de 8.00%, 2.80% et 1.35%. En conclusion de cette analyse, les régions retenues dans le cadre de cette étude sont le Royaume-Uni/Irlande, l'Europe continentale, le Moyen-Orient et l'Amérique latine (qui seront plus tard représentés par le Royaume-Uni, la France et Israël).

Exposition aux âges moyens

Il est également important de souligner que le Royaume-Uni, la France et Israël ont des expositions différentes aux âges moyens. En effet, certains produits de réassurance ne sont pas commercialisés dans toutes les parties du globe. Par exemple, les produits couvrant le risque de longévité n'interviennent qu'au Royaume-Uni. Or, ce type de produit est associé à une population d'assurés où la moyenne d'âge est élevée (80 ans). A l'inverse, les produits couvrant le risque de mortalité interviennent au Royaume-Uni, en France et en Israël. Ce type de produit est associé à une population où la moyenne d'âge est de 40 ans. Dans le cadre de ce mémoire, une attention particulière est donc portée aux âges faibles (40 ans) pour la France et Israël, tandis qu'une analyse complète à tous les âges est nécessaire pour le Royaume-Uni.

Royaume-Uni	France	Israël
20-110 ans	20-65 ans	20-65 ans

2.1.2 Données de Mortalité

En accord avec l'analyse précédente, il convient de retenir les données de mortalité relatives aux régions suivantes : Royaume-Uni/Irlande, Europe continentale, Moyen-Orient et Amérique latine. L'objectif étant de parvenir à modéliser les taux de mortalité de ces régions en y intégrant la variable température et de les projeter à horizon 2100.

Human Mortality Database

Human Mortality Database [HMD, 2023] est une plateforme en ligne qui s'auto-définit comme répertoriant des données de mortalité dans des régions développées telles que la France ou le Royaume-Uni.

Pour une étude sur la majorité des régions du portefeuille de PartnerRe, *Human Mortality Database* se révèle pertinente et une poignée de paramètres sont conservés tels que :

- année (noté t),

- âge (noté x),
- taux de mortalité instantané pour un âge donné x et une année t (noté $\mu_{x,t}$),
- probabilité de décès pour un âge x et une année t (noté $q_{x,t}$) où $q_{x,t} = 1 - e^{-\mu_{x,t}}$,
- nombre de décès pour un âge x et une année t pour un échantillon de 100 000 personnes (noté $d_{x,t}$),
- nombre de survivants pour un âge x et une année t (noté $l_{x,t}$) où $l_{x,t} - d_{x,t} = l_{x+1,t}$.

L'avantage de cette base de données est qu'elle est relativement riche et compte des données qui peuvent remonter au XIX_{ieme} siècle. Néanmoins, l'inconvénient est que les données sont référencées annuellement, ce qui ne permet pas de faire une étude mensuelle ou journalière. De plus, des incohérences ont été observées dans la base de données. En effet, pour un échantillon de 100 000 personnes, il arrive que le nombre de morts soit supérieur au nombre de vivants au court d'une même année. L'étude de ce mémoire en tient rigueur.

Office for National Statistics

Office for National Statistics [ONS, 2023] est une plateforme en ligne qui répertorie des données de mortalité au Royaume-Uni uniquement. Les données peuvent révéler un niveau de détail précis puisqu'elles peuvent être mensuelles ou journalières. En revanche, une telle précision implique un historique faible datant de 2006 jusqu'à 2020, soit 180 données mensuelles depuis le 1^e janvier 2006 pour les âges allant de 0 à 110 ans.

Cette base de données est pertinente dans le cadre d'une étude à maille fine au Royaume-Uni, mais ne sera pas appropriée dans le cadre de ce mémoire.

Global Health Data

Global Health Data [Hea, 2023] a été conçue dans un but d'analyse démographique. Il est, d'après le site officiel, "*le catalogue d'enquêtes, de recensements, de statistiques de l'état civil et d'autres données relatives à la santé le plus complet au monde*".

Sous forme de tableau ou de graphique, il est possible d'analyser la tendance depuis plusieurs décennies de la mortalité dans différents pays en fonction des causes de décès. Cette base de données est pertinente dans le cadre de ce mémoire puisqu'elle permet de récupérer des taux de mortalité liés au dérèglement climatique tels que : les problèmes cardio-vasculaires, respiratoires, digestifs, infectieux ou en lien avec les catastrophes naturelles.

De plus, cette base de données permet de distinguer les taux de mortalité par région géographique, par sexe ou par catégorie socio-économique. Les calculs de niveau socio-économiques ("haut", "moyen-haut", "moyen", "moyen faible" et "faible") sont basés sur le niveau d'éducation après 15 ans, le niveau de fécondité avant 25 ans et le revenu par

habitant. Cette dernière distinction est pertinente dans le cadre de ce mémoire puisque différentes études révèlent que les assurés ont tendance à faire partie des groupes socio-économiques élevés. Néanmoins, par extraction des données par groupe socio-économique, l'information démographique n'est plus recensée. De ce fait, il ne s'agit plus uniquement d'une étude du portefeuille EMELA, mais globale.

Cette base de données a néanmoins des inconvénients car pour chaque individu, une unique cause de décès est mentionnée, ce qui diminue l'impact climatique sur la mortalité. Par exemple, le pic de chaleur durant l'été 2003 en France a été source de nombreux décès chez les personnes vulnérables dont certaines malades. Dans ce cas, la cause de décès référencée reste la maladie, bien que le pic de chaleur ait joué un rôle primordial. Il est important de souligner que ce manque de précision peut biaiser l'étude. De plus, les données sont disponibles sur la période 1990-2019 uniquement et pour des bandes d'âge de cinq ans minimum.

2.1.3 Données de températures

En addition aux données de mortalité et afin d'inclure des données de températures dans une modélisation actuarielle, il convient de retenir des données de températures pour les pays appartenant au portefeuille de PartnerRe.

Historic station data - Met Office

Historic station data - Met Office [Met, 2023] est une plateforme en ligne qui répertorie des données de température au Royaume-Uni pour différentes stations météorologiques depuis plusieurs siècles. Les données sont précises et détaillées, c'est à dire qu'elle peuvent remonter jusqu'au *XIX^e* siècle et de façon mensuelle.

Bien que d'autres paramètres soient indiqués tels que l'intensité des pluies et le nombre d'heures ensoleillées, l'inconvénient de cette base de données est qu'elle recense uniquement les températures extrêmes (minimums et maximums) sur la période étudiée. Elle ne sera donc pas suffisante dans le cadre de cette étude.

Global climat

La plateforme en ligne *Global Climat* [Glo, 2023] répertorie les températures sous forme de graphiques pour différents pays tels que la France ou le Royaume-Uni. Les données annuelles de températures représentent les anomalies par rapport à la moyenne entre 1981 et 2010 et permettent de visualiser l'évolution de la température depuis le *XIX^e* siècle.

Pour chaque pays pour lequel est affiché l'historique de température annuelle, une source est mentionnée :

- France : Infoclimat, à partir des données de Météo France [MF, 2023]
- Royaume-Uni : Met Office [Met, 2023], le service national britannique de météorologie

Données Mondiales

La plateforme *Données Mondiales* [Don, 2023] en ligne permet quant à elle de comparer les températures des pays entre elles sur un an. D'autres paramètres tels que l'humidité de l'air, le nombre de jours de pluie par mois ou les heures d'ensoleillement peuvent également être observés.

Bien qu'une étude mensuelle soit réalisable avec cette plateforme, elle reste peu pertinente dans le cadre de ce mémoire du fait de sa plage de données trop faible (sur un an).

National Centers for environmental information

Enfin, la plateforme en ligne *National Centers for Environmental Information* [Cli, 2023] recense les données de climats pour différentes locations pour différentes bandes de temps (annuelle, mensuelles, hebdomadaire). Il est également possible de spécifier le type de température recherché telle que la température minimale, maximale ou moyenne.

Ces bases de données sont retenues dans le cadre de ce mémoire à compter du 1^e janvier 1990 pour les stations météorologiques suivantes :

- Londres,
- Paris,
- Tel-Aviv.

Prédictions du GIEC

Recensées sur le site officiel du *Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat* (GIEC) et du Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires [Min, 2023], il est possible d'analyser les courbes de scénarios et projections climatiques de la Terre entre 1850 et 2100. Cette base de données détaille l'évolution de la température selon cinq scénarios différents prévoyant d'ici 2100 une augmentation variant de 1.4 degrés à 4.4 degrés. Dans ce contexte, le premier scénario est optimiste avec des prédictions de 1.4°C en lien avec les engagements de l'Union Européenne. Les deuxième, troisième et quatrième scénarios indiquent respectivement une augmentation de 1.8°C, 2.7°C, 3.6°C et le dernier scénario des plus pessimistes est de 4.4°C

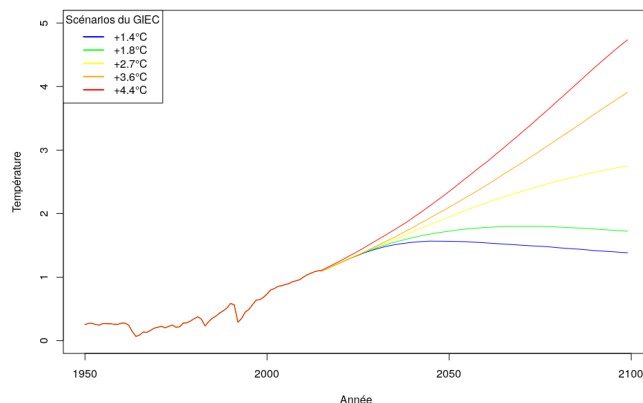


FIGURE 2.6 – Prédictions du GIEC à horizon 2100

L'inconvénient de ces données est l'hypothèse forte que le dérèglement climatique aura un impact et un effet identique sur toutes les régions du monde. Il est important de prendre du recul sur cette hypothèse.

2.2 Histoire de la modélisation de la mortalité et théorie d'estimation

Au *XVII^{ème}* siècle, des ouvrages commencent à recenser l'utilité d'ordre militaire, sanitaire, actuariel ou théologique des tables de mortalité. Trois sujets en particulier sont d'actualité : la mortalité, la fécondité et la nuptialité. Néanmoins un manque de données pousse le londonien M. Graunt à manifester pour que le nombre "*d'habitants de chaque sexe, chaque position, chaque âge, chaque religion, chaque métier, chaque rang et chaque degré*" [BEHAR, 1976] soit recensé afin de limiter le manque de recul et de critiques face à ces données. Finalement, il décide de mettre au point des méthodes d'analyse statistique et de recensement et invente lui-même la première table de mortalité de la capitale de l'Angleterre.

Une table de mortalité est un outil statistique utilisé en démographie et en actuariat pour représenter les taux de mortalité d'une population donnée. Elle fournit des informations sur la probabilité de décès à différents âges pour une cohorte de personnes. Enfin, elle est généralement construite à partir de données démographiques historiques afin de se rapprocher au mieux de la réalité.

Par ailleurs, avec le temps, il devient évident que la mortalité est inégale d'une région à l'autre. C'est pourquoi les démographes, actuaires et chercheurs en médecine tentent de modéliser la mortalité de façon théorique et adaptée aux données observées dans chacun de leurs pays respectifs [FALL, 2021] :

- En 1725, Abraham DE MOIVRE rédige "*Annuities upon lives : or, the valuation of annuities upon any number of lives ; as also, of reversions*" [MOIVRE, 1725] dans lequel il propose une première expression du taux de mortalité. Ce modèle suppose une mortalité uniforme par âge.
- En 1820, Benjamin GOMPERTZ communique à la *Royal Society of London for the Improvement of Natural Knowledge* sa croyance quant au fait que "*la force de mortalité augmente de façon exponentielle avec l'âge*" tel que :

$$\mu_x = \alpha e^{\beta x} \quad (2.1)$$

où α mesure le niveau général de mortalité et β capture le taux de vieillissement.

- En 1867, William MAKEHAM ajuste le modèle GOMPERTZ pour le renommer GOMPERTZ-MAKEHAM après y avoir ajouté une constante représentant les causes de décès indépendantes de l'âge. Il obtient de cette façon :

$$\mu_x = \alpha e^{\beta x} + \delta \quad (2.2)$$

où δ représente les causes de décès indépendantes de l'âge x .

- En 1871, Thorvald THIELE propose de modéliser la mortalité sous la forme :

$$\mu_x = \alpha_1 e^{-\beta_1 x} + \alpha_2 e^{-\frac{1}{2}\beta_2(x-C)^2} + \alpha_3 e^{\beta_3 x} \quad (2.3)$$

- En 1980, HELIGMAN et POLLARD introduisent la notion de séries temporelles dans la modélisation de la mortalité. Le modèle s'exprime comme :

$$\frac{q_x}{1 - q_x} = A^{(x+B)^C} + D e^{-E(\log(x) - \log(F))^2} + G H^x \quad (2.4)$$

où pour A, B, C, D, E, F, G, H des constantes, $A^{(x+B)^C}$ représente la mortalité aux âges faibles, $D e^{-E(\log(x) - \log(F))^2}$ la mortalité au court de la vie et $G H^x$ la mortalité aux âges élevés.

2.2.1 Modèle de Lee-Carter

Le modèle de Lee-Carter est introduit par Ronald LEE et Lawrence CARTER en 1992. Il s'agit d'un modèle stochastique multiplicatif de mortalité très répandu qui relève d'une grande simplicité. En observant des taux de mortalité instantanés historiques, le modèle parvient à saisir une tendance par âge et par année qu'il attribue à des vecteurs.

$$\ln(\mu_{x,t}) = \alpha_x + \beta_x \kappa_t + \epsilon_{x,t} \quad (2.5)$$

- $\mu_{x,t}$: le taux de mortalité instantané à l'âge x et l'année t ,
- α_x : la forme générale de la mortalité par âge, aussi la valeur moyenne de $\ln(\mu_{x,t})$ au cours du temps,
- β_x : la sensibilité de la mortalité par âge par rapport à κ_t ,
- κ_t : la dynamique temporelle décrivant l'évolution générale de la mortalité,
- $\epsilon_{x,t}$: le paramètre aléatoire non capturé par le modèle (supposé suivre une loi normale centrée).

L'expression de taux logarithmiques " $\ln(\mu_{x,t})$ " se justifie par la volonté de déterminer des taux de mortalité instantanés positifs. De plus, cela permet de réduire l'hétéroscédasticité des taux observés en compressant les valeurs élevées des résidus.

Ce modèle vise à décrire les mouvements de la mortalité d'une population en fonction de son âge et de l'année considérée. Dans un premier temps, un profil standard α_x est déterminé auquel s'ajoute l'interaction de β_x et κ_t qui le modifie. Lorsque κ_t diminue de manière linéaire, chaque taux de mortalité instantané spécifique à l'âge diminue de façon exponentielle. Cela s'interprète comme une amélioration du niveau de vie au fil des années. À l'opposé, lorsque β_x augmente de manière linéaire, chaque taux de mortalité instantané spécifique à l'année augmente. Cela s'interprète comme une diminution du niveau de vie au fil des âges.

Afin d'estimer les paramètres $(\alpha_x, \beta_x, \kappa_t)$, il suffit de résoudre la minimisation sous contraintes :

$$\operatorname{argmin} \sum_{x=x_{\min}}^{x_{\max}} \sum_{t=t_{\min}}^{t_{\max}} (\ln(\mu_{x,t}) - \alpha_x - \beta_x \kappa_t)^2 \quad (2.6)$$

Le modèle de Lee-Carter est dit "sous-déterminé", c'est-à-dire qu'une solution unique n'existe pas : soit $(\alpha_x, \beta_x, \kappa_t)$ une solution de l'équation, $\forall c \in \mathbb{R}^+$, $(\alpha_x, \beta_x c, \frac{\kappa_t}{c})$ et $(\alpha_x \beta_x c, \beta_x, \kappa_t + c)$ sont également des solutions. Afin de contrer ces invariances, il convient de poser :

$$\sum_{x=x_{\min}}^{x_{\max}} \beta_x = 1, \quad \sum_{t=t_{\min}}^{t_{\max}} \kappa_t = 0 \quad (2.7)$$

Un premier calcul renvoie l'estimateur $\hat{\alpha}_x$ de α_x :

$$\hat{\alpha}_x = \frac{1}{t_{\max} - t_{\min} + 1} \sum_{t=t_{\min}}^{t_{\max}} \ln(\mu_{x,t}) \quad (2.8)$$

Un second calcul mène à la matrice $Z = (z_{x,t})$ définie telle que $z_{x,t} = \ln(\mu_{x,t}) - \hat{\alpha}_x$. La matrice est proche du produit de vecteurs $\hat{\beta}_x \hat{\kappa}_t^t$, ainsi :

$$\hat{\beta}_x = \frac{v_1}{\sum_j v_{1j}} , \quad \hat{\kappa}_t = \sqrt{\lambda_1} \left(\sum_j v_{1j} \right) u_1^t \quad (2.9)$$

Enfin, il est possible d'ajuster le paramètre $\hat{\kappa}_t$ par descente de gradient comme expliqué dans le syllabus de Franck Vermet [VERMET, 2023] en posant l'équation $F(\kappa) = 0$:

$$F(\kappa) = \sum_{x=x_{min}}^{x_{max}} (L_{x,t} e^{\hat{\alpha}_x + \hat{\beta}_x \kappa} - D_{x,t}^{obs}) \quad (2.10)$$

où $\sum_{x=x_{min}}^{x_{max}} D_{x,t}^{obs} = \sum_{x=x_{min}}^{x_{max}} L_{x,t} e^{\hat{\alpha}_x + \hat{\beta}_x \hat{\kappa}_t}$ avec $D_{x,t}$ le nombre de décès et $L_{x,t}$ l'exposition au risque.

La descente de gradient est couramment utilisée dans le domaine du *machine learning* pour entraîner des modèles. L'idée est d'exploiter le rapport entre la valeur de la fonction et sa dérivée afin de se rapprocher progressivement d'un minimum global ou local. En effet, si la dérivée partielle indique un extremum local, ce rapport indique un minimum en étant proche de zéro et un maximum en étant proche de l'infini. Par des itérations successives, les paramètres sont mis à jour jusqu'à convergence, si elle existe : $\kappa_{i+1} = \kappa_i - \frac{F(\kappa_i)}{F'(\kappa_i)}$. Le nouvel estimateur est noté $\hat{\kappa}_t$.

Enfin, afin de respecter les contraintes initiales, les estimateurs de κ_t et de α_x deviennent respectivement :

$$\kappa_t^* = \hat{\kappa}_t - \frac{1}{t_{max} - t_{min} + 1} \sum_{t=t_{min}}^{t_{max}} \hat{\kappa}_t , \quad \alpha_x^* = \hat{\alpha}_x - \frac{\hat{\beta}_x}{t_{max} - t_{min} + 1} \sum_{t=t_{min}}^{t_{max}} \hat{\kappa}_t \quad (2.11)$$

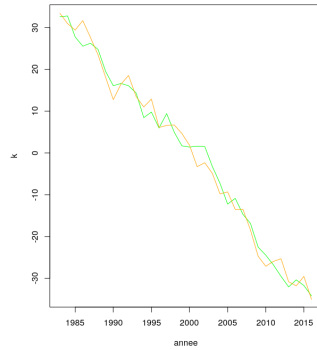


FIGURE 2.7 – Lee-Carter - κ_t ajusté et κ_t non ajusté

Différents outils sur R ont été développés afin de faciliter la modélisation de Lee-Carter tels que les packages "demography" et "StMoMo". Dans ce mémoire, il est important de souligner que les codes R ont été entièrement réalisés manuellement afin d'ajouter des variables au modèle. Cela facilite également sa compréhension.

2.2.2 Modèle de Plat

Bien que le modèle de Lee-Carter soit un modèle mathématique et actuariel largement utilisé, des extensions sont apparues depuis sa création en 1992 afin de composer avec ses limites.

A titre d'illustration, le modèle de Lee-Carter peut se trouver fortement affecté par des valeurs extrêmes de données historiques. Il ne prend pas non plus en compte les facteurs socio-économiques pouvant influencer le taux de mortalité. Par exemple, la variation des comportements de santé en fonction des classes peut avoir un impact significatif. Mais encore, le modèle est critiqué pour l'absence d'un facteur de cohorte (indicateur d'une caractéristique commune partagée par les membres d'une population). Ces limites peuvent influencer l'ajustement du modèle et il est primordial de ne pas rejeter de nouvelles approches de modélisation.

En 2006, Arthur RENSHAW et Peter HABERMAN intègrent un facteur de cohorte au modèle de Lee-Carter afin d'obtenir le modèle suivant :

$$\ln(\mu_{x,t}) = \alpha_x + \beta_x^{(1)} \kappa_t^{(1)} + \beta_x^{(0)} \gamma_{t-x} + \epsilon_{x,t} \quad (2.12)$$

où γ_{t-x} représente l'effet de cohorte qui est fonction de l'année de naissance $t - x$. Néanmoins, le paramètre de cohorte s'avère manquer de robustesse et n'être significatif que pour les âges élevés. Le modèle Age-Period-Cohort permet plus tard de contrebalancer l'instabilité de ce modèle par la proposition :

$$\ln(\mu_{x,t}) = \alpha_x + \kappa_t^{(1)} + \gamma_{t-x} + \epsilon_{x,t} \quad (2.13)$$

C'est en 2008 qu'intervient le modèle de Plat avec l'expression suivante :

$$\ln(\mu_{x,t}) = \alpha_x + \kappa_t^{(1)} + \kappa_t^{(2)}(\bar{x} - x) + \kappa_t^{(3)}(\bar{x} - x)^+ + \gamma_{t-x} + \epsilon_{x,t} \quad (2.14)$$

Quelques paramètres supplémentaires au modèle de Lee-Carter sont observables, ajoutant ainsi à la complexité du modèle :

- $\mu_{x,t}$: le taux de mortalité instantané à l'âge x et l'année t ,
- α_x : la forme générale de la mortalité par âge, aussi la valeur moyenne de $\ln(\mu_{x,t})$ au cours du temps,
- $\kappa_t^{(1)}$: la dynamique temporelle décrivant l'évolution générale de la mortalité,
- $\kappa_t^{(2)}$: la dynamique temporelle associée aux taux d'amélioration de la mortalité,

- $\bar{x}$: la moyenne des âges x ,
- $\kappa_t^{(3)}$: la dynamique temporelle décrivant l'évolution générale de la mortalité aux âges faibles,
- $(\bar{x} - x)^+$: le maximum entre 0 et $(\bar{x} - x)$,
- γ_{t-x} : le facteur cohorte permettant d'étudier les spécificités d'un groupe particulier,
- $\epsilon_{x,t}$: les résidus.

Chaque paramètre du modèle peut être calculé avec les contraintes suivantes :

$$\forall i \in \{1, 3\}, \sum_t \kappa_t^{(i)} = 0, \quad \forall j \in \{0, 2\}, \sum_{c=t_1-x_k}^{t_n-x_1} c^j \gamma_c = 0 \quad (2.15)$$

Dans le cadre de ce mémoire, le *package* "StMoMo" [P. MILLOSOVICH et KAISHEV, 2022] est utilisé pour la détermination des paramètres de ce modèle et du suivant puisqu'y sont intégrées diverse fonctions d'ajustement des modèles stochastiques de mortalités.

2.2.3 Modèle de SPO

Le modèle de SPO de Malgorzata SEKLECKA, Athanasios A. PANTELOUS et Colin O'HARE est un dérivé du modèle de PLAT pensé en 2015 qui consiste à rajouter un paramètre de corrélation entre le taux de mortalité et la température. Il est l'un des premiers modèles dérivés de Lee-Carter à prendre en compte la température grâce à son facteur de corrélation exprimé en fonction de l'âge :

$$\ln(\mu_{x,t}) = \alpha_x + \kappa_t^{(1)} + \kappa_t^{(2)}(\bar{x} - x) + \kappa_t^{(3)}(\bar{x} - x)^+ + \kappa_t^{(4)}[(a - x)^+ + c_x(x - a)^+]^2 + \gamma_{t-x} + \epsilon_{x,t} \quad (2.16)$$

- $\mu_{x,t}$: le taux de mortalité instantané à l'âge x et l'année t ,
- α_x : la forme générale de la mortalité par âge, aussi la valeur moyenne de $\ln(\mu_{x,t})$ au cours du temps,
- $\kappa_t^{(1)}$: la dynamique temporelle décrivant l'évolution générale de la mortalité,
- $\kappa_t^{(2)}$: la dynamique temporelle associée aux taux d'amélioration de la mortalité,
- $\bar{x}$: la moyenne des âges x ,
- $\kappa_t^{(3)}$: la dynamique temporelle décrivant l'évolution générale de la mortalité aux âges faibles,
- $(\bar{x} - x)^+$: le maximum entre 0 et $(\bar{x} - x)$,
- $\kappa_t^{(4)}$: la dynamique temporelle décrivant l'évolution générale de la mortalité en corrélation avec la température,
- a : l'âge à partir duquel la température a un impact sur la mortalité,
- c_x : la corrélation entre le taux de mortalité instantané et la température en fonction de l'âge x , basée sur l'historique des données,
- γ_{t-x} : le facteur cohorte permettant d'étudier les spécificités d'un groupe particulier,

— $\epsilon_{x,t}$: les résidus.

Comme pour le modèle précédent, chaque paramètre du modèle est calculé avec les contraintes suivantes à l'aide du *package* "StMoMo" :

$$\forall i \in \{1, 4\}, \sum_t \kappa_t^{(i)} = 0, \quad \forall j \in \{0, 2\}, \sum_{c=t_1-x_k}^{t_n-x_1} c^j \gamma_c = 0 \quad (2.17)$$

En accord avec "Mortality Effects of Temperature Changes in the United Kingdom" [M. SEKLECKA et C.O'HARE, 2015], les paramètres du modèle sont estimés par maximisation de la fonction de log-vraisemblance :

$$L(\varphi; D, E) = \sum_{x,t} \{D_{x,t} \ln[E_{x,t} \mu_{x,t}(\varphi)] - E_{x,t} \mu_{x,t}(\varphi) - \ln[D_{x,t}]\} \quad (2.18)$$

où $D_{x,t}$ est le nombre de décès et $E_{x,t}$ l'exposition au risque. Il est alors supposé que $D_{x,t} \sim \text{Poisson}(E_{x,t} \mu_{x,t})$.

2.2.4 Modèle de Lee-Carter par cause de décès

Un nouveau modèle dérivé de Lee-Carter est présenté en 2020 par V. GERMAIN [GERMAIN, 2022] :

$$\ln(\mu_{x,t}) = \alpha_x + \beta_x \kappa_t + \delta_x C_t + \epsilon_{x,t} \quad (2.19)$$

- $\mu_{x,t}$: le taux de mortalité instantané à l'âge x et l'année t ,
- α_x : la forme générale de la mortalité par âge, aussi la valeur moyenne de $\ln(\mu_{x,t})$ au cours du temps,
- β_x : la sensibilité de la mortalité par âge par rapport à κ_t ,
- κ_t : la dynamique temporelle décrivant l'évolution générale de la mortalité,
- δ_x : la sensibilité de la mortalité par âge par rapport à C_t ,
- C_t : la transformation d'une combinaison de variables climatiques telles que les températures minimales, les températures maximales ou la durée d'ensoleillement,
- $\epsilon_{x,t}$: le paramètre aléatoire non capturé par le modèle (supposé suivre une loi normale centrée).

Pour construire ce modèle, il convient tout d'abord de se focaliser sur une table de mortalité associée à la cause climatique. L'idée est de "*répliquer les taux de mortalité de la cause climatique à partir des variables climatiques*" auxquelles peuvent être ajoutés des effets de rattrapage permettant de "*contrôler l'excès soudain de décès dus à un pic de chaleur*" [GERMAIN, 2022]. Ce travail préliminaire est effectué sur trois tranches d'âges : 0–24, 25–64, 65+ et sur une population prédéfinie impactée par le dérèglement climatique. Dans un second temps, les taux de décès associés à la cause climatique sont intégrés à la mortalité toute cause sur une population globale. Ce concept a été une source d'inspiration dans le cadre de ce mémoire et présente de grandes similitudes avec le modèle proposé dans la partie 2.2.5.

2.2.5 Modèle Lee-Carter température

Étudier l'impact de la température sur les tables de mortalité peut suggérer le fait d'intégrer une variable de température dans un modèle existant. Dans la présente partie est proposée une adaptation du modèle de Lee-Carter ayant émergée dans le cadre d'une recherche et d'une analyse visant à explorer les relations entre la température et la mortalité. Cette adaptation s'inspire du modèle de Lee-Carter par causes de décès présenté en partie 2.2.4 et a pour but de renforcer les prédictions des tendances de mortalité.

$$\ln(\mu_{x,t}) = \alpha_x + \delta_x T_t + \beta_x \kappa_t + \epsilon_{x,t} \quad (2.20)$$

- $\mu_{x,t}$: le taux de mortalité instantané à l'âge x et l'année t ,
- α_x : la forme générale de la mortalité par âge, aussi la valeur moyenne de $\ln(\mu_{x,t})$ au cours du temps,
- δ_x : la sensibilité de la mortalité par âge par rapport à T_t ,
- T_t : la température par année,
- β_x : la sensibilité de la mortalité par âge par rapport à κ_t ,
- κ_t : la dynamique temporelle décrivant l'évolution générale de la mortalité,
- $\epsilon_{x,t}$: le paramètre aléatoire non capturé par le modèle (supposé suivre une loi normale centrée).

Bien que de nombreux paramètres soient analogues, ce modèle se distingue du modèle de Lee-Carter par cause de décès par la composante T_t sur laquelle n'est effectué aucun travail préliminaire, contrairement à C_t . Néanmoins, une attention particulière est portée sur le facteur multiplicatif δ_x et sa détermination.

Dans un premier temps, une étude est effectuée sur une population cible sur la base de laquelle sont déterminés deux paramètres : $\alpha_x^{(1)}$, δ_x . Dans un second temps, une étude est effectuée sur une population plus large sur la base de laquelle sont déterminés les autres paramètres du modèle : α_x , β_x , κ_t et $\epsilon_{x,t}$.

Population cible

Tout d'abord, il convient de se tourner vers une population restreinte basée sur les causes de décès en lien avec l'évolution de la température. Sur cette population, la température est le facteur majeur influençant la mortalité et les autres facteurs sont supposés négligeables. Par exemple, sous des hypothèses fortes de corrélation exclusive entre la température et des conditions météorologiques extrêmes, cette cause de décès pourrait être retenue.

Dans ce contexte, les taux de mortalité de la population restreinte peuvent s'exprimer comme :

$$\ln(\mu_{x,t}^{(1)}) = \alpha_x^{(1)} + \delta_x T_t + \epsilon_{x,t} \quad (2.21)$$

- $\ln(\mu_{x,t}^{(1)})$: le taux de mortalité instantané de la population restreinte,
- $\alpha_x^{(1)}$: la forme générale de la mortalité associée à la population restreinte,
- δ_x : la sensibilité de la mortalité par rapport à T_t ,
- T_t : la température par année centrée,
- $\epsilon_{x,t}$: les résidus.

Au préalable, un travail sur la température est effectué, visant à la centrer :

$$T_t = \text{temperatures}_t - \text{moyenne des temperatures}_t \quad (2.22)$$

L'équation se résout ensuite sous contraintes ($\sum_x \delta_x = 1$ et $\sum_t T_t = 0$) par la méthode des moindres carrés :

$$\hat{\delta}_x = \frac{\sum_x (\ln(\mu_{x,t}^{(1)}) - \hat{\alpha}_x^{(1)}) T_t}{\sum_t T_t^2} \quad (2.23)$$

Dans un contexte de hausse des températures, un signe positif de δ_x indique une augmentation du taux de mortalité. Cela suggère une corrélation positive entre la température et le risque de décès. A l'inverse, un δ_x négatif indique une diminution du taux de mortalité avec une augmentation de la température.

Population globale

Il convient désormais de s'attarder sur la population globale à laquelle est intégrée les paramètres δ_x et T_t étudiés dans la section précédente.

Il a été supposé que les taux de décès de la population restreinte sont exclusivement liés à la température. Or les causes de décès sélectionnées ne représentent qu'une petite partie de l'ensemble des maladies et causes de décès. Ainsi en intégrant les paramètres dans un ordre précis, il est possible de déterminer le taux de mortalité global en fonction de la température et des autres causes de décès.

$$\ln(\mu_{x,t}) = \alpha_x + \delta_t T_t + \beta_x \kappa_t + \epsilon_{x,t} \quad (2.24)$$

Détermination de α_x

Un premier calcul renvoie sous les contraintes $\sum_{t=t_{min}}^{t_{max}} \kappa_t = 0$ et $\sum_{t=t_{min}}^{t_{max}} T_t = 0$:

$$\hat{\alpha}_x = \frac{1}{t_{max} - t_{min} + 1} \sum_{t=t_{min}}^{t_{max}} \ln(\mu_{x,t}) \quad (2.25)$$

Détermination de β_x et κ_t

Un deuxième calcul permet de déterminer β_x et κ_t à partir de la matrice $Z = (z_{x,t})$ définie par $z_{x,t} = \ln(\mu_{x,t}) - \hat{\alpha}_x - \delta_x T_t$.

$$\hat{\beta}_x = \frac{v_1}{\sum_j v_{1j}} \text{ et } \hat{\kappa}_t = \sqrt{\lambda_1} \left(\sum_j v_{1j} \right) u_1^t \quad (2.26)$$

Ajustement des paramètres

Enfin, le modèle de Lee-Carter température est ajusté par descente de gradient en posant l'équation $F(\kappa) = 0$:

$$F(\kappa) = \sum_{x=x_{min}}^{x_{max}} (L_{x,t} e^{\hat{\alpha}_x + \hat{\beta}_x \kappa + \hat{\delta}_x T_t} - D_{x,t}^{obs}) \quad (2.27)$$

où $\sum_{x=x_{min}}^{x_{max}} D_{x,t}^{obs} = \sum_{x=x_{min}}^{x_{max}} L_{x,t} e^{\hat{\alpha}_x + \hat{\beta}_x \hat{\kappa}_t + \hat{\delta}_x T_t}$.

2.2.6 Réseaux de neurones

D'un autre côté, une approche de modélisation des taux de mortalité consiste à employer des réseaux de neurones.

Réseau de neurones standard

Les réseaux de neurones ou méthodes connexionnistes sont également une alternative dans le but de modéliser les taux de mortalité. Il s'agit d'une approche d'apprentissage dont les premières réflexions majeures datent du *XIX^e* siècle basée sur le même fonctionnement que le cerveau humain : le réseau de neurones apprend à partir d'un historique de données.

L'idée est que le réseau de neurones est constitué de différentes couches de "neurones inter-connectés" [VERMET, 2023] qui traitent une information avant de la transmettre à la suivante. Le poids et les biais de connexions (conditions de sortie) entre les neurones sont ajustés durant la phase d'apprentissage du modèle afin de fournir des prédictions précises sur de nouvelles données.

Les réseaux neuronaux fournissent des modèles qui ont récemment connu un grand succès dans des tâches complexes d'apprentissage automatique. Ils construisent automatiquement, couche par couche, de nouveaux ensembles de caractéristiques à partir des données d'entrée pour effectuer des prédictions optimales des variables cibles.

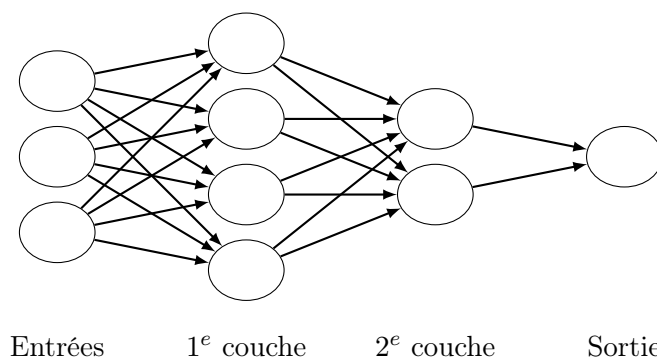


FIGURE 2.8 – Réseau de neurones

Dans le cadre d'une étude de l'impact du dérèglement climatique sur la modélisation de taux de mortalité, les variables d'entrée peuvent par exemple être les suivantes : des données de température et de niveau d'ensoleillement, d'autres données de taux de mortalité. Les couches cachées capturent ensuite les relations entre le dérèglement climatique et les taux de mortalité.

Réseau de neurones LSTM

En 2022 paraît une étude intitulée *Modelling mortality risk of climate change* [A. CHAUDHRY et TANG, 2022] sur le réseau de neurones LSTM afin de corréliser le taux de mortalité avec l'âge, la date ainsi que des variables climatiques telles que la température, l'humidité, le vent ou l'intensité solaire.

A la différence des réseaux de neurones présentés précédemment, les réseaux LSTM sont équipés d'une cellule de "mémoire" qui stocke et libère des informations à long terme grâce à un système de sous-réseaux appelés "porte". Les réseaux LSTM ont montré d'excellentes performances dans différentes applications impliquant le traitement de données séquentielles, telles que la reconnaissance de l'écriture manuscrite et la reconnaissance vocale. Les auteurs ont proposé d'insérer un sous-réseau supplémentaire, appelé "porte d'oubli", qui efface les informations obsolètes dans la cellule de mémoire.

Le réseau de neurones LSTM apprend ainsi une relation entre la mortalité et les variables implémentées afin de présenter un modèle robuste.

2.2.7 Prédictions

Dans le cadre de ce mémoire, quatre modèles différents de taux de mortalité sont étudiés séparément et sont projetés à horizon 2099. Afin d'effectuer cette projection, il convient d'identifier leurs paramètres dépendants du temps.

Modèle	temps	temps et âge	âge
Lee-Carter	κ_t		α_x et β_x
Plat	$\kappa_t^{(1)}, \kappa_t^{(2)}, \kappa_t^{(3)}$	γ_{t-x}	$\alpha_x, (\bar{x} - x), (\bar{x} - x)^+$
SPO	$\kappa_t^{(1)}, \kappa_t^{(2)}, \kappa_t^{(3)}, \kappa_t^{(4)}$	γ_{t-x}	$\alpha_x, (\bar{x} - x), (\bar{x} - x)^+$ et $[(a - x)^+ + c_x(x - a)^+]^2$
Lee-Carter température	κ_t, T_t		α_x, β_x et δ_x

Prédictions des κ_t

$\forall i \in \{1, 4\}$, les $\kappa_t^{(i)}$ sont des dynamiques temporelles continues. Dans ce sens, il est admis que les κ_t peuvent être définies comme des séries temporelles de type ARIMA à plusieurs composantes : tendance, saisonnalité, résidus en accord avec le syllabus du cours "séries temporelles" [AILLIOT, 2022]. La méthode de détermination des paramètres du processus ARIMA n'est pas détaillée dans le cadre de ce mémoire et la prédiction des $\kappa_t^{(i)}$ s'appuie sur le *package* "forecast" de R. Le modèle ARIMA est couramment utilisé en statistiques et en séries temporelles et les prédictions prennent en compte les incertitudes du modèle. En particulier, un processus de série temporelle est dit "de type ARIMA (p,d,q)" où les paramètres p, d et q sont respectivement :

- la composante auto-regressive,
- la composante d'intégration,
- la moyenne mobile du processus.

Prédictions de T_t

Les prédictions de températures sont obtenues à partir des données publiques du GIEC évoquées en partie 2.1.3. Ces données recensent cinq scénarios quant à l'évolution de la température à horizon 2099.

Scénario 1	+1.4°C
Scénario 2	+1.8°C
Scénario 3	+2.7°C
Scénario 4	+3.6°C
Scénario 5	+4.4°C

Prédictions des γ_{t-x}

Le paramètre γ_{t-x} apparaît pour les modèles de Plat et SPO. Grâce au *package* "StMoMo" évoqué précédemment, γ_{t-x} se présente sous forme de matrice dont les lignes sont les âges et dont les colonnes sont les années. Ligne par ligne, les données γ_t sont alors projetées grâce au *package* "forecast" à horizon 2099.

2.2.8 Fermetures de tables

Comme indiqué dans l'ouvrage "Modélisation statistique des phénomènes de durée" [PLANCHET et THEROND, 2011], les taux de mortalité aux grands âges s'avèrent être instables en raison de la taille restreinte des échantillons à disposition. En effet, la population étant de 100000 personnes initialement, elle se retrouve amoindrie de façon significative aux grands âges. L'estimation des taux de mortalité n'est donc possible en pratique que jusqu'à un certain âge.

Afin de palier à cette volatilité, la méthode retenue est celle de COALE et KISKER datant de 1990. Cette méthode d'estimation consiste à extrapoler les taux de mortalité à partir d'un âge choisi (ici 80 ans) jusqu'à l'âge maximum atteint par les assurés. La formule proposée et retenue pour l'extrapolation des taux de mortalité est la suivante :

$$\forall x \geq 80, \hat{\mu}_x = \hat{\mu}_{x-1} e^{g_{80} + s(x-80)} \quad (2.28)$$

où $s = -\frac{\ln(\hat{\mu}_{79} + 31g_{80})}{465}$ et $g_{80} = \frac{1}{80} \ln\left(\frac{\hat{\mu}_{80}}{\hat{\mu}_{65}}\right)$ avec g_x le taux moyen de croissance du taux de mortalité entre 65 ans et l'âge x .

Cette méthode de fermeture de table est en particulier utilisée lors des prédictions des taux de mortalité à horizon 2099 dans le cadre de ce mémoire.

2.3 Validation du modèle

Différents modèles ayant été présentés, il convient de s'assurer de leur robustesse. Dans ce sens, des tests statistiques connus sont effectués ainsi qu'une étude de cohérence.

2.3.1 Tests statistiques

Différents tests statistiques tirés du mémoire sur les "Tables de mortalité prospectives" [CHOU, 2018] ont été réalisés dans le cadre de ce mémoire dans le but de comparer le modèle Lee-Carter température aux autres modèles évoqués.

Dans les équations suivantes, $\mu_{x,t}$ désigne un taux de mortalité instantané observé pour un âge x et une année t , $q_{x,t}$ une probabilité de décès pour un âge x et une année t tel que $\mu_{x,t} = -\ln(1 - q_{x,t})$, $D_{x,t}$ un nombre de décès et $E_{x,t}$ une exposition au risque. $\hat{\mu}_{x,t}$, $\hat{q}_{x,t}$, $\hat{D}_{x,t}$ et $\hat{E}_{x,t}$ se définissent comme leurs estimateurs respectifs.

D'abord, il convient de définir l'erreur d'estimation d'un modèle qui permet d'avoir une idée de l'écart entre le modèle et les observations :

$$Er = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{x,t} (\log(\hat{\mu}_{x,t}) - \log(\mu_{x,t}))^2} \quad (2.29)$$

où n = nombre d'âges $\times$ nombre d'années.

La distance du χ^2 est également un bon indicateur, se définissant comme une somme sur les âges et les années des écarts entre les taux observés et estimés, pondérés par les expositions. Tout comme l'erreur d'estimation, un χ^2 faible s'interprète comme un indicateur de modèle pertinent et juste :

$$\chi^2 = \sum_t \sum_x \frac{(D_{x,t} - E_{x,t} \hat{q}_{x,t})^2}{E_{x,t} q_{x,t} (1 - \hat{q}_{x,t})} \quad (2.30)$$

La *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) permet d'un autre côté d'obtenir un pourcentage de la moyenne des écarts entre les valeurs estimées et observées. Ici aussi, une MAPE faible s'interprète comme un indicateur de modèle pertinent et juste.

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{x,t} \left| \frac{q_{x,t} - \hat{q}_{x,t}}{q_{x,t}} \right| \times 100 \quad (2.31)$$

où n = nombre d'âges $\times$ nombre d'années.

Le coefficient de corrélation R^2 correspond à la part de variance expliquée par rapport à la variance totale et doit être incluse dans $\{0, 1\}$ où 1 est indicateur d'un modèle pertinent. Il s'exprime comme :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{x,t} (q_{x,t} - \hat{q}_{x,t})^2}{\sum_{x,t} (q_{x,t} - (\frac{1}{n} \sum_{x,t} q_{x,t}))^2} \quad (2.32)$$

La Déviance s'exprime à partir de l'hypothèse suivante : $D_{x,t} \sim E_{x,t} \hat{q}_{x,t}$.

$$\begin{cases} Dev_{x,t} = 2(D_{x,t} \ln(\frac{D_{x,t}}{E_{x,t} \hat{q}_{x,t}} - (D_{x,t} - E_{x,t} \hat{q}_{x,t}))) & si \quad D_{x,t} < 0 \\ Dev_{x,t} = 2E_{x,t} \hat{q}_{x,t} & si \quad D_{x,t} = 0 \end{cases} \quad (2.33)$$

Ainsi, $Deviance = \sum_{x,t} Dev_{x,t}$

De plus, le *Standardized Mortality Ratio* (SMR) est le ratio "nombre de décès observés" sur "nombre de décès estimés". Ainsi, un $SMR \in \{0, 1\}$ indique une surestimation des paramètres. Le SMR s'exprime comme :

$$SMR = \frac{\sum_{x,t} D_{x,t}}{\sum_{x,t} E_{x,t} \hat{q}_{x,t}} \quad (2.34)$$

Arbitrairement, seuls l'erreur d'estimation, la *Mean Absolute Percentage*, le coefficient de corrélation et le *Standardized Mortality Ratio* sont déterminés dans le cadre de

ce mémoire mais ces autres mesures permettent de quantifier l'ajustement du modèle par rapport aux données.

Il peut également être pertinent d'observer les intervalles de confiance asymptotiques des probabilités de décès de niveau de confiance $1 - \alpha$. Il s'écrit :

$$IC_\alpha = [\hat{q}_x + \phi^{-1}(\frac{\alpha}{2})\sqrt{\frac{\hat{q}_x(1 - \hat{q}_x)}{E_x}}, \hat{q}_x + \phi^{-1}(1 - \frac{\alpha}{2})\sqrt{\frac{\hat{q}_x(1 - \hat{q}_x)}{E_x}}] \quad (2.35)$$

où ϕ représente la fonction de répartition inverse d'une loi normale centrée réduite.

Pour chaque modèle étudié (Lee-Carter, Plat, SPO, Lee-Carter température), les tests statistiques sont effectués sur deux plages différentes :

- Plages d'apprentissage : le modèle est calibré sur la base de données historiques et les tests sont effectués sur cette même plage de données.
- Plage projetée (méthode de *backtesting*) : le modèle ayant été calibré sur la base de données historiques, il est ensuite projeté à horizon 1 an. Les tests sont effectués sur la base de cette projection afin de la comparer à des données historiques non considérées dans la plage d'apprentissage.

2.3.2 Plausibilité biométrique

L'un des critères de validation du modèle est également une analyse de la cohérence des résultats. Lorsque les taux de mortalité sont modélisés, il est pertinent de les analyser avant et après projection.

Critères de cohérence sur les taux ajustés

- Analyse graphique : vérification de la proximité et de la cohérence entre les valeurs ajustées par le modèle et les valeurs observées.
- Analyse des résidus : l'écart entre les valeurs du modèle et les valeurs observées est étudié graphiquement. Il est alors possible d'observer le poids des résidus sur les axes "Âges" et "Années" afin de remarquer d'éventuels phénomènes de cohorte ou d'observer des graphiques "quantile-quantile" afin d'évaluer la normalité de la distribution de résidus. $\epsilon_{x,t}$ doit respecter des conditions de moyenne nulle et d'homoscédacité (les résidus doivent être également dispersés autour de la ligne de régression pour toutes les valeurs).

La méthode "quantile-quantile" consiste à comparer les quantiles théoriques d'une distribution normale tracée sur une diagonale.

Critères de cohérence sur les taux extrapolés

- Analyse graphique : il peut également être pertinent d'analyser graphiquement les données prédites à horizon 2100 avec un regard critique.
- Analyse des taux de mortalité : les taux de mortalité prédis à horizon 2100 selon plusieurs scénarios de température, il convient d'admettre que plus la température prédite est élevée, plus le taux de mortalité devrait être élevé. Un tableau peut ainsi être dressé afin de vérifier cette hypothèse. Une analyse des taux de probabilité de décès peut également être faite : il s'agit du même type d'analyse que la précédente, en admettant que $q_{x,t} = 1 - e^{-\mu_{x,t}}$.
- Analyse de l'espérance de vie résiduelle d'un groupe d'individus à l'âge x et l'année t : $e(x,t) = \sum_{i=1}^{\infty} \prod_{j=1}^{i-1} (1 - q_{x+j,t+i})$. Le $q_{x,t}$ augmentant avec la croissance de la température, il est cohérent d'observer une diminution de l'espérance de vie dans un contexte de dérèglement climatique.

Chapitre 3

Valeurs numériques

Dans le cadre de ce mémoire, les valeurs numériques associées aux modèles précédemment présentés sont analysées pour l'ensemble du portefeuille de réassurance vie long terme de PartnerRe. L'objectif est de parvenir à intégrer le facteur température dans un modèle de taux de mortalité et de confirmer sa validité avant projection à horizon 2099.

3.1 Cadre de l'étude

Dans le cadre de ce mémoire seront uniquement considérés des produits de réassurance vie longs termes. En effet, il a été convenu de se pencher davantage sur le risque de tendance lié au dérèglement climatique ayant un impact plus important sur les produits long terme.

En particulier, il convient de s'intéresser aux risques physiques et de transition avec des produits de prévoyance et de rentes viagère. Ces produits sont notamment concernés par les risque de marché, de défaut, de souscription vie, et intangibles. Deux risques en particulier - risque de mortalité et risque de longévité - appartenant au sous-module de souscription vie, sont modélisés par des tables prospectives. Concernant la modélisation, une hypothèse forte a été faite, exprimant la manifestation du dérèglement climatique comme une augmentation de la température. Dans la partie 4, des scénarios croisés sont par la suite appliqués avec notamment des risques de rachat. Des calculs d'impacts sont réalisés afin d'étudier l'interaction entre les risques. Enfin, un élargissement aux risques d'incapacité, d'invalidité et de dépendance est effectué par approximation sur la base des études menés sur les produits couvrant le risque de mortalité et de longévité.

Dans le cadre de ce mémoire, le passif est l'unique composante du bilan prudentiel sur lequel l'intérêt est porté. En particulier, l'impact du dérèglement climatique est analysé sur le *Best Estimate Liabilities*. Ainsi, il n'y a pas d'étude menée sur l'impact des risques physiques et de transition sur les actions et obligations. En accord avec les prédictions du GIEC et en lien avec les dernières recommandations de l'EIOPA, l'étude est menée jusqu'à horizon 2100.

L'équipe **L & H - Actuariat - LT EMELA** au sein de laquelle est réalisé ce mémoire s'occupe des régions Royaume-Uni/Irlande, Europe continentale, Moyen-Orient et Amérique Latine. Sur la base des études menées en section 2.1.1, il a été décidé de se focaliser sur les pays Royaume-Uni, France et Israël comme des éléments intégrés à ces régions et comme leurs représentants.

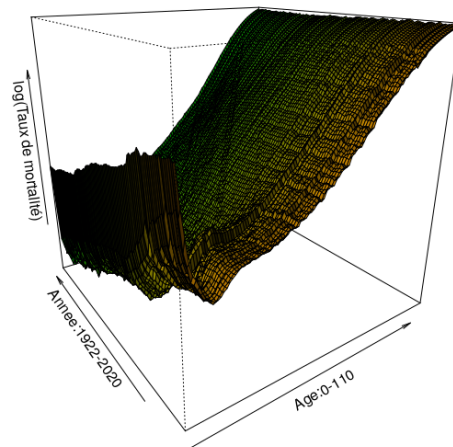
Région	Royaume-Uni/Irlande	Europe continentale	Moyen-Orient et Amérique latine
Pays	Royaume-Uni	France	Israël

L'idée est enfin de pouvoir valider le modèle de Lee-Carter température en le comparant aux modèles de Lee-Carter, de Plat et de SPO, tout en portant une attention particulière sur le choix des paramètres. En parallèle, les paramètres du modèle de SPO sont sélectionnés avec soins. Afin de pouvoir comparer les différents modèles présentés entre eux, il est convenu de faire l'étude sur une plage d'années restreinte : 1990-2019 pour le Royaume-Uni et la France, 1990-2016 pour Israël. En effet, certaines données nécessaires à la modélisation de Lee-Carter température s'avèrent être manquantes pour les années antérieures à 1990. À noter que par souci de concision, seules les courbes représentatives du Royaume-Uni seront tracées dans certains cas, puisqu'il représente plus de 80% du portefeuille de l'étude.

3.2 Modèle de Lee-Carter

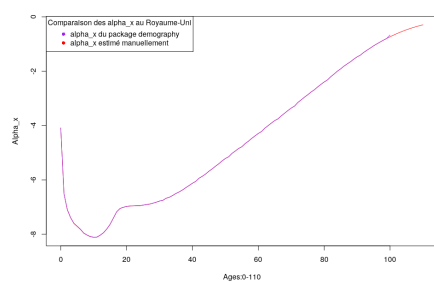
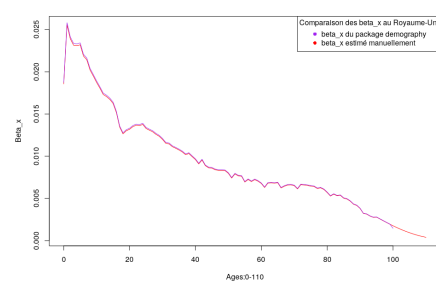
La première étape de ce mémoire consiste à reproduire à l'identique le modèle de Lee-Carter sans utiliser le package "demography" de R et en reconstituant manuellement chaque paramètre du modèle présentés en section 2.2.1. Par souci de concision sont uniquement exposés les figures pour le Royaume-Uni dans cette partie. Pour rappel, le modèle de Lee-Carter s'écrit :

$$\ln(\mu_{x,t}) = \alpha_x + \beta_x \kappa_t + \epsilon_{x,t} \quad (3.1)$$

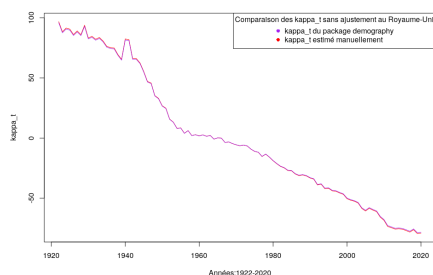
FIGURE 3.1 – Lee-Carter - $\log(\mu_{x,t})$ au Royaume-Uni en fonction de l'âge x et l'année t

Les graphiques ci-dessous indiquent une bonne détermination des paramètres du modèle de Lee-Carter. Il est à l'avantage de ce mémoire de constater qu'en employant un modèle de Lee-Carter avec le *package* "demography", l'analyse se restreint aux âges entre 0 et 100 ans, tandis que le modèle de Lee-Carter manuel s'étend jusqu'à 110 ans.

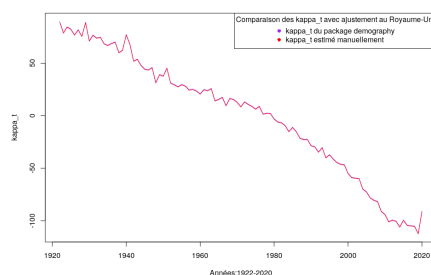
Dans le cadre de cette étude, β_x représente la sensibilité de la mortalité par âge par rapport à κ_t . Il décrit dans quelle mesure la mortalité à l'âge x change compte tenu de l'évolution temporelle globale du niveau de mortalité et des valeurs élevées de β_x sont associées à une évolution rapide de la mortalité.

(a) α_x au Royaume-Uni en fonction de l'âge x (b) β_x au Royaume-Uni en fonction de l'âge x FIGURE 3.2 – Lee-Carter - Comparaison de α_x et β_x au Royaume-Uni

Dans pratiquement toutes les applications, κ_t diminue au fil du temps, ce qui correspond à une amélioration de la mortalité au fil des années. Dans ce contexte et en accord avec la figure 3.2, β_x est généralement positif, reflétant une amélioration spécifique à l'âge. Autrement dit, une diminution linéaire de κ_t correspond à une augmentation de l'espérance de vie à la naissance.



(a) κ_t au Royaume-Uni sans ajustement



(b) κ_t au Royaume-Uni avec ajustement

FIGURE 3.3 – Lee-Carter - Comparaison de κ_t au Royaume-Uni avec et sans ajustement

A titre indicatif, une première étude graphique peut être menée permettant d'analyser l'écart entre le modèle de Lee-Carter et les données réelles de mortalité au Royaume-Uni pour différents âges (45 ans, 65 ans, 85 ans) et années (1998, 2008, 2018). Graphiquement, le modèle de Lee-Carter par année semble très proche des valeurs historiques.

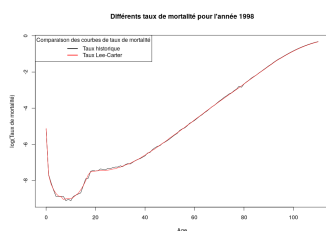


FIGURE 3.4 – Lee-Carter - $\ln(\mu_{x,t})$ au Royaume-Uni pour l'année 1998

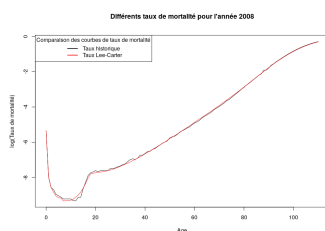


FIGURE 3.5 – Lee-Carter - $\ln(\mu_{x,t})$ au Royaume-Uni pour l'année 2008

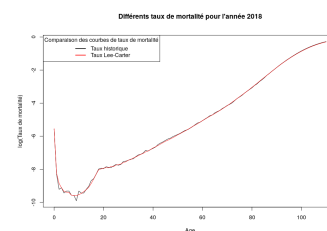


FIGURE 3.6 – Lee-Carter - $\ln(\mu_{x,t})$ au Royaume-Uni pour l'année 2018

Lorsque le modèle est observé par âge, il est possible d'observer un clivage entre le modèle et les valeurs réelles. Globalement, le modèle reste cependant proche des valeurs observées.

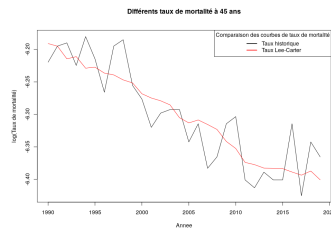


FIGURE 3.7 – Lee-Carter - $\ln(\mu_{x,t})$ au Royaume-Uni pour l'âge 45 ans

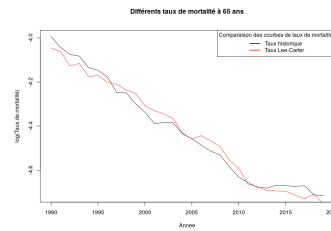


FIGURE 3.8 – Lee-Carter - $\ln(\mu_{x,t})$ au Royaume-Uni pour l'âge 65 ans

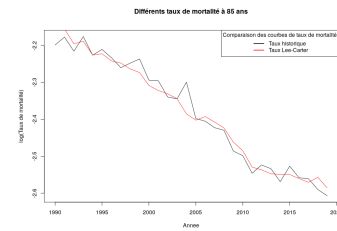


FIGURE 3.9 – Lee-Carter - $\ln(\mu_{x,t})$ au Royaume-Uni pour l'âge 85 ans

Après avoir tracé les courbes précédentes, il convient de s'assurer que les résidus du modèle de Lee-Carter suivent bien une loi normale centrée. Un graphique à trois dimensions est tracé représentant le logarithme des taux de mortalité réels au Royaume-Uni entre 1990 et 2018 et entre 0 et 110 ans. Les couleurs du graphique sont des indicateurs des résidus du modèle. Du rose au rouge en passant par le vert, il est possible d'observer la répartition des résidus du modèle. Pour le graphique de la figure 3.11, une sous-estimation des taux de mortalité est représentée en bleu et une sur-estimation en rouge.

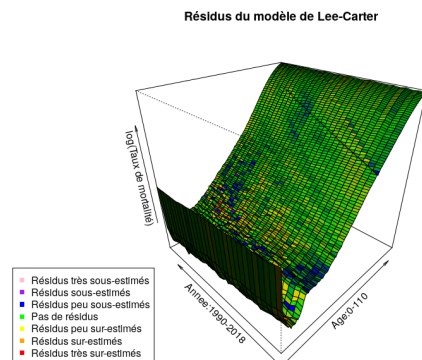


FIGURE 3.10 – Lee-Carter - Résidus 3D du modèle au Royaume-Uni

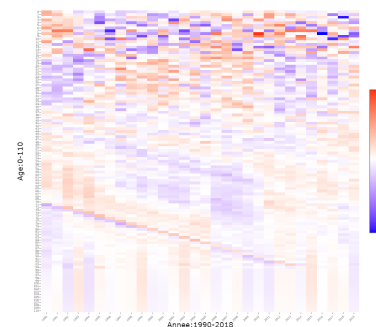


FIGURE 3.11 – Lee-Carter - Résidus 2D du modèle au Royaume-Uni

Il convient de poursuivre l'analyse de résidus en observant les quantiles. Les résidus du *QQ-plot* ne forment pas une ligne droite, ce qui révèle que les résidus ne sont pas normalement distribués. Un phénomène de queues lourdes et de queues légères est représenté, indiquant des valeurs extrêmes des résidus éloignés de la moyenne. En effet, comme évoqué en partie 2.2.1, il s'avère que le modèle de Lee-Carter rencontre des problèmes d'estimation aux âges extrêmes.

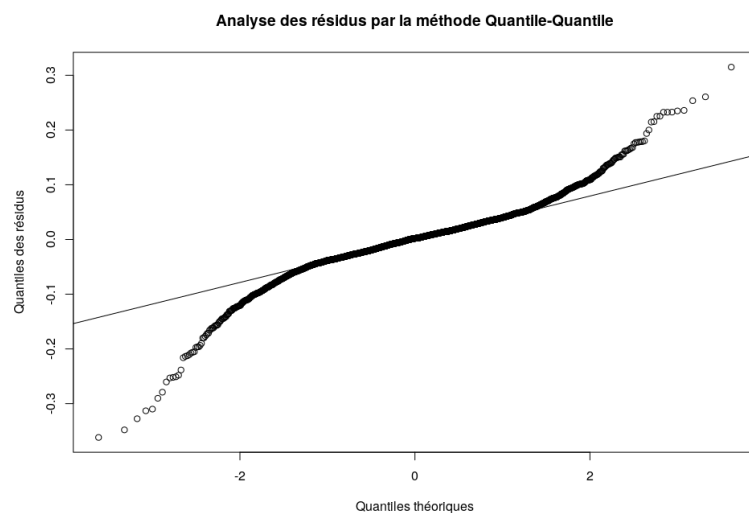


FIGURE 3.12 – Lee-Carter - Visualisation des résidus du modèle au Royaume-Uni

Afin d’approfondir l’analyse de l’écart entre le modèle et les valeurs réelles, il convient de porter une attention particulière aux tests statistiques mentionnés section 2.3.1. Ces tests statistiques permettent notamment d’avoir une idée de la performance des modèles pour les pays étudiés dans le cadre de ce mémoire. En particulier, le modèle de Lee-Carter semble plus adapté aux données de mortalité du Royaume-Uni qui représente plus de 80% du portefeuille étudié. Ils servent également de référence pour les modèles suivants dans le but d’étudier leur robustesse.

Plage d’apprentissage

Tests	Royaume-Uni	France	Israël
Erreur d’estimation	5.3273%	5.4045%	12.0113%
MAPE	3.5985%	3.7220%	8.1334%
R^2	99.9553%	99.9617%	99.8487%
SMR	100.1644%	100.1691%	100.2770%

Plage projetée

Tests	Royaume-Uni	France	Israël
Erreur d’estimation	7.4616%	8.0848%	13.3792%
MAPE	4.9119%	5.6616%	8.7667%
R^2	99.9083%	99.9957%	99.1789%
SMR	97.4134%	98.6849%	99.1789%

3.3 Modèle de Lee-Carter température

Le modèle de Lee-Carter ayant été répliqué, il est possible d'y intégrer une variable de température.

3.3.1 Différents paramètres obtenus

Pour rappel, le modèle de Lee-Carter température étudié dans le cadre de ce mémoire s'exprime comme :

$$\ln(\mu_{x,t}) = \alpha_x + \delta_t T_t + \beta_x \kappa_t + \epsilon_{x,t} \quad (3.2)$$

La théorie d'estimation des paramètres a été présentée section 2.2.5.

Population cible

Tout d'abord, un travail est effectué sur la population restreinte en lien avec les causes de décès de température. Sur cette population, les taux de mortalité s'expriment par :

$$\ln(\mu_{x,t}^{(1)}) = \alpha_x^{(1)} + \delta_t T_t + \epsilon_{x,t} \quad (3.3)$$

La population cible sélectionnée a été déterminée grâce à la base de donnée "*Global Health Data*" présentée partie 2.1.2 et regroupe uniquement des individus dont la cause de décès était directement liée à la température. Un détail est apporté quant à cette sélection partie 3.3.2. Il est facilement remarquable que cette population est catégorisée par groupe d'âge, comme recensé dans la base de données. C'est sur la base de ces données qu'est appliqué le modèle restreint (équation 3.3).

La figure 3.13 permet de visualiser le logarithme des taux de mortalité $\ln(\mu_{x,t}^{(1)})$ associé à la composante climatique. Comme attendu, le graphique montre une augmentation de la mortalité par âge et par année. D'un autre côté, la figure 3.14 montre les valeurs de $\alpha_x^{(1)}$ qui représente la forme générale par âge de $\ln(\mu_{x,t}^{(1)})$.

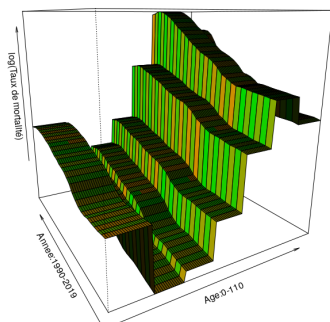


FIGURE 3.13 – Lee-Carter température - $\ln(\mu_{x,t}^{(1)})$ au Royaume-Uni

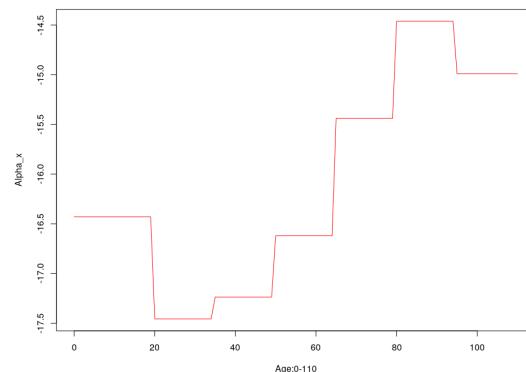


FIGURE 3.14 – Lee-Carter température - $\alpha_x^{(1)}$ au Royaume-Uni

Le choix de la température se porte sur les températures maximales de la région étudiée. Ce point sera détaillé en partie 3.3.2. Les figures 3.15 et 3.16 révèlent une augmentation globale de la température depuis 1990 jusqu'à 2019 au Royaume-Uni. Les tendances de températures s'avèrent être identiques pour la France et Israël. En particulier, depuis 1990 le Royaume-Uni, la France et Israël ont connu respectivement une augmentation de la température de $+0.18^\circ C$, $+0.79^\circ C$ et $+2.07^\circ C$.

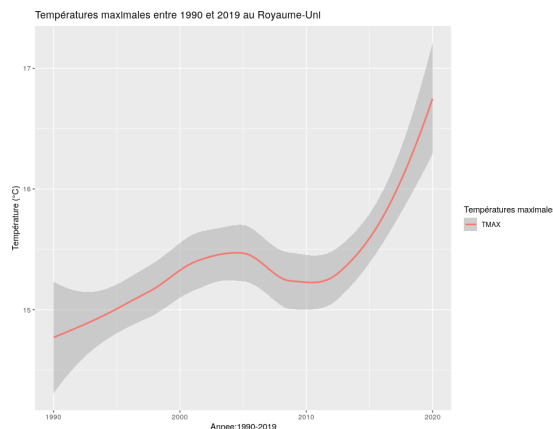


FIGURE 3.15 – Lee-Carter température - Températures maximales centrées T_t au Royaume-Uni

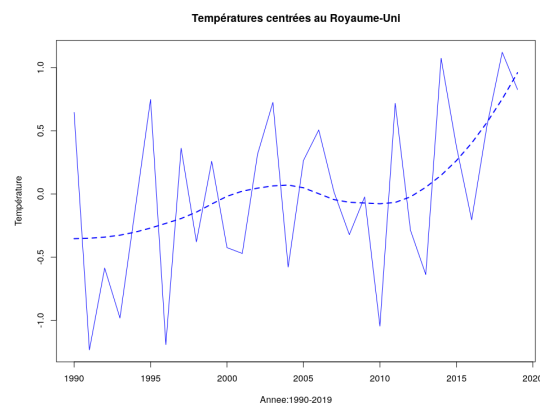


FIGURE 3.16 – Lee-Carter température - Températures maximales centrées T_t au Royaume-Uni

Les données de températures étant connues, δ_x se calcule par la méthode des moindres carrés. Au Royaume-Uni, la courbe du δ_x s'avère être positive pour tous les âges. Cela indique une augmentation des taux de mortalité avec l'âge en parallèle d'une augmentation de la température pour la population restreinte. En France en revanche, la courbe

du δ_x est décroissante ce qui s'interprète comme une diminution progressive du risque de décès par âge avec l'augmentation de la température. Des pics de sensibilité apparaissent néanmoins aux âges faibles et aux âges élevés (~ 80 ans). Cette décroissance peut s'expliquer avec le peu de données disponible concernant la population cible choisie. Au premier abord, cette tendance ne semble pas complètement cohérente avec la trajectoire attendue de δ_x , néanmoins puisque le portefeuille de prévoyance associé à la France a une exposition pour les âges allant de 25 à 65 ans, ces résultats sont retenus. En Israël finalement, la température semble avoir un impact important aux âges faibles ainsi qu'aux âges élevés (~ 90 ans), ce qui semble cohérent au vu de la vulnérabilité face à la chaleur et au froid des populations à ces âges.

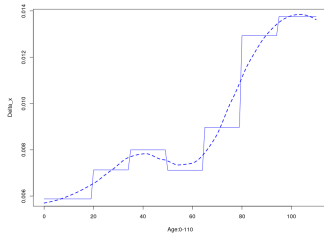


FIGURE 3.17 – Lee-Carter température - δ_t pour le Royaume-Uni

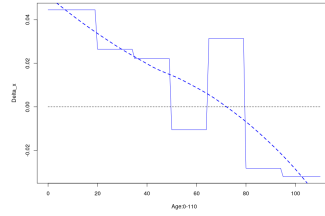


FIGURE 3.18 – Lee-Carter température - δ_t pour la France

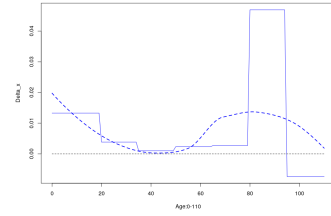


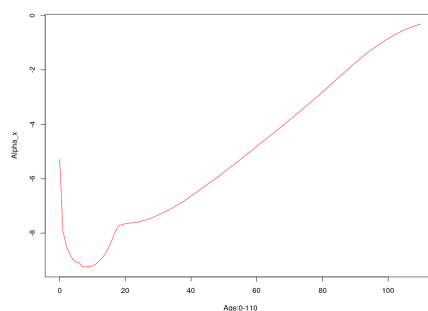
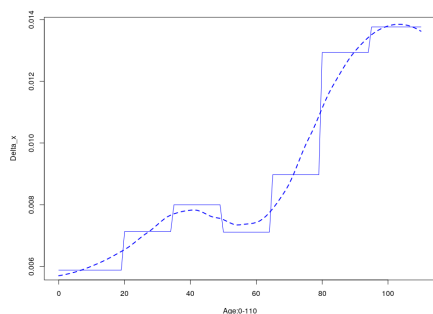
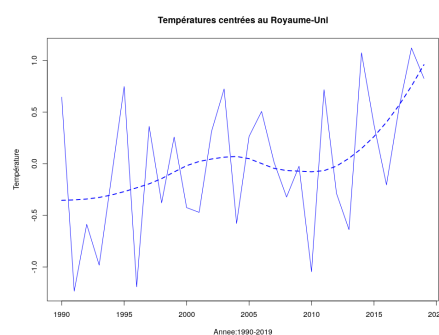
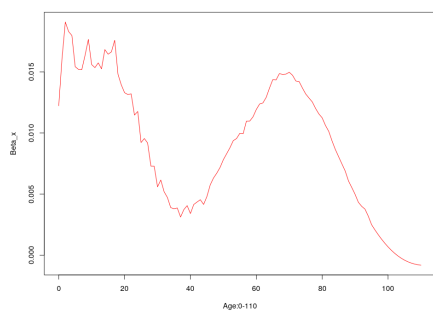
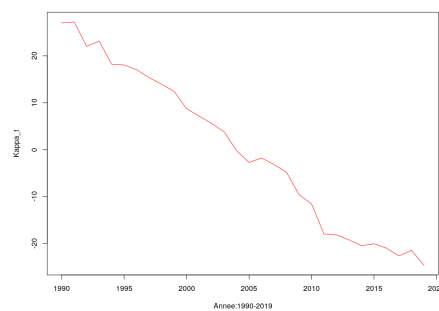
FIGURE 3.19 – Lee-Carter température - δ_t pour Israël

Population globale

La population cible a permis de déterminer δ_x . Il est désormais possible de l'intégrer comme paramètre à une population plus large dans l'objectif d'étudier les impacts de la température sur cette population dite "globale". Le modèle s'exprime désormais :

$$\ln(\mu_{x,t}) = \alpha_x + \delta_t T_t + \beta_x \kappa_t + \epsilon_{x,t} \quad (3.4)$$

dont les divers paramètres sont exprimés ci-dessous. Globalement, la forme générale par âge des taux de mortalité α_x a la même forme que $\alpha_x^{(1)}$. Comme attendu, le κ_t reflétant la dynamique temporelle associée aux causes de décès non influencées par la température décroît. Ceci est synonyme d'amélioration du niveau de vie au Royaume-Uni. Le paramètre β_x révèle quant à lui une vulnérabilité plus élevée chez les personnes aux âges faibles (0-20 ans) et aux âges élevés (60-80 ans).

FIGURE 3.20 – Lee-Carter température - α_x au Royaume-UniFIGURE 3.21 – Lee-Carter température - δ_t au Royaume-UniFIGURE 3.22 – Lee-Carter température - Températures maximales centrées T_t au Royaume-UniFIGURE 3.23 – Lee-Carter température - β_x au Royaume-UniFIGURE 3.24 – Lee-Carter température - κ_t au Royaume-Uni

Les paramètres déterminés, l'objectif est désormais de *challenge* et de tester la robustesse du modèle. Une première étude consiste à vérifier que les valeurs historiques $q_{x,t}$ appartiennent bien à l'intervalle de confiance déterminé à partir du modèle Lee-Carter température. Les valeurs sont observées pour les années de 1990 à 2019 et sont dans

l'intervalle de confiance déterminé à partir des $\hat{q}_x$. Les graphiques appuient quant à la justesse du modèle.

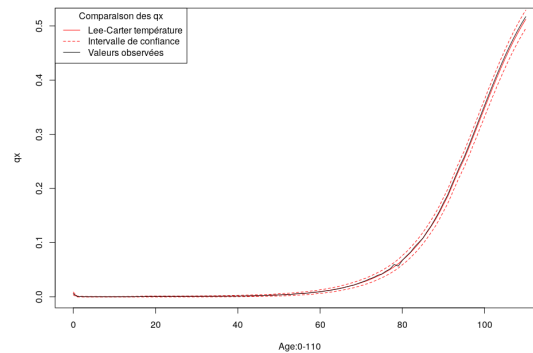


FIGURE 3.25 – Lee-Carter température - Intervalle de confiance des q_x en 1998 au Royaume-Uni

A titre indicatif, des courbes sont tracées afin de montrer la cohérence du modèle par rapport aux valeurs historiques. D'un côté, une étude par année révèle le faible écart entre les valeurs estimées et les valeurs observées. De l'autre, l'étude souligne la difficulté du modèle à s'adapter aux valeurs par rapport à l'âge. Les estimations restent néanmoins proches des valeurs observées.

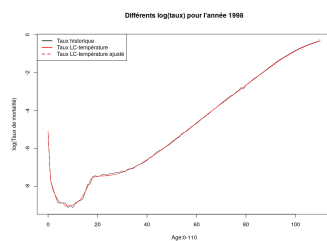


FIGURE 3.26 – Lee-Carter température - Taux de mortalité pour 1998 au Royaume-Uni

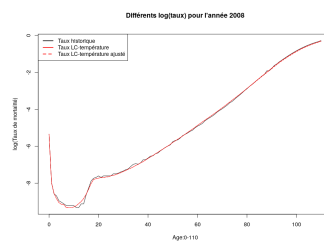


FIGURE 3.27 – Lee-Carter température - Taux de mortalité pour 2008 au Royaume-Uni

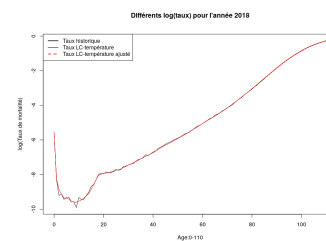


FIGURE 3.28 – Lee-Carter température - Taux de mortalité pour 2018 au Royaume-Uni

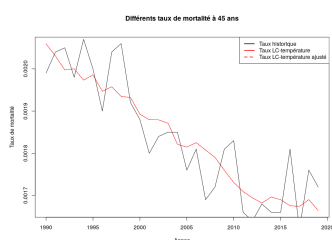


FIGURE 3.29 – Lee-Carter température - Taux de mortalité pour 45 ans au Royaume-Uni

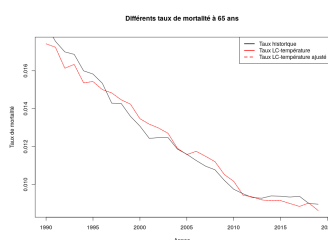


FIGURE 3.30 – Lee-Carter température - Taux de mortalité pour 65 ans au Royaume-Uni

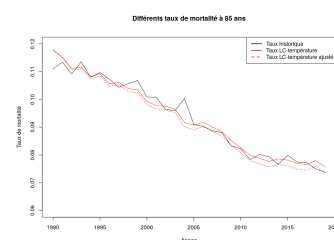


FIGURE 3.31 – Lee-Carter température - Taux de mortalité pour 85 ans au Royaume-Uni

3.3.2 Sensibilité du modèle au choix de différents paramètres

Afin de modéliser au mieux les taux de mortalité, plusieurs travaux et décisions préliminaires sont effectués. Par exemple, il est nécessaire de déterminer avec quelle température travailler (température maximale, moyenne ou minimale) et sur quelle population (femmes, hommes, mixte). Pour chacun de ces paramètres, des sensibilités sont effectuées pour parvenir à une modélisation la plus proche possible des valeurs observées. Dans la présente partie, ces sensibilités sont présentées en addition à un jugement médical offert par le docteur Achim REGENAUER interne à PartnerRe. En particulier, Dr. REGENAUER est un médecin en chef en réassurance dont les secteurs de recherches se portent sur tout ce qui touche le domaine médical, y compris l'impact des vagues de chaleur sur la santé des assurés. Son rôle est notamment d'émettre un jugement médical sur les traités de réassurance et la gestion de sinistres.

Causes de décès liées à la température

La première étape de la modélisation est de déterminer quelles causes de décès sont en lien exclusif avec la température. Pour cela, trois groupes de maladies ont été étudiés :

- Les maladies vectorielles (1)
- L'asthme (2)
- D'autres causes (3) : infections du foie, inflammation cardiaque, exposition environnementale à la chaleur et au froid, maladies tropicales, fièvre, infection respiratoire, inflammation respiratoire, infection de la peau, inflammations digestives, maladies diarrhéiques et infection des voies urinaires

En particulier, les causes de décès sélectionnées sont exactement les suivantes :

Maladies vectorielles	Asthme	Autres causes
Dengue	Asthme	Cellulite
Encéphalite		Coqueluche
Fièvre typhoïde		Décès maternels aggravés par le VIH/sida
Fièvre jaune		Endocardite
Filariose lymphatique		Exposition environnementale aux températures
Leishmaniose		Fièvre paratyphoïde
Maladie de Chagas		Glomérulonéphrite aiguë
Onchocercose		Hépatite B aiguë
Paludisme		Hépatite E aiguë
Schistosomiase		Infections des voies urinaires
Trypanosomiase africaine		Maladies diarrhéiques
Virus Zika		Tuberculose résistante aux médicaments
		Maladies digestives
		Maladies tropicales négligées
		Néphrite interstitielle
		Pyodermite
		Troubles endocriniens, métaboliques, du sang
		Troubles du système immunitaire

Bien que la température joue un rôle important pour chacune de ces causes de décès, il a été envisagé que d'autres facteurs majeurs peuvent les influencer également. Dans ce cas, ces facteurs ne peuvent pas être considérés lors de la sélection de la population cible. Il est rappelé l'hypothèse forte faite en partie 2.2.5 : "la température est le facteur majeur influençant la mortalité et les autres facteurs sont supposés négligeables".

Une première étude consiste à mettre en doute la considération de l'asthme comme facteur majoritairement influencé par la température. En effet, pour chaque pays du portefeuille, les taux de décès liés à l'asthme diminuent de 1990 à 2015, ce qui reflète une amélioration globale de la gestion, du traitement et de la prise en charge de cette maladie respiratoire, en accord avec la représentation graphique de la maladie en figure 3.33. Or, si les progrès médicaux influencent la tendance au fil des années de l'asthme, la température n'est pas le seul facteur de la maladie. A partir de 2015 cependant, l'avancée médicale semble avoir subi une interruption, en témoigne l'augmentation du nombre de décès. Il est néanmoins convenu de retirer l'asthme des causes de décès considérées du fait d'une plage de données trop restreinte.

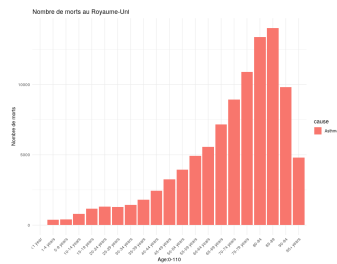


FIGURE 3.32 – Lee-Carter température - Décès par âge pour l’asthme RU

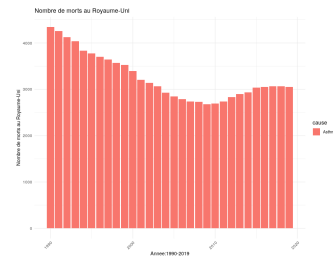


FIGURE 3.33 – Lee-Carter température - Décès par année pour l’asthme RU

Aussi, la figure 3.34 annonce que les nombres de décès cumulés pour les autres causes de décès augmentent avec le temps, ce qui est cohérent car la température augmente entre 1990 et 2019.

Le choix des autres causes de décès semble pertinent au premier abord pour l’étude mais il convient de remettre en doute ce choix. En effet, parmi les autres causes de décès, certaines ne dépendent pas uniquement de la température. Par exemple, l’hépatite B est une infection du foie transmise par un virus par le biais du sang ou des fluides corporels infectés. Or cette transmission n’inclue pas nécessairement un phénomène lié à la température. Si cette cause de décès peut effectivement être accentuée par le dérèglement climatique, la température ne peut pas être considérée comme le facteur majeur de sa survenance. L’hépatite B se transmet en particulier par d’autres biais : seringues, hérédité, pratiques sexuelles non protégées ou exposition à des objets contaminés. Il en va de même pour les autres causes de décès de ce groupe (infections du foie, inflammation cardiaque, fièvre, infection respiratoires, ...).

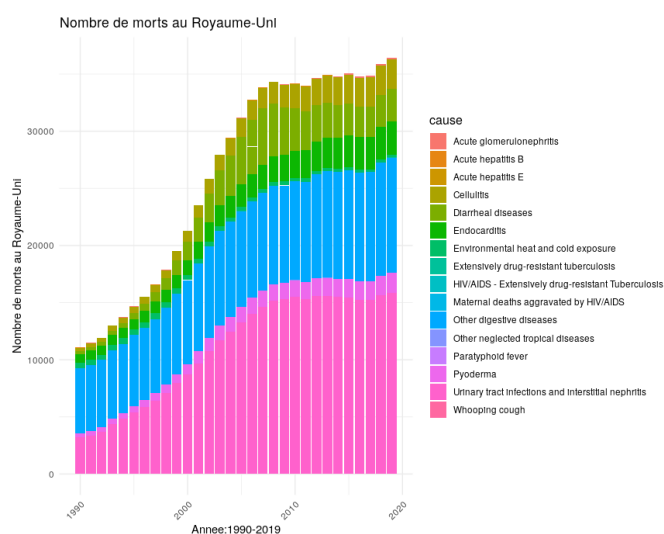


FIGURE 3.34 – Lee-Carter température - Nombre de morts pour les autres causes RU

D'un autre côté, parmi les causes de décès du même groupe, une étude est poussée concernant la cause « exposition aux forces de la nature ». Il est alors notable que le nombre de décès associé diminue dans chaque pays du portefeuille depuis 1990, ce qui n'est pas en accord avec les chiffres vus précédemment. L'Organisation Mondiale de la Santé [de la Santé, 2021] *"s'attend à ce que le changement climatique entraîne près de 250 000 décès supplémentaires par an"* entre 2030 et 2050. D'autres recherches effectuées dans le mémoire d'actuariat "Intégration de facteurs liés à la température dans modélisation du risque de mortalité" [FALL, 2021] annoncent que *"plus de 150 000 personnes pourraient mourir à la suite du changement climatique chaque année en Europe d'ici à la fin du siècle en raison des coups de chaleur"*.

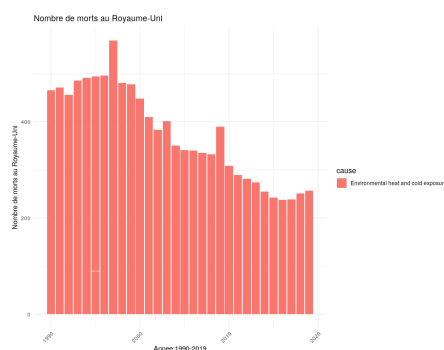


FIGURE 3.35 – Lee-Carter température - Nombre de morts pour les expositions de chaleur et de froid RU

Il convient donc de mettre en doute des données de la base *"Global Health Data"*

[Hea, 2023] liées à la température : même si certains décès sont répertoriés, il est important de noter que la température n'est pas toujours considérée comme la cause de décès mais « l'accélérateur de décès » ainsi, la température n'est pas considérée comme la cause principale de décès. Il en va de même dans le cas de certains décès où plusieurs maladies chroniques sont observées. Par exemple, un patient souffrant de diabète peut contracter deux virus simultanément et décéder d'une attaque cardiaque à l'hôpital. Dans ce cas précis, la cause de décès recensée sur le certificat de décès ne peut pas être les quatre causes citées précédemment. En accord avec le discours du Dr. REGENAUER, les causes de décès recensées suivent alors une ligne directrice avec d'abord l'attaque cardiaque, puis le diabète, puis les deux virus, peu importe l'ordre et l'intensité. Cette ligne directrice est en particulier suivie par les pays de "l'Organisation de Coopération et de Développement Economiques" (OCDE) dont font parti le Royaume-Uni, la France et Israël. Il est donc important de prendre du recul sur les données référençant les causes de décès et de les *challenger*. En particulier, la cause « exposition aux forces de la nature » n'est pas représentative de la réalité et ne peut donc pas être retenue dans cette modélisation.

En conclusion, il convient de garder le groupe (1) comprenant les maladies vectorielles pour la modélisation. Il faut cependant prendre du recul quant à la robustesse du modèle et la pertinence des données. En effet, très peu de maladies vectorielles sont répertoriées, ce qui laisse peu de données à analyser et un échantillon pouvant être considéré comme trop petit.

D'un autre côté, certaines maladies telles que l'encéphalite ne sont pas des maladies vectorielles à proprement parler mais un ensemble dans lequel se retrouve "l'encéphalite à tiques" (TBE), une maladie vectorielle répertoriée de façon indépendante des autres encéphalites au Royaume Uni de façon non systématique jusqu'à aujourd'hui et répertoriée en France de façon systématique depuis 2 ans uniquement. Il est donc possible que certaines maladies classées "maladies vectorielles" ne soient pas uniquement liées à la température ou manquantes. Les hypothèses faites dans le cadre de ce mémoire sont des hypothèses fortes et le choix des causes de décès peut en effet biaiser l'étude et influencer les paramètres de la modélisation.

Afin de se conforter dans le choix du groupe "maladies vectorielles", des analyses graphiques ont été effectuées sur le modèle restreint, et en particulier sur les différentes courbes de δ_x , indiquant la sensibilité de la mortalité par rapport à la température T_t .

Au Royaume-Uni, il est possible d'observer qu'en fonction des causes de décès choisies, le δ_x varie de façon significative, c'est pourquoi il est primordial de s'assurer de la pertinence des causes de décès retenues en lien avec la température et d'avoir davantage d'indicateurs quant à la justesse de ce choix. Les tests ont été effectués sur les groupes suivants :

- (1) : les maladies vectorielles,
- (1)+(2) : les maladies vectorielles et l’asthme,
- (1)+(3) : les maladies vectorielles et les autres causes de décès,
- (1)+(2)+(3) : toutes les causes cumulées.

Les graphiques ci-dessous montrent qu’un δ_x associé au groupe (1) ou au groupe (1)+(3) est positif, synonyme d’augmentation du taux de mortalité. En revanche, mêmes si les groupes (1)+(2) et (1)+(2)+(3) présentent une courbe globalement croissante, certaines valeurs de δ_x apparaissent négatives : respectivement 80 ans et 30 ans. Cela s’interprète comme une amélioration du taux de mortalité et est incohérent dans un contexte de dérèglement climatique.

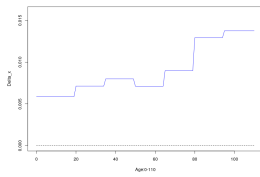


FIGURE 3.36 – Lee-Carter température - δ_x pour (1) RU

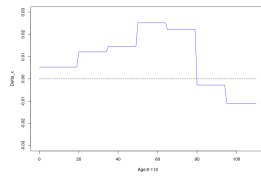


FIGURE 3.37 – Lee-Carter température - δ_x pour (1)+(2) RU

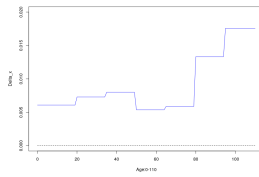


FIGURE 3.38 – Lee-Carter température - δ_x pour (1)+(3) RU

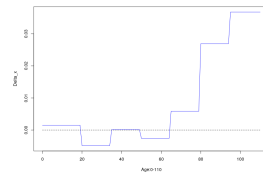


FIGURE 3.39 – Lee-Carter température - δ_x (1)+(2)+(3) RU

Une autre étude consiste à analyser les résidus du modèle restreint. En effet, si les causes de décès ne dépendent que de la température, alors les résidus doivent suivre approximativement une loi normale centrée. Pour chaque groupe de causes de décès retenus, un phénomène de queues lourdes se remarque, ce qui exprime le fait que les causes de décès choisies pour la modélisation ne sont pas liées uniquement à la température. Ceci est cohérent puisque techniquement, il n’est pas possible d’associer une cause de décès à un mouvement de température exclusivement. Néanmoins, il est possible de s’en rapprocher et pour le Royaume-Uni, le groupe (1) semble le plus approprié.

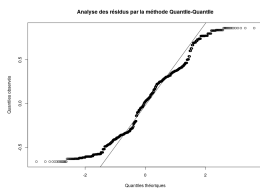


FIGURE 3.40 – Lee-Carter température - Q-Q pour le RU

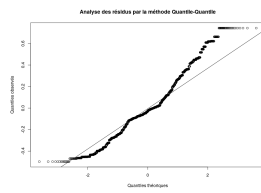


FIGURE 3.41 – Lee-Carter température - Q-Q pour (1)+(2) RU

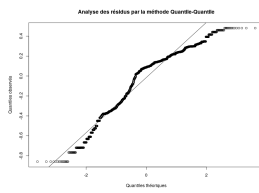


FIGURE 3.42 – Lee-Carter température - Q-Q pour (1)+(3) RU

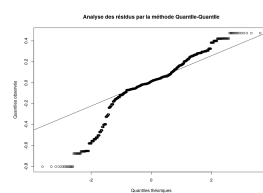


FIGURE 3.43 – Lee-Carter température - Q-Q pour (1)+(2)+(3) RU

Dans un dernier temps, des tests statistiques ont été effectués afin de voir avec quel

groupe le modèle est le plus efficace pour le Royaume-Uni. Globalement, celui avec les maladies vectorielles est le plus pertinent sur la plage d'apprentissage. Le fait que les tests statistiques révèlent une meilleure performance pour le groupe (1)+(2) sur la plage projetée est surprenant. Il est possible que les deux causes de décès "maladies vectorielles" et "asthme" aient une corrélation qui affecte la précision du modèle. De manière isolée, les causes de décès peuvent être considérées comme non pertinentes tandis que ensemble, la modélisation peut être plus précise. D'un autre côté, le modèle est sensible aux données utilisées pour l'ajuster.

Plage d'apprentissage

Tests	(1)	(1)+(2)	(1)+(3)	(1)+(2)+(3)
Erreur d'estimation	5.3356%	5.3654%	5.3394%	5.4121%
MAPE	3.6046%	3.6493%	3.6108%	3.7126%
R^2	99.9525%	99.9505%	99.9502%	99.9286%
SMR	100.1643%	100.1595%	100.1644%	100.1606%

Plage projetée

Tests	(1)	(1)+(2)	(1)+(3)	(1)+(2)+(3)
Erreur d'estimation	7.3139%	7.0567%	7.3467%	7.7156%
MAPE	4.9106%	4.5403%	4.9493%	5.3095%
R^2	99.8734%	99.9368%	99.8628 %	99.7898%
SMR	98.0424%	98.7230%	98.0004%	96.7129%

En France, la courbe du δ_x est également très volatile selon les causes de décès retenues. Les mêmes études que précédemment sont réalisées. Pour les groupes (1), (1)+(3) et (1)+(2)+(3), les courbes de δ_x sont décroissantes positives. Cela indique que les taux de mortalité augmentent globalement mais plus rapidement aux âges faibles. Il est difficile de porter un jugement sur ce point néanmoins il est possible de mettre en doute la courbe du δ_x de la figure 3.46 où il est négatif à compter de 50 ans. Cela indique une amélioration des taux de décès avec l'augmentation de la température, ce qui est incohérent.

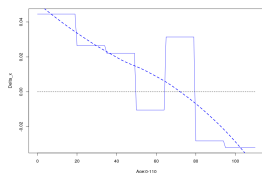


FIGURE 3.44 – Lee-Carter température - δ_x pour (1) FR

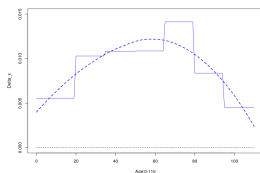


FIGURE 3.45 – Lee-Carter température - δ_x pour (1)+(2) FR

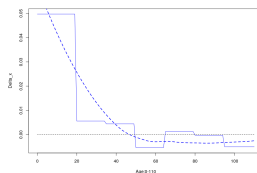


FIGURE 3.46 – Lee-Carter température - δ_x pour (1)+(3) FR

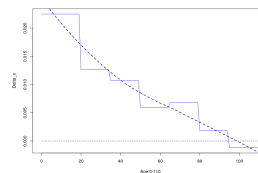


FIGURE 3.47 – Lee-Carter température - δ_x (1)+(2)+(3) FR

Globalement, les résultats des tests statistiques restent proches pour chaque groupe étudié et ne permettent pas de faire un choix quant aux causes de décès les plus adaptées dans le cadre de ce mémoire.

Plage d'apprentissage

Tests	(1)	(1)+(2)	(1)+(3)	(1)+(2)+(3)
Erreur d'estimation	5.6486%	5.4235%	5.4829%	5.4069%
MAPE	3.9883%	3.7398%	3.7762%	3.7223%
R^2	99.9030%	99.9626%	99.9568%	99.9602%
SMR	100.1351%	100.1678%	100.1657%	100.1674%

Plage projetée

Tests	(1)	(1)+(2)	(1)+(3)	(1)+(2)+(3)
Erreur d'estimation	8.2026%	8.2054 %	8.1099%	8.2316%
MAPE	5.6159%	5.7059%	5.5646%	5.5798%
R^2	99.9584%	99.9954%	99.9952%	99.9968%
SMR	101.0838 %	98.4790 %	99.9686%	99.4999%

En conclusion, une analyse graphique permet de favoriser davantage les groupes (1) et (1)+(2), tandis qu'à l'inverse les tests statistiques visent à préférer les groupes (1)+(3) et (1)+(2)+(3). Il est donc important de prendre du recul quant au choix des causes de décès.

En Israël, la courbe du δ_x est encore une fois à forte volatilité selon les causes de décès retenues. En effet, les courbes du δ_x sur les figures 3.50 et 3.51 sont presque opposées. Dans le premier cas, cela traduit une augmentation du taux de mortalité par âge, dans le second une amélioration des conditions de vie en parallèle de l'augmentation de la température. Graphiquement, les groupes (1)+(2) et (1)+(3) sont préférés pour cette analyse. Les *QQ-plot* en annexes favorisent en revanche le dernier groupe.

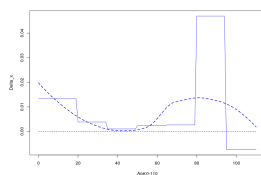


FIGURE 3.48 – Lee-Carter température - δ_x pour (1) ISR

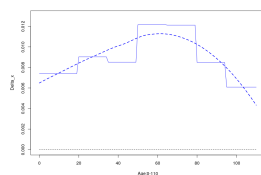


FIGURE 3.49 – Lee-Carter température - δ_x pour (1)+(2) ISR

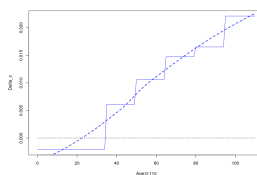


FIGURE 3.50 – Lee-Carter température - δ_x pour (1)+(3) ISR

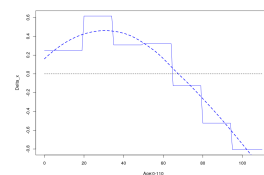


FIGURE 3.51 – Lee-Carter température - δ_x (1)+(2)+(3) ISR

Ici encore, il n'y a pas de tendance claire concernant le choix des causes de décès sur la base des tests statistiques. Néanmoins, les causes de décès (1)+(2) et (1)+(3) sont favorisés.

Plage d'apprentissage

Tests	(1)	(1)+(2)	(1)+(3)	(1)+(2)+(3)
Erreur d'estimation	12.0465%	12.0151%	12.0394%	13.7633%
MAPE	8.1797%	8.1363%	8.1695%	10.1063%
R^2	99.8432%	99.8472%	99.8384%	99.3642%
SMR	100.2636%	100.2757%	100.2724%	99.9313%

Plage projetée

Tests	(1)	(1)+(2)	(1)+(3)	(1)+(2)+(3)
Erreur d'estimation	13.3708%	13.3711%	13.3661%	16.6202%
MAPE	8.6816%	8.6980%	8.6927%	13.1784%
R^2	99.9330%	99.9357%	99.9428%	96.8856%
SMR	99.0734%	98.9542%	99.1529%	88.8158%

En conclusion, une analyse graphique des δ_x et une documentation rigoureuse permettent de sélectionner des causes de décès parmi les différents groupes proposés. Dans le cadre de ce mémoire, il a été supposé qu'un unique groupe de causes de décès doit être retenu pour l'ensemble du portefeuille, c'est pourquoi le choix se porte sur les maladies vectorielles. En particulier, il s'agit du groupe de maladies le plus approprié pour le Royaume-Uni qui représente une majorité du portefeuille (plus de 80% en VAP de sinistres). Il convient d'admettre qu'il est possible de l'appliquer à chaque pays du portefeuille individuellement.

Malgré tout, un avis médical interne à PartnerRe a été effectué quant au choix des causes de décès sélectionnées et il convient de le mettre en doute. En effet, il est certain que dans les années à venir, le taux de décès associé aux maladies vectorielles va augmenter de façon significatives, néanmoins le niveau sera bien moins significatif et même négligeable par rapport aux décès causés par les canicules et vagues de chaleurs. Le médecin allemand Dr. REGENAUER prévient également quant aux discours émis par les médias à la recherche de sensationnalisme. En effet, tandis que certaines causes majeures de décès peuvent être considérées comme susceptibles de moins captiver l'audimat, l'accent est porté sur des maladies plus sensationnelles telles que les maladies tropicales. Cela peut laisser penser - à tort - qu'il y a une prévalence plus élevée de maladies transmises par des vecteurs que de décès dus aux vagues de chaleur.

Selon le même médecin, les causes de décès à retenir devraient être dans un premier temps : les attaques cardiaques, les accidents vasculaires cérébraux, les maladies rénales et les maladies respiratoires en lien avec l'émission des particules des feux de forêt. Dans un deuxième temps, il préconise de se focaliser sur les maladies vectorielles et tropicales. Enfin, il considère les maladies mentales et post-traumatiques.

En parallèle, il souligne que chaque maladies n'a pas le même impact sur la mortalité et sur la morbidité. Par exemple, une maladie cardio-vasculaire ou respiratoire aura plus d'impact sur la morbidité d'une personne qu'une maladie vectorielle qui sera traitée relativement rapidement en Europe. En conclusion, il souligne que le réchauffement climatique devrait avoir un impact plus important sur la morbidité que sur la mortalité. Tout de même, dans le cadre des maladies vasculaires, le chiffre prédominant en terme de manifestation des attaques cardiaques concerne le nombre de morts subites. Environ une personne sur trois n'est pas capable de rejoindre un hôpital à temps et ne rencontre donc pas de morbidité.

Bandes d'âge

Une autre étape de la modélisation est de déterminer les bandes d'âges pour la création du δ_x . En effet, la base de données [Hea, 2023] ne répertorie pas les taux de décès pour chaque âge mais par bandes :

- Tranches de cinq ans (<5a, 5-9a, 10-14a, ...)
- Tranches de quinze ans (<20a, 20-34a, 35-49a, ...)
- Tranches de quarante-cinq ans (<20a, 20-64a, 65-110a)
- Tous âges cumulés

Au Royaume-Uni, le δ_x est représenté pour chaque bande d'âges. Graphiquement, les pas d'âges se remarquent aisément mais pour chaque scénario choisi le δ_x reste positif et croissant. Il convient néanmoins d'admettre que les bandes d'âges 45 ans ne reflètent pas parfaitement la tendance du δ_x .

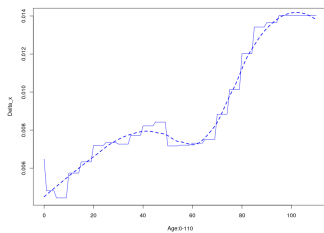


FIGURE 3.52 – Lee-Carter température - δ_x avec une bande 5 ans RU

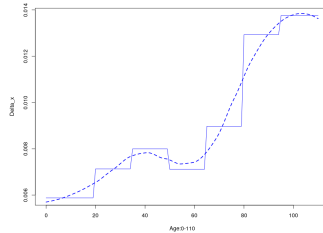


FIGURE 3.53 – Lee-Carter température - δ_x avec une bande 15 ans RU

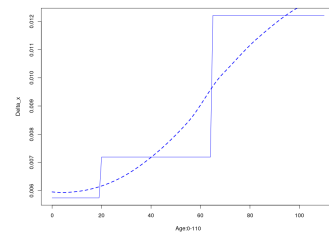


FIGURE 3.54 – Lee-Carter température - δ_x avec une bande 45 ans RU

Pour le Royaume-Uni, un choix de bande d'âges 45 ans semble être le plus adapté au vu des résultats des tests statistiques. Les résultats des tests statistiques restent cependant très proches les uns des autres avec un écart maximum de 0.01% pour l'erreur d'estimation.

Plage d'apprentissage

Tests	5 ans	15 ans	45 ans
Erreur d'estimation	5.3349%	5.3356%	5.3350%
MAPE	3.6049%	3.6046%	3.6031%
R^2	99.9523%	99.9525%	99.9533%
SMR	100.1643%	100.1643%	100.1642%

Plage projetée

Tests	5 ans	15 ans	45 ans
Erreur d'estimation	7.3107%	7.3139%	7.3010%
MAPE	4.9118%	4.9106%	4.8989%
R^2	99.8723%	99.8734%	99.8784%
SMR	98.0183%	98.0424%	98.0740%

En France, les δ_x sont représentés pour chaque bande d'âges. Il est possible de remarquer une grande volatilité du δ_x sur la figure 3.55. A l'inverse, une bande d'âge de 45 ans ne reflète pas du tout la tendance du δ_x . Dans ce contexte, la bande d'âge 15 ans est donc préférée. Ce choix permet d'éviter une sur-volatilité de δ_x en fonction des âges tout en gardant sa tendance générale.

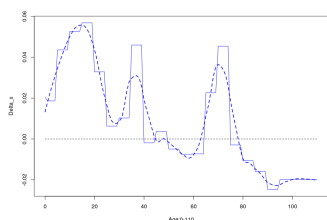


FIGURE 3.55 – Lee-Carter température - δ_x avec une bande 5 ans FR

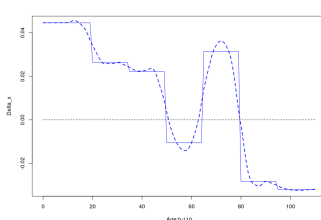


FIGURE 3.56 – Lee-Carter température - δ_x avec une bande 15 ans FR

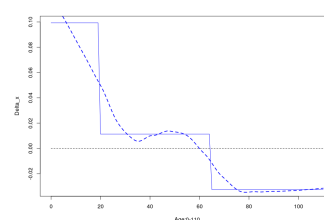


FIGURE 3.57 – Lee-Carter température - δ_x avec une bande 45 ans FR

D'un autre côté, les résultats des tests statistiques préconisent l'emploi de la bande d'âges 5 ans.

Plage d'apprentissage

Tests	5 ans	15 ans	45 ans
Erreur d'estimation	5.5892%	5.6486%	6.0661%
MAPE	3.9253%	3.9883%	4.3082%
R^2	99.9321%	99.9030%	99.8969%
SMR	100.1484%	100.1351%	100.1195%

Plage projetée

Tests	5 ans	15 ans	45 ans
Erreur d'estimation	8.2131%	8.2026%	8.5593%
MAPE	5.4987%	5.6159%	6.2014%
R^2	99.9792%	99.9584%	99.9566%
SMR	100.6801%	101.0838%	102.3113%

En Israël, moins volatile que pour la France, la courbe de δ_x est relativement identique pour chaque scénario de bande d'âges.

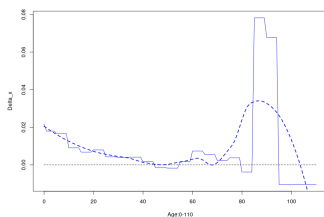


FIGURE 3.58 – Lee-Carter température - δ_x avec une bande 5 ans ISR

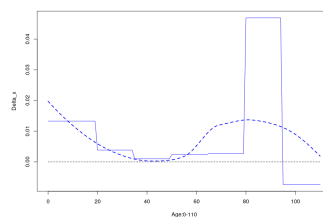


FIGURE 3.59 – Lee-Carter température - δ_x avec une bande 15 ans ISR

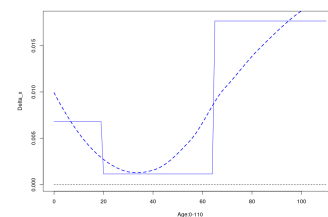


FIGURE 3.60 – Lee-Carter température - δ_x avec une bande 45 ans ISR

La bande d'âges 45 ans semble la plus pertinente au vu des résultats des tests statistiques sur la plage d'apprentissage et sur la plage projetée à un an.

Plage d'apprentissage

Tests	5 ans	15 ans	45 ans
Erreur d'estimation	12.0654%	12.0465%	12.0329%
MAPE	8.2035%	8.1797%	8.1634%
R^2	99.8375%	99.8432%	99.8412%
SMR	100.2579%	100.2636%	100.2723%

Plage projetée

Tests	5 ans	15 ans	45 ans
Erreur d'estimation	13.3721%	13.3708%	13.3669%
MAPE	8.6813%	8.6816%	8.6866%
R^2	99.9331%	99.9330%	99.9412%
SMR	99.0554%	99.0734%	99.0871%

En conclusion, la condition d'acceptation de la bande d'âges est une analyse graphique. Bien que les tests statistiques démontrent de meilleurs résultats pour la France

pour les bandes d'âges cinq ans, ce choix relève d'une extrême volatilité comme le montre la figure 3.55. A l'opposé, travailler avec des bandes d'âges trop grandes comme préconisé pour le Royaume-Uni et Israël risquent de ne pas être représentatif de la population étudiée comme le montre la figure 3.60. Le choix se porte donc sur la bande d'âge 15 ans qui est appliquée à tout le portefeuille.

Température

Afin de faire un choix concernant la température (température maximale ou moyenne) dans les pays du portefeuille, différents tests ont été effectués en commençant par une analyse graphique de δ_x . A titre indicatif, les trois graphiques suivants permettent de visualiser l'évolution des températures maximales, moyennes et minimales au Royaume-Uni, en France et en Israël.

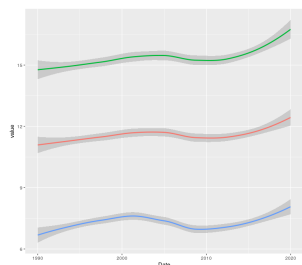


FIGURE 3.61 – Lee-Carter température - Trois températures RU

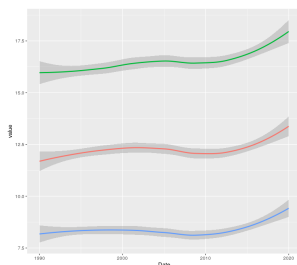


FIGURE 3.62 – Lee-Carter température - Trois températures FR

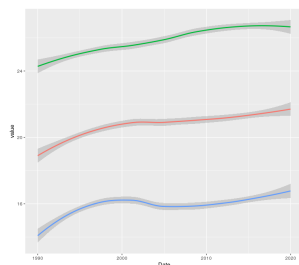


FIGURE 3.63 – Lee-Carter température - Trois températures ISR

Au Royaume-Uni, δ_x est représenté afin de challenger le choix de la température. Encore une fois, la courbe du δ_x est positive croissante pour chaque scénario. En fonction de la température choisie, les courbes ne varient pas de façon significative, cela s'explique au regard de la tendance relativement proche des trois températures figure 3.61.

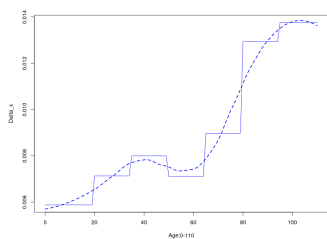


FIGURE 3.64 – Lee-Carter température - δ_x pour la température maximale RU

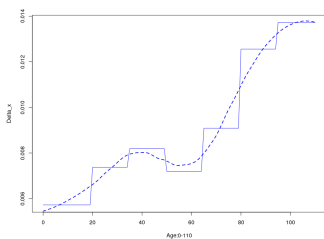


FIGURE 3.65 – Lee-Carter température - δ_x pour la température moyenne RU

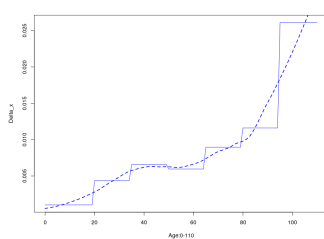


FIGURE 3.66 – Lee-Carter température - δ_x pour la température minimale RU

En France, les courbes du δ_x sont représentées. Dans ce cas, le choix de la température est primordial au vu des différentes courbes obtenues, avec une préférence pour les températures moyennes et minimales.

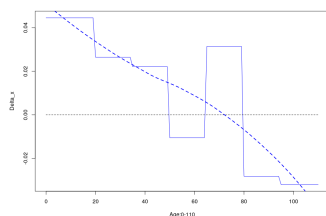


FIGURE 3.67 – Lee-Carter température - δ_x pour la température maximale FR

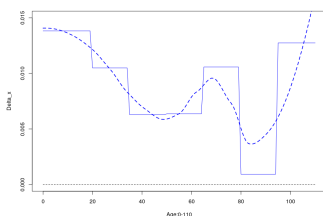


FIGURE 3.68 – Lee-Carter température - δ_x pour la température moyenne FR

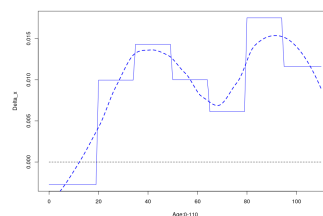


FIGURE 3.69 – Lee-Carter température - δ_x pour la température minimale FR

En Israël, le δ_x est également tracé en fonction du scénario. Dans ce cas, les scénarios avec les températures moyennes et minimales semblent incohérents puisque les courbes de δ_x sont négatives entre 20 et 80 ans.

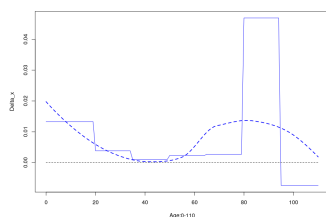


FIGURE 3.70 – Lee-Carter température - δ_x température maximale ISR

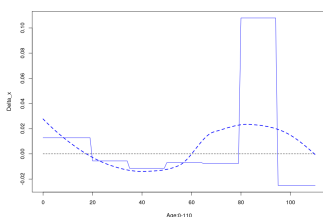


FIGURE 3.71 – Lee-Carter température - δ_x pour la température moyenne ISR

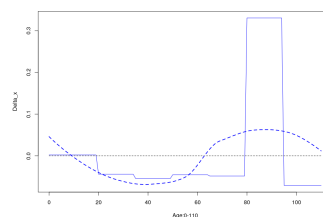


FIGURE 3.72 – Lee-Carter température - δ_x pour la température minimale ISR

Ensuite, les tests statistiques permettent d'apporter des informations quant à la justesse du modèle en fonction de la température choisie. Trois modèles sont comparés : le modèle de Lee-Carter, le modèle de Lee-Carter température avec les températures moyennes et le modèle de Lee-Carter température avec les températures maximales. Comparer les deux modèles de Lee-Carter température au modèle de Lee-Carter permet de se conforter sur la pertinence de ce modèle.

Il convient de remarquer que les résultats des tests statistiques sont extrêmement proches. En particulier, le modèle de Lee-Carter peut s'avérer plus adapté aux données historiques de mortalité dans le sens où les tests statistiques recensent des erreurs d'estimation plus faibles. Il convient de souligner que l'objectif de ce mémoire n'est pas de proposer un modèle nécessairement plus performant mais intégrant une variable de température. Par projection néanmoins, le modèle de Lee-Carter température semble plus

performant que le modèle de Lee-Carter, indiquant ainsi un besoin de modéliser les taux de mortalité en fonction de la température (trois meilleurs résultats pour le modèle de Lee-Carter contre dix pour le modèle de Lee-Carter température).

Plage d'apprentissage

Tests	Modèle	Royaume-Uni	France	Israël
Erreur d'estimation	Lee-Carter	5.3273%	5.4045%	12.0113%
	Lee-Carter T(moy)	5.3295%	5.4066%	12.2294%
	Lee-Carter T(max)	5.3356%	5.6486%	12.0465%
MAPE	Lee-Carter	3.5985%	3.7220%	8.1334%
	Lee-Carter T(moy)	3.6050%	3.7176%	8.3602%
	Lee-Carter T(max)	3.6046%	3.9883%	8.1797%
R^2	Lee-Carter	99.9553%	99.9617%	99.8487%
	Lee-Carter T(moy)	99.9650%	99.9623%	99.8106%
	Lee-Carter T(max)	99.9525%	99.9030%	99.8432%
SMR	Lee-Carter	100.1644%	100.1691%	100.2770%
	Lee-Carter T(moy)	100.1644%	100.1692%	100.1990%
	Lee-Carter T(max)	100.1643%	100.1351%	100.2636%

Plage projetée

Tests	Modèle	Royaume-Uni	France	Israël
Erreur d'estimation	Lee-Carter	7.4616%	8.0848%	13.3792%
	Lee-Carter T(moy)	7.2836%	8.2733%	13.3744%
	Lee-Carter T(max)	7.3139%	8.2026%	13.3708%
MAPE	Lee-Carter	4.9119%	5.6616%	8.7667%
	Lee-Carter T(moy)	4.8508%	5.6099%	8.7831%
	Lee-Carter T(max)	4.9106%	5.6159%	8.6816%
R^2	Lee-Carter	99.9083%	99.9957%	99.1789%
	Lee-Carter T(moy)	99.8993%	99.9957%	99.9266%
	Lee-Carter T(max)	99.8734%	99.9584%	99.9330%
SMR	Lee-Carter	97.4134%	98.6849%	99.1789%
	Lee-Carter T(moy)	98.2870%	99.2181%	99.8832%
	Lee-Carter T(max)	98.0424%	101.0838%	99.0734%

Des tests de cohérence biométriques sont également réalisés afin de juger quelle température retenir. Tout d'abord, les taux de mortalités sont projetés à horizon 2099 sur la base des méthodes évoquées et détaillées partie 3.7.2. En fonction des scénarios de GIEC appliqués au modèle, il en résulte alors 5 tables de taux de mortalité différentes qu'il convient de comparer entre elles. Le modèle qui fournit les tables de mortalités les plus cohérentes est jugé le plus pertinent. Pour rappel, les scénarios de 0 à 5 représentent respectivement une augmentation de la température de 0°C , 1.4°C , 1.8°C , 2.7°C , 3.6°C .

et 4.4°C .

Ces tableaux permettent de voir l'évolution des taux de mortalité dans le temps pour les deux modèles proposés. Pour chaque pays du portefeuille, le taux de mortalité pour différents âges (45 ans, 65 ans, 85 ans) est inscrit pour l'année 2018. Par la suite, cinq colonnes permettent d'analyser l'évolution de ce taux de mortalité en fonction des cinq scénarios du GIEC à horizon 2099. Comme attendu, les taux de mortalité diminuent entre 2018 et 2099. Néanmoins, en fonction des scénarios du GIEC appliqués, la diminution est plus ou moins importante. Avec un scénario où la température augmente beaucoup au fil des années (scénario 5), on s'attend à avoir un taux de mortalité qui diminue moins que pour un scénario où la température augmente peu (scénario 1). En effet, les températures élevées devraient favoriser un grand nombre de décès prématurés.

Dans le tableau des températures moyennes, c'est ce qui est observé grâce à un ralentissement de la diminution des taux de mortalité en fonction des scénarios (1 $\rightarrow$ 5). L'observation est cohérente pour tous les pays sauf Israël pour les âges 45 ans et 65 ans. Pour le modèle basé sur les températures maximales en revanche, il y a des incohérences concernant la France à l'âge 85 ans uniquement.

Projection des taux de mortalité pour le modèle basé sur les températures moyennes

Pays	Age	$\mu_{x,2018}$	Scén. 0 $\mu_{x,2099}$	Scén. 1 $\mu_{x,2099}$	Scén. 2 $\mu_{x,2099}$	Scén. 3 $\mu_{x,2099}$	Scén. 4 $\mu_{x,2099}$	Scén. 5 $\mu_{x,2099}$
RU	45	0.00193	-54.19%	-54.11%	-53.98%	-53.59%	-53.14%	-52.82%
	65	0.01024	-88.32%	-88.30%	-88.26%	-88.15%	-88.03%	-87.94%
	85	0.08509	-69.63%	-69.55%	-69.42%	-69.02%	-68.57%	-68.25%
FR	45	0.00179	-80.75%	-80.73%	-80.69%	-80.56%	-80.42%	-80.32%
	65	0.00956	-72.72%	-72.66%	-72.56%	-72.26%	-71.92%	-71.68%
	85	0.06581	-76.96%	-76.95%	-76.95%	-76.94%	-76.93%	-76.92%
ISR	45	0.00124	-73.67%	-73.76%	-73.86%	-74.16%	-74.51%	-74.75%
	65	0.00778	-87.58%	-87.60%	-87.64%	-87.73%	-87.84%	-87.91%
	85	0.08025	-82.04%	-81.44%	-80.71%	-78.30%	-75.18%	-72.75%

Projection des taux de mortalité pour le modèle basé sur les températures maximales

Pays	Age	$\mu_{x,2018}$	Scén. 0 $\mu_{x,2099}$	Scén. 1 $\mu_{x,2099}$	Scén. 2 $\mu_{x,2099}$	Scén. 3 $\mu_{x,2099}$	Scén. 4 $\mu_{x,2099}$	Scén. 5 $\mu_{x,2099}$
RU	45	0.00193	-54.37%	-54.30%	-54.17%	-53.79%	-53.35%	-53.05%
	65	0.01024	-88.40%	-88.38%	-88.35%	-88.24%	-88.12%	-88.03%
	85	0.08509	-69.93%	-69.84%	-69.71%	-69.31%	-68.84%	-68.51%
FR	45	0.00179	-82.90%	-82.81%	-82.68%	-82.29%	-81.82%	-81.50%
	65	0.00956	-75.98%	-75.83%	-75.57%	-74.77%	-73.83%	-73.16%
	85	0.066	-75.63%	-75.79%	-76.05%	-76.81%	-77.65%	-78.20%
ISR	45	0.00126	-73.74%	-73.73%	-73.72%	-73.70%	-73.66%	-73.643%
	65	0.00791	-87.03%	-87.02%	-87.00%	-86.97%	-86.93%	-86.90%
	85	0.07738	-75.23%	-74.88%	-74.45%	-73.12%	-71.52%	-70.35%

Le portefeuille est composé de produits de prévoyance et de rentes viagères au Royaume-Uni, et uniquement de produits de prévoyance pour la France et Israël. Il convient donc de sélectionner la table de mortalité jugée la plus pertinente et cohérente en association avec le portefeuille. La moyenne d'âge des assurés en prévoyance tournant autour de 40 ans et la moyenne d'âge en rentes viagères tournant autour des 80 ans, il convient de s'assurer de la cohérence des taux de mortalité en particulier pour les critères suivants :

- Royaume-Uni : cohérence des taux pour les âges proches de 40, 60 et 80 ans,
- France : cohérence des taux pour les âges proches de 40 et 60 ans,
- Israël : cohérence des taux pour les âges proches de 40 et 60 ans.

Le modèle le plus adapté en terme de cohérence de taux de mortalité est donc le modèle basé sur la température maximale.

Dans un second temps, les espérances de vies résiduelles pour des personnes nées en 1990 sont modélisées. Un raisonnement similaire est effectué et il convient de sélectionner le modèle renvoyant les valeurs les plus cohérentes. Le modèle basé sur la température moyenne présente que plus la température augmente, plus l'espérance de vie résiduelle diminue, ce qui est cohérent. Il y a néanmoins une incohérence pour la France et Israël pour l'espérance de vie résiduelle entre 20 et 65 ans où elle semble augmenter en parallèle de la température. Pour le modèle de Lee-Carter température basé sur les températures maximales en revanche, il y a des incohérences aux âges élevés pour la France ce qui n'a pas un impact significatif sur le portefeuille.

Projection de l'espérance de vie résiduelle pour le modèle basé sur les températures moyennes

Pays	Age	Scénario 0	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4	Scénario 5
RU	26-65	44.791	44.790	44.789	44.789	44.789	44.789
	45-110	38.781	38.758	38.753	38.747	38.745	38.739
	65-110	18.261	18.259	18.259	18.259	18.259	18.259
FR	26-65	44.731	44.746	44.745	44.745	44.746	44.745
	45-110	40.101	40.089	40.087	40.085	40.083	40.079
	65-110	20.330	20.329	20.329	20.329	20.329	20.329
ISR	26-65	45.101	45.103	45.103	45.103	45.103	45.103
	45-110	40.632	40.468	40.445	40.417	40.391	40.344
	65-110	19.200	19.182	19.182	19.181	19.181	19.178

Projection de l'espérance de vie résiduelle pour le modèle basé sur les températures maximales

Pays	Age	Scénario 0	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4	Scénario 5
RU	26-65	44.792	44.790	44.790	44.790	44.790	44.790
	45-110	38.789	38.766	38.761	38.757	38.753	38.745
	65-110	18.258	18.256	18.256	18.256	18.256	18.256
FR	26-65	44.746	44.746	44.746	44.746	44.746	44.746
	45-110	40.165	40.195	40.204	40.216	40.226	40.240
	65-110	20.370	20.376	20.376	20.377	20.377	20.378
ISR	26-65	45.104	45.104	45.104	45.104	45.104	45.104
	45-110	40.411	40.333	40.323	40.310	40.298	40.276
	65-110	19.186	19.178	19.178	19.178	19.178	19.176

En conclusion, la température retenue est la température maximale. Il convient cependant de tenir compte des limites du modèle dans le sens où il y a des incohérences pour les taux de mortalité aux âges élevés pour la France. En particulier, cette incohérence fait sens au vu de la courbe du δ_x montrée précédemment à la figure 3.67 qui révèle une amélioration des taux de mortalité avec l'augmentation de la température aux âges élevés. D'un autre côté, il peut être mentionné que les températures froides peuvent également être associés à une surmortalité, ainsi la température peut être négativement corrélée avec la mortalité des données historiques. Enfin, les températures maximales ont été déterminées à partir de la moyenne annuelle des températures maximales journalières. Il pourrait donc aussi être pertinent d'analyser les températures extrêmes sur les années d'étude.

Sexes

Il peut aussi être pertinent de distinguer les bases de données afin d'analyser de façons distinctes la population de femmes, et la population d'hommes.

Au Royaume-Uni les courbes de δ_x sont modélisées pour chaque sexe (femmes, hommes, mixte). En fonction du sexe, il convient de remarquer la même tendance pour le δ_x .

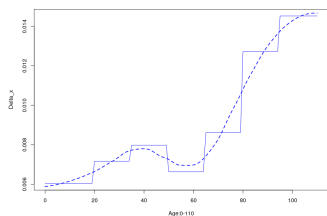


FIGURE 3.73 – Lee-Carter température - δ_x pour les femmes RU

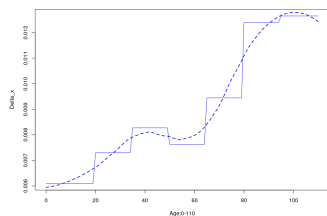


FIGURE 3.74 – Lee-Carter température - δ_x pour les hommes RU

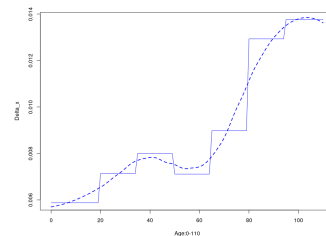


FIGURE 3.75 – Lee-Carter température - δ_x pour les deux sexes RU

En France voici les courbes de δ_x associées à chaque sexe. Cette fois ci, il convient de remarquer une grande sensibilité du modèle au sexe choisi. En effet, pour les femmes les taux de mortalité aux âges faibles semblent s'améliorer pour les causes de décès choisies. A partir de 40 ans cependant, les taux de mortalité augmentent. A l'inverse pour les hommes les taux de mortalités augmentent mais de moins en moins avec l'âge. En cumulé, la courbe de δ_x est décroissante avec de grandes similitudes avec la courbe de δ_x des hommes.

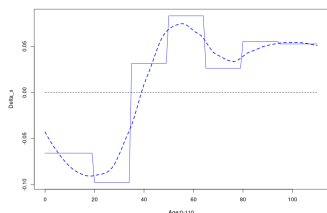


FIGURE 3.76 – Lee-Carter température - δ_x pour les femmes FR

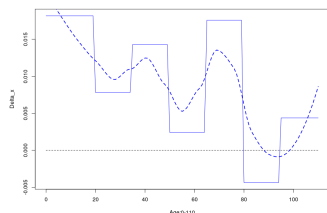


FIGURE 3.77 – Lee-Carter température - δ_x pour les hommes FR

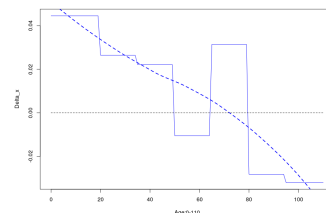


FIGURE 3.78 – Lee-Carter température - δ_x pour les deux sexes FR

En Israël voici les courbes de δ_x pour chaque sexe.

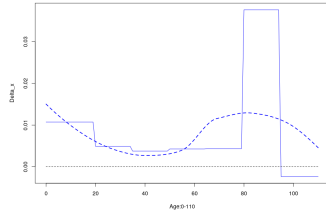


FIGURE 3.79 – Lee-Carter température - δ_x pour les femmes ISR

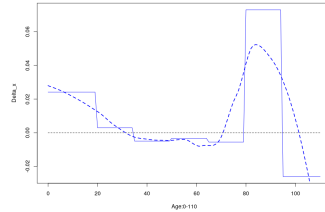


FIGURE 3.80 – Lee-Carter température - δ_x pour les hommes ISR

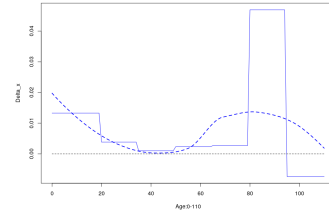


FIGURE 3.81 – Lee-Carter température - δ_x pour les deux sexes ISR

La distinction par sexe permet notamment de prendre conscience que la sensibilité de la mortalité par âge par rapport à la température est significativement différente en fonction du sexe. En accord avec ce point, il a été démontré que les femmes supportent globalement mieux la chaleur que les hommes et sont plus vulnérables au froid : *"la température jugée confortable par une majorité de femmes se situe autour de 25°C, contre 21°C pour les hommes. La raison tient à des besoins énergétiques spécifiques. Le métabolisme de base est 5 à 8% plus élevé chez l'homme (qui produit donc plus de calories), à poids, taille et âge égaux. La différence tient à une proportion plus élevée de muscles chez monsieur"* [MARCHETTI, 2022]. Il est donc naturel de voir une distinction des courbes de δ_x en fonction du sexe.

Graphiquement, il est intéressant d'observer les taux de mortalité modélisés avec le modèle de Lee-Carter température en fonction du sexe.

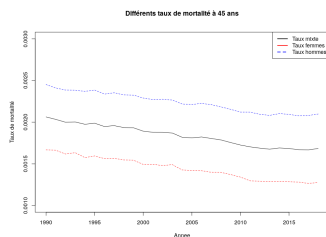


FIGURE 3.82 – Lee-Carter température - Taux de mortalité en fonction du sexe à 45 ans RU

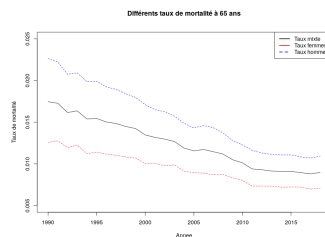


FIGURE 3.83 – Lee-Carter température - Taux de mortalité en fonction du sexe à 65 ans RU

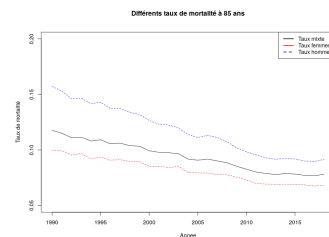


FIGURE 3.84 – Lee-Carter température - Taux de mortalité en fonction du sexe à 85 ans RU

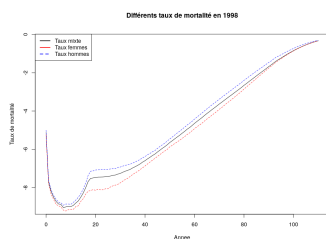


FIGURE 3.85 – Lee-Carter température - Taux de mortalité en fonction du sexe en 1998 RU

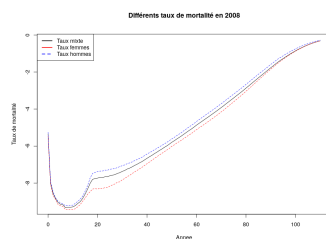


FIGURE 3.86 – Lee-Carter température - Taux de mortalité en fonction du sexe en 2008 RU

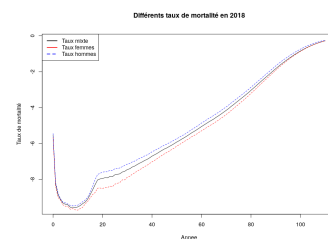


FIGURE 3.87 – Lee-Carter température - Taux de mortalité en fonction du sexe en 2018 RU

En conclusion, le portefeuille étant composé d'hommes et de femmes, il est recommandé de garder une population mixte pour l'étude afin d'avoir une vision globale des taux de mortalité. D'un sexe à l'autre, le modèle varie de façon importante dans le cas de la France et la vision est troublée, risquant de perturber la robustesse du modèle. Il est rappelé que l'objectif premier de ce mémoire est d'avoir une vision d'ensemble et une tendance de la mortalité. Par souci d'uniformité de la granularité des hypothèses, il a été décidé de retenir l'hypothèse de modélisation pour tous sexes confondus.

Groupe socio-économique

Des recherches préliminaires n'ont pas permis de trouver des articles concernant l'impact de la température sur les taux de mortalité en fonction du niveau socio-économique¹ d'un portefeuille. Or, le niveau socio-économique des assurés en prévoyance et en rentes viagères peut varier de façon significative en fonction de divers facteurs tels que le type de couverture d'assurance ou la région géographique. Par conséquent, le risque de mortalité peut être significativement différent. Sur la base des différentes études historiques menées sur la mortalité par groupes socio-économiques au sein des équipes actuarielles, il est supposé que la population présente dans le portefeuille de PartnerRe est de haut et haut-moyen niveaux socio-économiques.

La base de données *Global Health Data*[Hea, 2023] citée précédemment recense les causes de décès par catégorie socio-démographique. La première étape est donc de déterminer ce niveau pour chaque pays du portefeuille étudié. Entrent en considération les trois points suivants afin de juger du niveau socio-économique :

- niveau d'éducation après 15 ans,
- niveau de fécondité après 25 ans,
- revenu par habitant.

1. *Socioeconomic Development Index (SDI)* en anglais

Il y a des indicateurs cumulés entre 0 et 1 où 0 indique un niveau socio-économique faible et 1 un niveau socio-économique élevé.

Faible SDI	0	0.454743
Faible-Moyen SDI	0.454743	0.607679
Moyen SDI	0.607679	0.689504
Elevé-Moyen SDI	0.689504	0.805129
Elevé SDI	0.805129	1

Pour le portefeuille, voici les coefficients attribués par la plateforme en ligne. Le Royaume-Uni et la France appartiennent donc respectivement depuis 2006 et 2010 à la catégorie socio-économique élevée tandis que Israël se maintient dans la catégorie élevée-moyenne.

Pays	1990	2019
Royaume-Uni	0.745	0.847
France	0.738	0.834
Israël	0.717	0.803

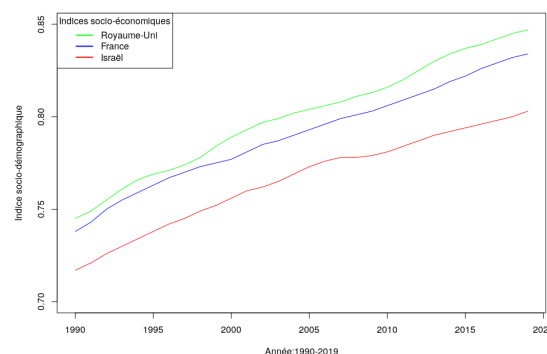


FIGURE 3.88 – Lee-Carter température - Niveau socio-économique du portefeuille

Cette analyse est pertinente puisque le niveau socio-économique traduit en général un certain taux de mortalité. En particulier, un indice socio-économique élevé rime avec une espérance de vie résiduelle plus élevée.

Il convient néanmoins de souligner une incohérence quant à la relation entre le niveau socio-économique de Israël et son espérance de vie résiduelle qui s'élève à 82.8 ans pour les hommes et 84.5 ans pour les femmes alors que les espérances de vie résiduelles au Royaume-Uni et en France sont respectivement 79.8 ans pour les hommes et 85.5 ans pour les femmes ainsi que 79.2 ans pour les hommes et 82.9 ans pour les femmes. En accord

avec les commentaires du Dr. REGENAUER, il convient de détailler les conditions de vie des israéliens. Dans un premier temps, la population israélienne est relativement faible au regard des populations françaises ou du Royaume-Uni (9.3M en 2021 contre 67.8M et 67.3M respectivement). En résulte un temps d'attente moindre dans les centres de santé comparé à celui au Royaume-Uni par exemple où le temps d'attente peut aller jusqu'à 20h dans un département d'urgences. Ce niveau de prise en charge des patients n'est pas pris en compte dans l'évaluation du niveau socio-économique, il convient donc de mettre en doute l'hypothèse selon laquelle un niveau socio-économique élevé est synonyme d'un faible taux de mortalité. Le système de santé israélien est ainsi qualifié d'excellent par les pays européens.

Les courbes de δ_x sont tracées afin de visualiser la sensibilité de la mortalité par rapport à la température en fonction du niveau socio-économique. Il convient de mentionner que l'extraction des taux de décès par niveau socio-économique ne permet pas de distinguer les pays. Ainsi, les pays du tiers monde influencent grandement la courbe du δ_x pour un niveau socio-économique faible tandis que les pays de l'Europe sont principalement représentés dans les courbes du δ_x de niveau socio-économique élevé et moyen-élevé. Dans un contexte de niveau socio-économique élevé, la température semble avoir un impact davantage sur les âges élevés (80 ans) et les âges en dessous de 40 ans.

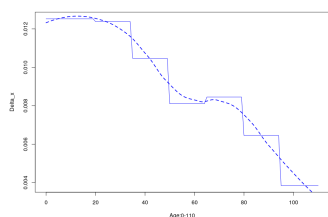


FIGURE 3.89 – Lee-Carter température - δ_x pour un niveau socio-économique faible

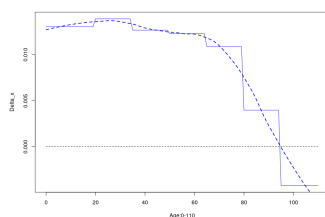


FIGURE 3.90 – Lee-Carter température - δ_x pour un niveau socio-économique faible-moyen

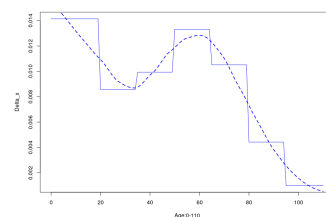


FIGURE 3.91 – Lee-Carter température - δ_x pour un niveau socio-économique moyen

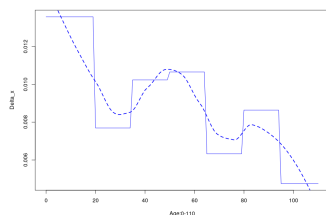


FIGURE 3.92 – Lee-Carter température - δ_x pour un niveau socio-économique élevé-moyen

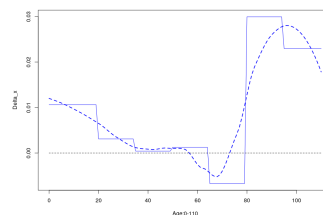


FIGURE 3.93 – Lee-Carter température - δ_x pour un niveau socio-économique élevé

Une étude a aussi été effectuée visant à analyser l'impact du niveau socio-économique sur les produits couvrant les risques de mortalité et de longévité du portefeuille étudié. Son idée est d'étudier la courbe de δ_x pour les plages d'âges où les portefeuilles ont une exposition, c'est-à-dire 40 ans pour les contrats de prévoyance et 80 ans pour les rentes viagères. En particulier, cette étude ne permet pas la distinction des causes de décès par pays, néanmoins la température relative à chaque pays est appliquée. Cela explique les différences entre les courbes des graphiques suivants, qui peuvent donc être associées aux pays du portefeuille. Il est alors possible d'observer globalement dans le cas du risque de mortalité une exposition plus faible du niveau socio-économique élevé au risque lié au dérèglement climatique. Contre toute attente, à l'inverse dans le cas du risque de longévité, plus le niveau socio-économique est élevé, plus l'exposition au risque lié à la température est élevée ce qui n'est pas cohérent. En effet, plus le niveau socio-économique est élevé, moins l'exposition au risque (peu importe lequel) devrait être prononcée. Cette étude n'est donc pas concluante et il pourrait être pertinent de faire une étude plus poussée sur le risque de longévité pour aider à la compréhension du phénomène.

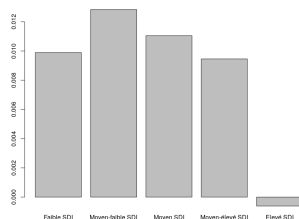


FIGURE 3.94 – Lee-Carter température - Impact sur la mortalité en fonction du SDI au RU

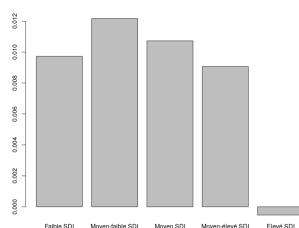


FIGURE 3.95 – Lee-Carter température - Impact sur la mortalité en fonction du SDI en France

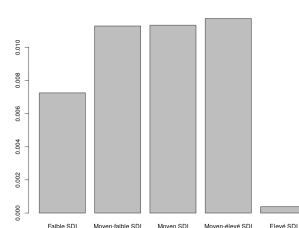


FIGURE 3.96 – Lee-Carter température - Impact sur la mortalité en fonction du SDI en Israël

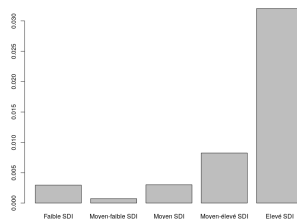


FIGURE 3.97 – Impact sur la longévité en fonction du SDI au Royaume-Uni

3.4 Modèle de Plat

Le modèle de Lee-Carter température proposé précédemment nécessite d'être comparé à des modèles existants et jugés "pertinents" dans le monde de l'assurance. C'est pourquoi les résultats du modèle de Plat sont montrés ici. Pour rappel, voici la formule de Plat :

$$\ln(\mu_{x,t}) = \alpha_x + \kappa_t^{(1)} + \kappa_t^{(2)}(\bar{x} - x) + \kappa_t^{(3)}(\bar{x} - x)^+ + \gamma_{t-x} + \epsilon_{x,t} \quad (3.5)$$

où $f_2 : x \mapsto (\bar{x} - x)$ et $f_3 : x \mapsto (\bar{x} - x)^+$.

Au Royaume-Uni, sur la base des données historiques allant de 1990 à 2018, il est possible de tracer les courbes représentatives des paramètres du modèle de Plat. Comme attendu, la courbe de α_x est plutôt similaire à celles des modèles de Lee-Carter et de Lee-Carter température. D'un autre côté, $\kappa_t^{(1)}$ représente la dynamique temporelle baissière des taux de mortalité. $\kappa_t^{(2)}$ décroît de la même façon, en revanche la courbe de $\kappa_t^{(3)}$ révèle une tendance haussière des taux de mortalité aux âges faibles. Il convient de rappeler qu'aucun paramètre de ce modèle ne permet de faire le lien avec une éventuelle tendance de la température.

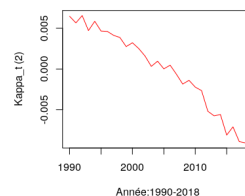
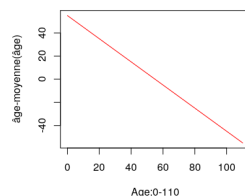
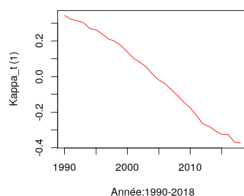
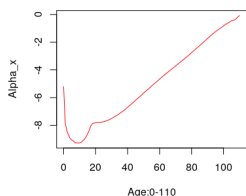
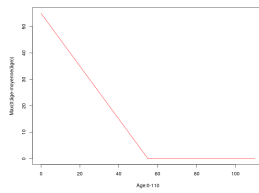
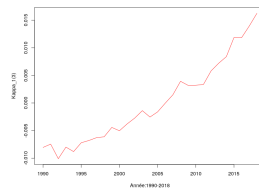
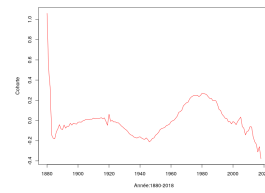
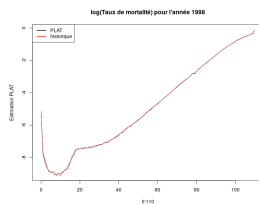
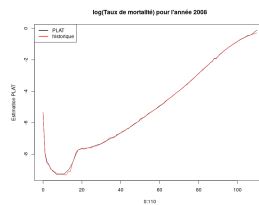
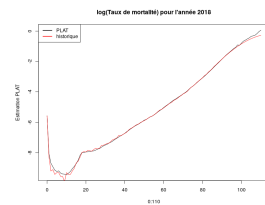
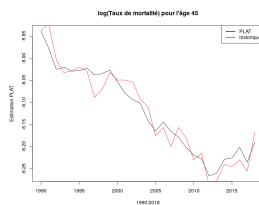
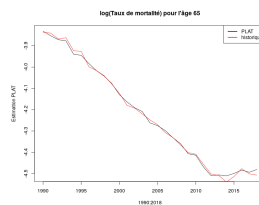
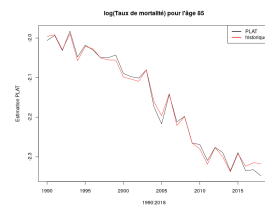


FIGURE 3.98 – Plat - α_x RU FIGURE 3.99 – Plat - $\kappa_t^{(1)}$ RU FIGURE 3.100 – Plat - f_2 RU FIGURE 3.101 – Plat - $\kappa_t^{(2)}$ RU

FIGURE 3.102 – Plat
- f_3 RUFIGURE 3.103 – Plat
- $\kappa_t^{(3)}$ RUFIGURE 3.104 – Plat
- γ_{t-x} RU

A partir de ces paramètres, il est possible de comparer les taux de mortalités observés et ceux estimés par le modèle de Plat. Les taux de mortalité estimés semblent proches des valeurs observées.

FIGURE 3.105 – Plat
- $\ln(\mu_{x,t})$ en 1998 RUFIGURE 3.106 – Plat
- $\ln(\mu_{x,t})$ en 2008 RUFIGURE 3.107 – Plat
- $\ln(\mu_{x,t})$ en 2018 RUFIGURE 3.108 – Plat
- $\ln(\mu_{x,t})$ à 45 ans RUFIGURE 3.109 – Plat
- $\ln(\mu_{x,t})$ à 65 ans RUFIGURE 3.110 – Plat
- $\ln(\mu_{x,t})$ à 85 ans RU

En conclusion, les paramètres du modèle de Plat semblent sensibles à la population et à la région étudiée. En particulier, les graphiques associés aux autres pays sont présentés en annexes. Des tests statistiques sont effectués pour chaque pays traités dans l'étude afin de juger de la robustesse de ce modèle en comparaison aux autres. Un tableau récapitulatif est dressé en partie 3.6 afin de juger du meilleur modèle d'estimation des taux de mortalité.

Plage d'apprentissage

Tests	Royaume-Uni	France	Israël
Erreur d'estimation	6.7078%	6.2980%	27.6688%
MAPE	3.2944%	3.2354%	10.5713%
R^2	98.8653%	99.2672%	76.9441%
SMR	100.0579%	100.2747%	99.8832%

Plage d'apprentissage

Tests	Royaume-Uni	France	Israël
Erreur d'estimation	14.0997%	7.6568%	30.3380%
MAPE	9.6536%	4.6052%	13.9786%
R^2	96.6156%	99.6605%	75.1552%
SMR	96.1271%	101.0791%	96.0404%

3.5 Modèle de SPO

Après avoir modélisé le modèle de Lee-Carter, le modèle de Lee-Carter température et le modèle de Plat, voici le modèle de SPO dont l'expression est la suivante :

$$\ln(\mu_{x,t}) = \alpha_x + \kappa_t^{(1)} + \kappa_t^{(2)}(\bar{x} - x) + \kappa_t^{(3)}(\bar{x} - x)^+ + \kappa_t^{(4)}[(a - x)^+ + c_x(x - a)^+]^2 + \gamma_{t-x} + \epsilon_{x,t} \quad (3.6)$$

où $f_2 : x \mapsto (\bar{x} - x)$, $f_3 : x \mapsto (\bar{x} - x)^+$ et $f_4 : x \mapsto [(a - x)^+ + c_x(x - a)^+]^2$.

3.5.1 Différents paramètres obtenus

Ici encore, il est possible de tracer les différents paramètres du modèle pour chaque pays du portefeuille. Comme pour le modèle de Plat, $\kappa_t^{(1)}$ et $\kappa_t^{(2)}$ ont une tendance baissière tandis que $\kappa_t^{(3)}$ augmente. Il faut cependant observer le paramètre supplémentaire $\kappa_t^{(4)}$ en hausse, indiquant un impact de la température sur la mortalité.

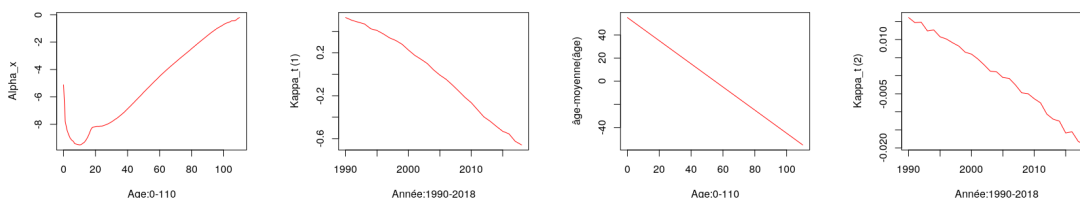
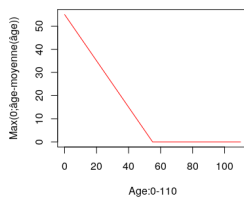
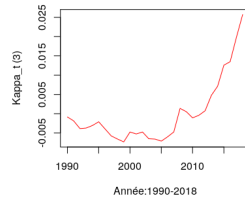
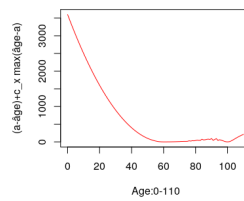
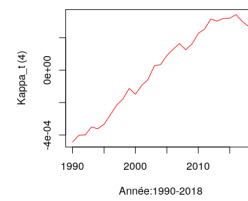
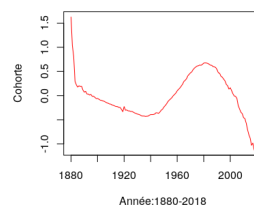


FIGURE 3.111 – SPO - α_x RU FIGURE 3.112 – SPO - $\kappa_t^{(1)}$ RU FIGURE 3.113 – SPO - f_2 RU FIGURE 3.114 – SPO - $\kappa_t^{(2)}$ RU

FIGURE 3.115 – SPO
- f_3 RUFIGURE 3.116 – SPO
- $\kappa_t^{(3)}$ RUFIGURE 3.117 – SPO
- f_4 RUFIGURE 3.118 – SPO
- $\kappa_t^{(4)}$ RUFIGURE 3.119 – SPO - γ_{t-x} RU

Pour chaque pays, après avoir choisi au mieux les paramètres du modèle, des tests statistiques sont effectués. Il convient de prendre du recul quant aux résultats de ces tests qui indiquent globalement un écart significatif entre les valeurs observées et celles estimées.

Plage d'apprentissage

Tests	Royaume-Uni	France	Israël
Erreur d'estimation	21.0249%	9.1892%	29.0021%
MAPE	12.8178%	5.3298%	12.4135%
R^2	98.6863%	99.0966%	75.8975%
SMR	99.6743%	100.3467%	99.7191%

Plage projetée

Tests	Royaume-Uni	France	Israël
Erreur d'estimation	19.0208%	48.9587%	31.1990%
MAPE	12.1958%	49.8312%	14.5538%
R^2	94.9851%	97.4383%	73.6489%
SMR	95.5002%	114.147%	92.9606%

3.5.2 Sensibilité du modèle au choix de différents paramètres

Pour le modèle de SPO, différentes sensibilités sont effectuées afin d'atteindre le meilleur modèle.

Détermination de la corrélation

Comme évoqué en partie 2.2.3, le modèle de SPO est un dérivé du modèle de Plat auquel est ajouté un paramètre de corrélation entre le taux de mortalité et la température. Il convient donc de choisir ce facteur de corrélation exprimé par âge parmi les corrélations de Pearson, de Kendall ou de Spearman.

D'abord, la corrélation de Pearson mesure la force et la direction de la relation linéaire entre la température et le taux de mortalité. Le coefficient de corrélation de Pearson varie de -1 à $+1$, où 1 représente une corrélation linéaire parfaite.

$$Corr(X, Y) = \frac{\sum_i (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_i (X_i - \bar{X})^2 \sum_i (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (3.7)$$

où X et Y représentent des variables continues.

D'un autre côté, la corrélation de Kendall mesure la similitude des classements ou des ordres entre deux variables. Elle est basée sur les rangs plutôt que sur les valeurs réelles des données.

$$Corr = \frac{\text{nombre de paires concordantes} - \text{nombre de paires discordantes}}{\text{nombre total de paires}} \quad (3.8)$$

où les paires concordantes ou discordantes signifient des rangs similaires ou non.

Enfin, la corrélation de Spearman est proche de la corrélation de Pearson mais se base sur les rangs :

$$Corr = \frac{\sum_i (r_i - \bar{r}_i)(r'_i - \bar{r}'_i)}{\sqrt{\sum_i (r_i - \bar{r}_i)^2 \sum_i (r'_i - \bar{r}'_i)^2}} \quad (3.9)$$

où r et r' représentent les rangs attribués aux observations pour les deux variables.

Pour chaque température, les coefficients de corrélations sont calculés dans le tableau récapitulatif suivant pour tous les âges. En particulier, les corrélations les plus importantes sont celles de Pearson et de Spearman pour la température moyenne.

Corrélation entre les taux de mortalité et la température

Corrélation	Température moyenne	Température minimale	Température maximale
Pearson	-0.6297256	-0.479938	-0.09176739
Kendall	-0.4538649	-0.330199	-0.08173077
Spearman	-0.6463077	-0.4848801	-0.1427885

Afin d'établir la corrélation entre la température et la mortalité avec le modèle de SPO, c'est la méthode de Pearson qui est choisie :

- la corrélation est avant tout basée sur les valeurs réelles des données,
- la relation peut être approximée par une relation linéaire,
- la corrélation de Pearson prend en compte les écarts par rapport aux moyennes des variables, ce qui est pertinent dans une étude de variation de température.

Pour chaque température (moyenne, minimale ou maximale) la corrélation de Pearson est négative au court du temps, ce qui rappelle que même si la température augmente, les taux de mortalité dans l'ensemble diminuent au cours du temps. Néanmoins, le graphique révèle que plus l'âge augmente, moins la courbe de mortalité diminue et plus il y a de corrélation entre la température et la mortalité. Il convient d'émettre un jugement sur le calcul de la corrélation pour le modèle de SPO. En effet, toutes les causes de décès sont retenues, ce qui engendre une corrélation négative. Il pourrait être pertinent de développer le modèle de SPO et de raisonner sur une population restreinte sur le même principe que pour le modèle de Lee-Carter température. Ainsi, la corrélation pourrait être positive en s'appliquant aux causes de décès en lien avec la température uniquement.



FIGURE 3.120 – SPO - Corrélation de Pearson entre $\mu_{x,t}$ et T_t entre 2006 et 2018 RU

Période de calibration

Ensuite, il s'agit de faire un choix quant à la période de calibration du modèle de SPO. En effet, le modèle ne renvoie pas nécessairement les mêmes courbes selon la période étudiée. En particulier, des tests ont été effectués sur le Royaume-Uni pour différentes périodes afin d'étudier la sensibilité du modèle face aux périodes d'études. Des graphiques

similaires sont présentés en annexes pour la France.

Dans un premier temps, il convient d'étudier le modèle de SPO sur une large plage de données allant de 1922 jusqu'à 2018. Sur la base de ces données, les paramètres $\kappa_t^{(1)}$, $\kappa_t^{(2)}$, $\kappa_t^{(3)}$ et $\kappa_t^{(4)}$ ne semblent pas avoir une tendance régulière. En effet, $\kappa_t^{(1)}$ et $\kappa_t^{(2)}$ augmentent dans un premier temps - ce qui se traduit par une augmentation générale des taux de mortalité avant les années 1990 - puis diminuent jusqu'à aujourd'hui. A l'inverse, $\kappa_t^{(3)}$ décroît globalement avant de se stabiliser entre 1960 et 2000, puis augmenter. $\kappa_t^{(4)}$ en revanche maintient sa tendance avec une diminution progressive au fil des années, révélant ainsi une amélioration des taux de mortalité malgré une augmentation de la température.

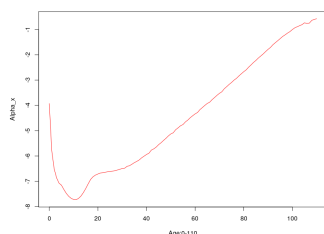


FIGURE 3.121 – SPO - α_x RU (1922-2018)

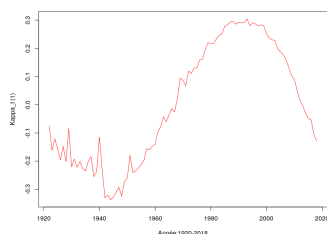


FIGURE 3.122 – SPO - $\kappa_t^{(1)}$ RU (1922-2018)

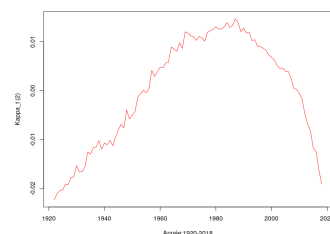


FIGURE 3.123 – SPO - $\kappa_t^{(2)}$ RU (1922-2018)



FIGURE 3.124 – SPO - $\kappa_t^{(3)}$ RU (1922-2018)

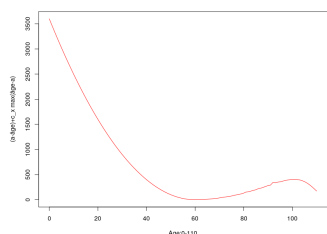


FIGURE 3.125 – SPO - f_4 RU (1922-2018)

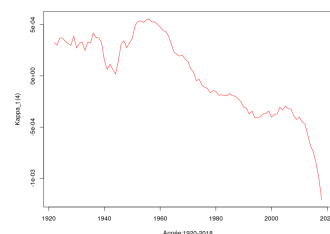
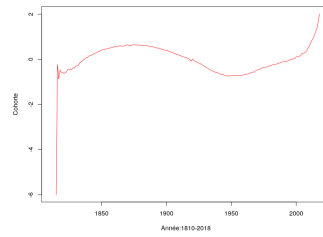
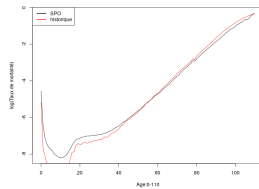
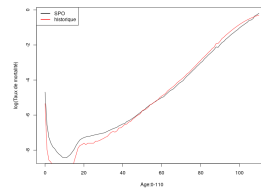
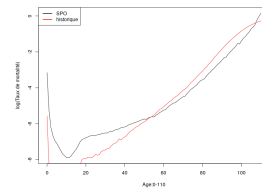
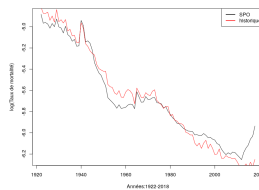
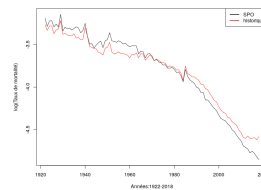


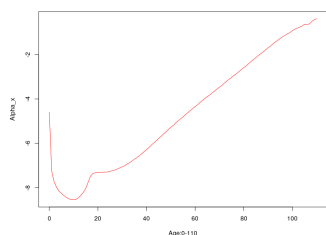
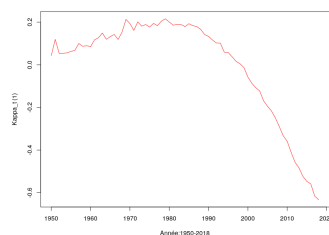
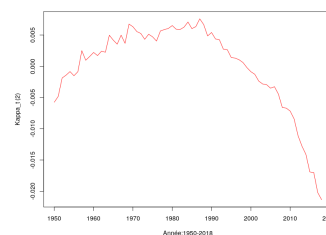
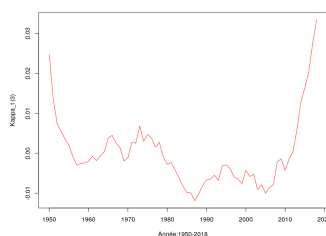
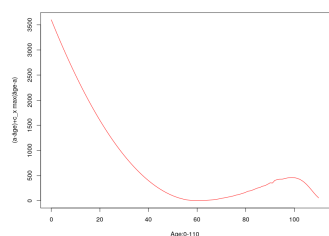
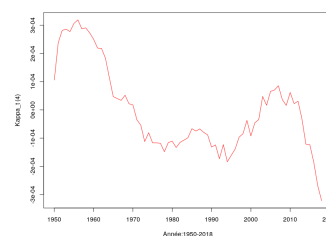
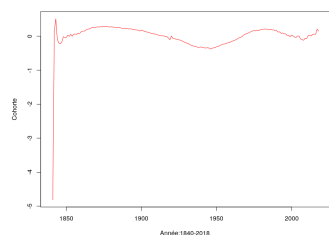
FIGURE 3.126 – SPO - $\kappa_t^{(4)}$ RU (1922-2018)

FIGURE 3.127 – SPO - γ_{t-x} RU (1922-2018)

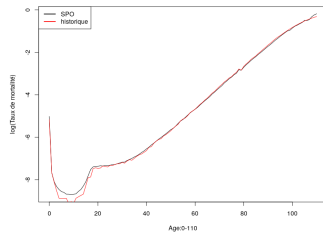
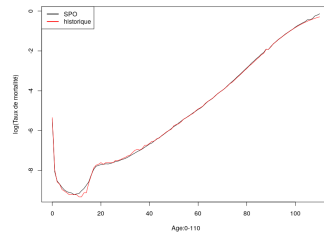
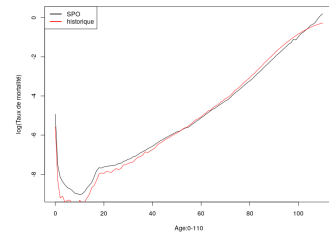
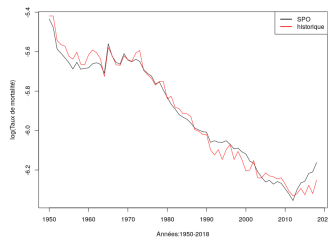
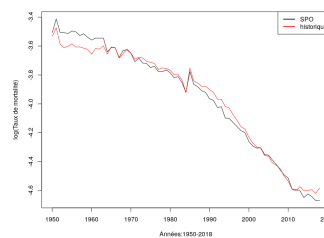
Des courbes peuvent être tracées dans le but de visualiser l'écart entre les estimations du modèle et les valeurs réelles de taux de mortalité. Il convient de remarquer un écart relativement faible entre les valeurs observées et celles estimées par le modèle de SPO basé sur la plage de données 1922-2018.

FIGURE 3.128 – SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ en 1998 RU (1922-2018)FIGURE 3.129 – SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ en 2008 RU (1922-2018)FIGURE 3.130 – SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ en 2018 RU (1922-2018)FIGURE 3.131 – SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ à 45 ans RU (1922-2018)FIGURE 3.132 – SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ à 65 ans RU (1922-2018)FIGURE 3.133 – SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ à 85 ans RU (1922-2018)

Après cette première analyse, la plage de données est restreinte pour les années allant de 1950 à 2018. Globalement, il s'avère que les tendances des courbes observées sont proches de la première plage.

FIGURE 3.134 – SPO - α_x RU (1950-2018)FIGURE 3.135 – SPO - $\kappa_t^{(1)}$ RU (1950-2018)FIGURE 3.136 – SPO - $\kappa_t^{(2)}$ RU (1950-2018)FIGURE 3.137 – SPO - $\kappa_t^{(3)}$ RU (1950-2018)FIGURE 3.138 – SPO - f_4 RU (1950-2018)FIGURE 3.139 – SPO - $\kappa_t^{(4)}$ RU (1950-2018)FIGURE 3.140 – SPO - γ_{t-x} RU (1950-2018)

Comme précédemment, les valeurs réelles sont comparées aux valeurs estimées du modèles de SPO. Comme attendu, l'écart entre les taux de mortalité reste relativement faible.

FIGURE 3.141 – SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ en 1998 RU (1950-2018)FIGURE 3.142 – SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ en 2008 RU (1950-2018)FIGURE 3.143 – SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ en 2018 RU (1950-2018)FIGURE 3.144 – SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ à 45 ans RU (1950-2018)FIGURE 3.145 – SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ à 65 ans RU (1950-2018)FIGURE 3.146 – SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ à 85 ans RU (1950-2018)

Enfin, le modèle de SPO est testé sur la plage de données allant de 1990 à 2018. Cette plage de données, à l'inverse des précédentes, permet de distinguer une tendance claire quant aux paramètres du modèle. En particulier, $\kappa_t^{(1)}$ et $\kappa_t^{(2)}$ ont une tendance baissière, révélant une diminution des taux de mortalité en lien avec les progrès médicaux de ces dernières années. $\kappa_t^{(3)}$ et $\kappa_t^{(4)}$ en revanche augmentent, révélant d'un côté une surmortalité aux âges faibles et de l'autre une surmortalité en lien avec l'augmentation des températures.

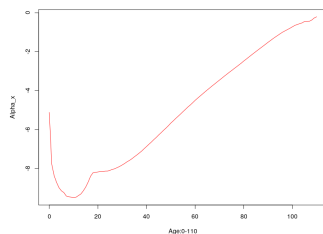
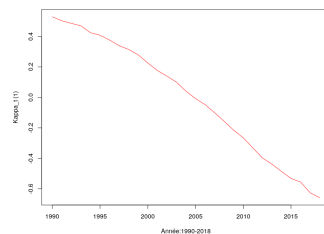
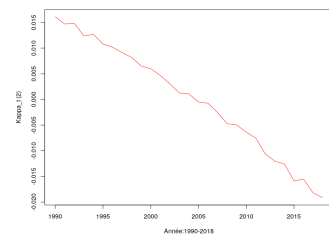
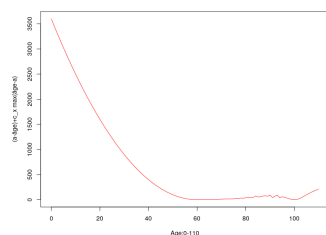
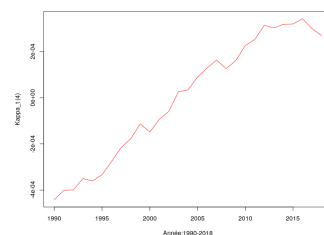
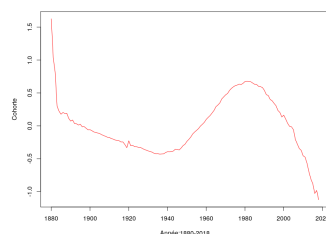
FIGURE 3.147 – SPO - α_x RU (1990-2018)FIGURE 3.148 – SPO - $\kappa_t^{(1)}$ RU (1990-2018)FIGURE 3.149 – SPO - $\kappa_t^{(2)}$ RU (1990-2018)

FIGURE 3.150 – SPO - $\kappa_t^{(3)}$ RU (1990-2018)FIGURE 3.151 – SPO - f_4 RU (1990-2018)FIGURE 3.152 – SPO - $\kappa_t^{(4)}$ RU (1990-2018)FIGURE 3.153 – SPO - γ_{t-x} RU (1990-2018)

Ces paramètres permettent en particulier de tracer le logarithme des taux de mortalité pour des âges et années précis.

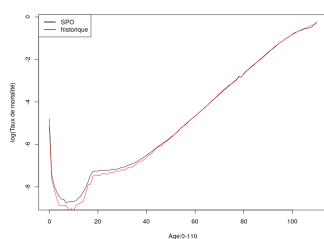
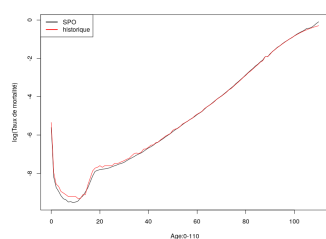
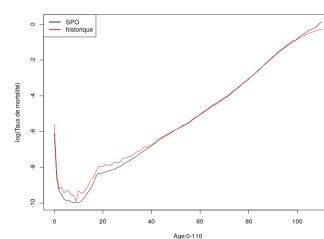
FIGURE 3.154 – SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ en 1998 RU (1990-2018)FIGURE 3.155 – SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ en 2008 RU (1990-2018)FIGURE 3.156 – SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ en 2018 RU (1990-2018)



FIGURE 3.157 – SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ à 45 ans RU (1990-2018)

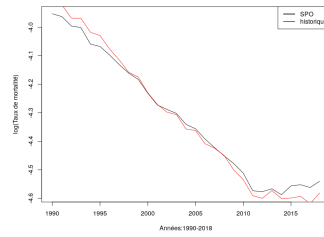


FIGURE 3.158 – SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ à 65 ans RU (1990-2018)

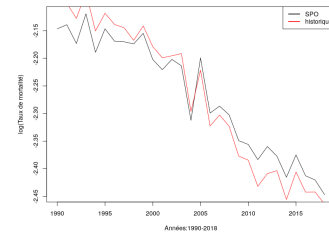


FIGURE 3.159 – SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ à 85 ans RU (1990-2018)

En conclusion, le choix de la plage d'apprentissage est primordial et influence significativement le modèle de SPO. En effet, d'une plage à l'autre, les paramètres subissent d'importantes variations, ce qui peut biaiser les projections du modèle. Comme mentionné précédemment, le Royaume-Uni représente plus de la moitié du portefeuille étudié et au vu de la tendance de ces paramètres, le choix de la plage de données se pose sur la tranche 1990-2020. En effet, pour cette plage uniquement, $\kappa_t^{(4)}$ est en ligne avec ce qui est attendu puisque sa courbe est croissante en fonction du temps. Mais encore, des tableaux récapitulatifs des résultats des tests statistiques ont été dressés pour le Royaume-Uni soulignant la performance du modèle de SPO associé à la dernière plage considérée. De plus, cette plage de données permet de rester en accord avec les plages de données précédemment utilisées pour les modèles de Lee-Carter, Lee-Carter température et de Plat pour une comparaison de tests statistiques.

Plage d'apprentissage

Tests	Plage 1922-2018	Plage 1950-2018	Plage 1990-2018
Erreur d'estimation	36.9149%	16.8610%	21.0249%
MAPE	26.9225%	9.6161%	12.8178%
R^2	96.7118%	98.6877%	98.6863%
SMR	102.3868%	100.3845%	99.6743%

Plage projetée

Tests	Plage 1922-2018	Plage 1950-2018	Plage 1990-2018
Erreur d'estimation	112.8005%	33.9914%	19.0208%
MAPE	234.4825%	30.0717%	12.1958%
R^2	89.3978%	94.5103%	94.9851%
SMR	135.0757%	114.0322%	95.5002%

Choix de la température

Afin d'ajuster au mieux le modèle de SPO, il convient également de faire un choix concernant la température qui est corrélée avec les taux de mortalité historique sur la figure 3.120. Des tests statistiques ont été effectués à partir du modèle de SPO pour chaque température.

Plage d'apprentissage

Tests	Temp. minimale	Temp. moyenne	Temp. maximale
Erreur d'estimation	26.9351%	23.0072%	21.0249%
MAPE	16.1028%	13.8276%	12.8178%
R^2	98.8434%	98.7986%	98.6863%
SMR	99.5952%	99.6669%	99.6743%

Plage projetée

Tests	Temp. minimale	Temp. moyenne	Temp. maximale
Erreur d'estimation	23.6155%	19.1565%	19.0208%
MAPE	13.4884%	11.9226%	12.1958%
R^2	96.5160%	95.8412%	94.9851%
SMR	98.4971%	96.7357%	95.5003%

En conclusion, la température retenue pour le modèle de SPO est la température maximale. En effet, il s'agit de la température pour laquelle les tests statistiques renvoient de meilleurs résultats sur la plage d'apprentissage. Cela permet également de faire une comparaison avec le modèle de Lee-Carter température où la température maximale est utilisée également.

Choix de l'âge sensible à la température

Enfin, il convient de choisir a , l'âge à partir duquel la température a un impact sur la mortalité.

Selon un article de "*European Commission*" [Commissison, 2023], l'augmentation de la température affecte toutes les populations et en particulier tous les âges. Néanmoins, certaines personnes exposées à des contraintes physiologiques ou socio-économiques y sont plus vulnérables. Cela inclue en particulier les nourrissons et les enfants, les femmes enceintes, les personnes âgées, les ouvriers en extérieur, les athlètes ainsi que les personnes défavorisées. Néanmoins, un article de "*United States Environmental Protection Agency*" [EPA, 2023] souligne que la température a un impact significatif en particulier à partir de 60 ans. Il s'agit donc de l'âge choisi pour la calibration du modèle de SPO.

Différents scénarios pour a ont été tracés afin de visualiser les paramètres du modèle. Pour la France sur la plage 1950-2018, il est d'ailleurs possible d'observer respectivement pour $a = 30$, $a = 50$ et $a = 60$ une courbe où $\kappa_t^{(4)}$ décroît contre deux où il croît.

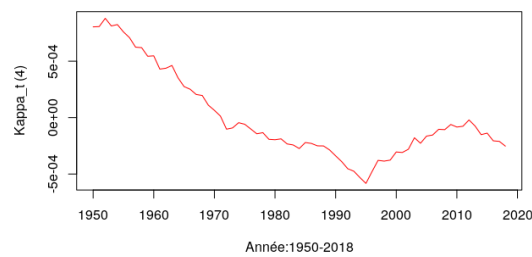


FIGURE 3.160 – SPO - $\kappa_t^{(4)}$ pour $a = 30$
FR

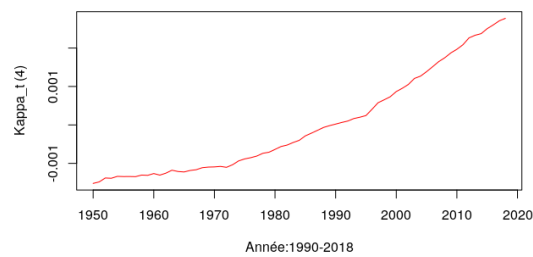


FIGURE 3.161 – SPO - $\kappa_t^{(4)}$ pour $a = 50$
FR

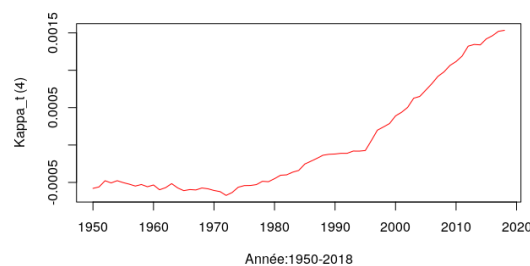


FIGURE 3.162 – SPO - $\kappa_t^{(4)}$ pour $a = 60$
FR

En conclusion, il convient de souligner la sensibilité du modèle de SPO au choix du paramètre a . Néanmoins, le choix de a se porte ici sur la valeur 60 ans. Dans l'ouvrage original du modèle de SPO, le choix de a s'était porté sur la valeur 50 ans car les auteurs jugeaient qu'il s'agissait de l'âge à partir duquel la corrélation devenait stable.

3.6 Validation du modèle

Les paramètres de chaque modèle sont désormais déterminés et l'idée est de les comparer entre eux afin de juger lequel est le plus pertinent. Également, il convient de souligner lequel des deux modèles intégrant la température est le plus proche des valeurs observées. L'objectif étant d'étudier l'impact de la température sur les tables d'incidence, il convient donc de rappeler le résultat des tests statistiques de chaque modèle.

Sur les plages d'apprentissage, les modèles de Lee-Carter et de Plat sont globalement les plus performants. Il convient néanmoins de souligner que les résultats des tests statistiques sont relativement proches d'un modèle à l'autre. Sur la plage projetée, le modèle de Lee-Carter température démontre largement de meilleurs résultats.

Plage d'apprentissage

Pays	Test	Lee-Carter	Lee-Carter température	Plat	SPO
RU	Erreur d'estimation	5.3273%	5.3356%	6.7078%	21.0249%
	MAPE	3.5985%	3.6046%	3.2944%	12.8178%
	R^2	99.9553 %	99.9525%	98.8653%	98.6863%
	SMR	100.164%	100.1643%	100.0579 %	99.6743 %
FR	Erreur d'estimation	5.4045 %	5.6486%	6.2980 %	9.1892%
	MAPE	3.7220	3.9883	3.2354	5.3298
	R^2	99.9617 %	99.9030%	99.2672%	99.0966%
	SMR	100.1691%	100.1351%	100.2747 %	100.3467%
ISR	Erreur d'estimation	12.0113 %	12.0465 %	27.6688%	29.0021%
	MAPE	8.1334	8.1797	10.5713	12.4135
	R^2	99.8487%	99.8432 %	76.9441%	75.8975 %
	SMR	100.2770%	100.2636%	99.8832 %	99.7191%

Plage projetée

Pays	Test	Lee-Carter	Lee-Carter température	Plat	SPO
RU	Erreur d'estimation	7.4616%	7.3139%	14.0997%	19.0208%
	MAPE	4.9119%	4.9106%	9.6536%	12.1958%
	R^2	99.9083 %	99.8734%	96.6156%	94.9851%
	SMR	97.4134%	98.0424%	96.1271 %	95.5002 %
FR	Erreur d'estimation	8.0848 %	8.2026%	7.6568 %	48.9587%
	MAPE	5.6616%	5.6159%	4.6052%	49.8312%
	R^2	99.9957 %	99.9584 %	99.6605%	97.4383%
	SMR	98.6849%	101.0838%	101.0791 %	114.147%
ISR	Erreur d'estimation	13.3792 %	13.3708 %	30.3380%	31.1990%
	MAPE	8.7667%	8.6816%	13.9786%	14.5538%
	R^2	99.1789%	99.9330 %	75.15552 %	73.6489 %
	SMR	99.1789%	99.0734%	96.0404 %	92.9606 %

En conclusion, il convient de rappeler que ce mémoire ne vise pas à obtenir de meilleurs résultats que les autres modèles, mais uniquement à intégrer le paramètre T_t en se rapprochant au mieux des données réelles de mortalité. Le modèle proposé est également un travail préliminaire pour les études qui suivront. Bien que le modèle de Lee-Carter température ne soit pas le plus performant sur la plage d'apprentissage, la plage projetée démontre de meilleures performances pour le Royaume-Uni et Israël. Pour la France, les résultats des tests statistiques du modèle proposé restent relativement proches de ceux offerts par le modèle de Lee-Carter.

Cette analyse permet donc de favoriser le modèle de Lee-Carter température au modèle de SPO ainsi que d'affirmer sa robustesse. En particulier, le modèle de Lee-Carter température permet de faire varier les scénarios de température et donc de quantifier l'impact au niveau des taux de mortalité, ce qui n'est pas le cas pour le modèle de SPO. Concernant ce dernier, toute la population vulnérable à la température ne semble pas prise en considération. En effet, avec le choix du paramètre a effectué, la corrélation entre la température et la mortalité des enfants ou des femmes enceintes par exemple est négligée. Enfin, l'idée même de ce modèle est de faire la corrélation entre les taux de mortalité et les températures historiques, ce qu'il convient de remettre en question puisque la tendance d'évolution de la température ne sera pas nécessairement la même entre 2020 et 2100 que ce qu'elle a été entre 1922 et 2020. L'étude révèle tout de même que le modèle de Lee-Carter température est mieux adapté à certains pays qu'à d'autres. Effectivement, il est moins pertinent pour Israël que pour le Royaume-Uni et la France et il pourrait être judicieux de chercher un autre modèle pour ce pays.

3.7 Prédiction des taux de mortalité

Le modèle de Lee-Carter température a été jugé le plus pertinent dans le cadre de cette étude en terme de projections à horizon 2099, néanmoins pour chaque modèle, les taux de mortalités sont projetés. Cela permet d'avoir une idée de la tendance des taux de mortalité en fonction du modèle. Par soucis de concision, pour chaque projection les graphiques sont présentés pour le Royaume-Uni.

3.7.1 Modèle de Lee-Carter

Les paramètres de Lee-Carter déterminés, il est désormais possible de les projeter à horizon futur grâce aux méthodes citées en partie 2.2.7. A titre indicatif, pour la projection de κ_t , le processus ARIMA retenu est de type : ARIMA (1,1,0), en accord avec le *package* "forecast". Cela indique que le modèle combine une composante auto-regressive et une composante d'intégration. Les graphiques suivants désignent les projections associées au modèle de Lee-Carter pour le Royaume-Uni. Les valeurs estimées sont dans la continuité des valeurs observées, révélant une tendance décroissante des taux de mortalité en fonction des années et une tendance croissante en fonction des âges.

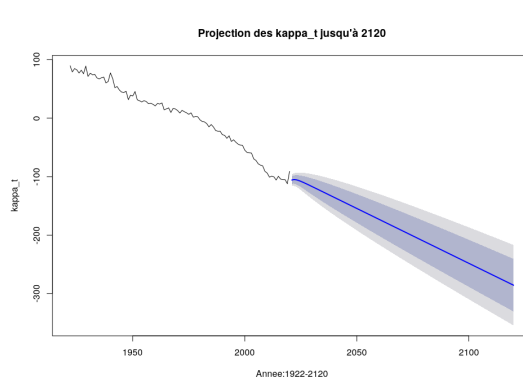


FIGURE 3.163 – Lee-Carter - κ_t projeté jusqu'à 2120 RU

Projection des taux de mortalité pour le modèle de Lee-Carter

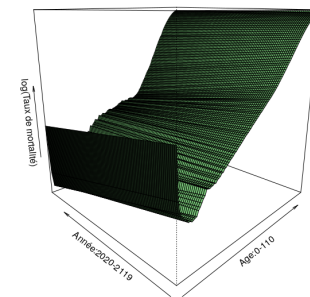


FIGURE 3.164 – Lee-Carter - $\ln(\mu_{x,t})$ projeté jusqu'à 2120 RU

3.7.2 Modèle de Lee-Carter température

Les paramètres de Lee-Carter température déterminés, il est désormais possible de les projeter à horizon futur grâce aux méthodes citées en partie 2.2.7. A titre indicatif, pour la projection de κ_t , le processus ARIMA retenu est de type : ARIMA (1,1,0). Les projections de taux de mortalités sont modélisées graphiquement à partir du scénario 1 du GIEC parmi les cinq vus précédemment où l'augmentation de la température est de 1.4°C à horizon 2099.

Il convient d'observer une ressemblance nette entre les projections du modèle de Lee-Carter et celles du modèle de Lee-Carter température, ce qui conforte dans le choix de ce modèle. La figure 3.166 semble indiquer qu'ici aussi, les taux de mortalité diminuent globalement en fonction des années et augmentent en fonction des âges.

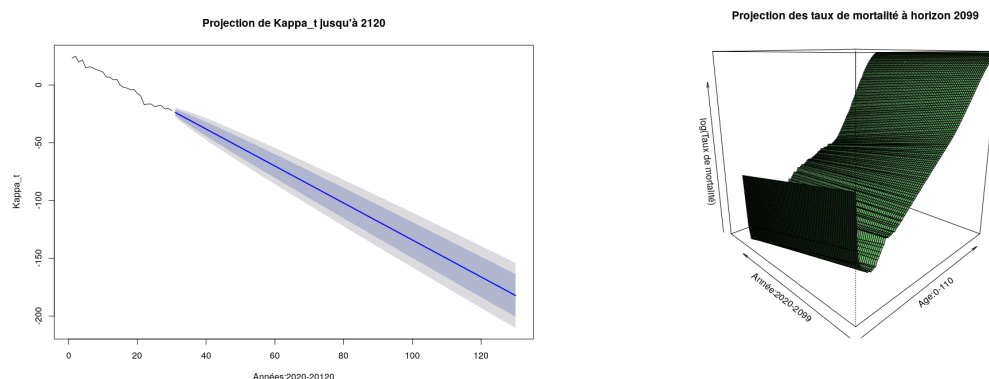


FIGURE 3.165 – Lee-Carter température - κ_t projeté jusqu'à 2120 RU

FIGURE 3.166 – Lee-Carter température - $\ln(\mu_{x,t})$ projeté jusqu'à 2099 RU

3.7.3 Modèle de Plat

Les paramètres de Plat déterminés, il est désormais possible de les projeter à horizon futur grâce aux méthodes citées en partie 2.2.7 et 2.2.7. Pour la projection des $\kappa_t^{(1)}$, $\kappa_t^{(2)}$ et $\kappa_t^{(3)}$ respectivement, les processus ARIMA retenus sont de type : ARIMA (0,1,0), ARIMA (1,1,0) et ARIMA (0,2,2).

Il convient alors de juger le nombre de paramètres à prédire, chacun avec son propre intervalle de confiance. L'incertitude des prédictions en est d'autant plus grande, en particulier au vu de celui associé aux projections de $\kappa_t^{(3)}$.

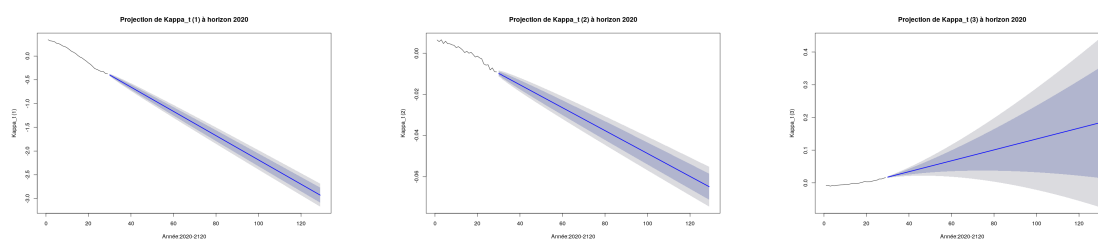


FIGURE 3.167 – Plat - $\kappa_t^{(1)}$ projeté jusqu'à 2120 RU

FIGURE 3.168 – Plat - $\kappa_t^{(2)}$ projeté jusqu'à 2120 RU

FIGURE 3.169 – Plat - $\kappa_t^{(3)}$ projeté jusqu'à 2120 RU

Il est possible de constater un écart significatif entre les projections du modèle de Plat et celles des modèles projetés précédemment. Il est important de prendre du recul face à

de telles prédictions. En accord avec les inquiétudes associées au nombre de paramètres, les courbes de $\ln(\mu_{x,t})$ n'ont plus du tout les mêmes tendances que pour les valeurs historiques. En effet, d'après la figure 3.170, la croissance ou la décroissance des taux de la mortalité sont sensibles à l'âge.

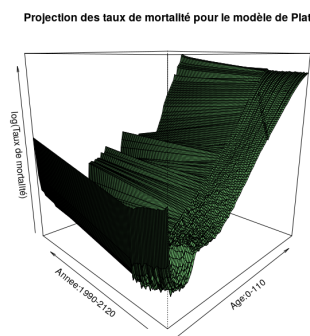


FIGURE 3.170 – Plat - $\ln(\mu_{x,t})$ projeté jusqu'à 2020 RU

3.7.4 Modèle de SPO

Enfin, les paramètres de SPO déterminés, il est possible de les projeter à horizon futur grâce aux méthodes citées en partie 2.2.7 et 2.2.7. Respectivement, pour les projections des $\kappa_t^{(1)}$, $\kappa_t^{(2)}$, $\kappa_t^{(2)}$ et $\kappa_t^{(4)}$ les processus ARIMA retenus sont de type : ARIMA (0,2,2), ARIMA (1,1,0), ARIMA (0,2,1) et ARIMA (0,1,0).

Grâce aux projections obtenues à partir du *package* "forecast", il est possible de visualiser les intervalles de confiance des $\kappa^{(i)}$ projetés. Le fait que quatre κ_t soient à projeter amplifie d'autant plus l'incertitude du modèle. Enfin, les courbes des taux de mortalité projetés confortent dans le fait que le modèle de SPO semble moins pertinent que le modèle de Lee-Carter température. En effet, les projections semblent encore plus sensibles aux âges que les projections du modèle de Plat.

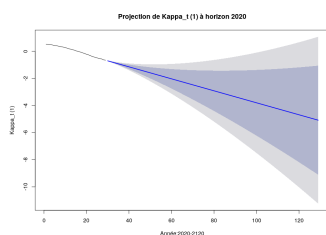


FIGURE 3.171 – SPO - $\kappa_t^{(1)}$ projeté jusqu'à 2120 RU

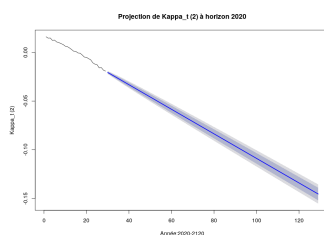


FIGURE 3.172 – SPO - $\kappa_t^{(2)}$ projeté jusqu'à 2099 RU

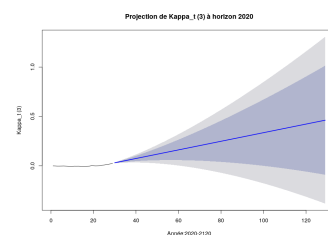


FIGURE 3.173 – SPO - $\kappa_t^{(3)}$ projeté jusqu'à 2099 RU

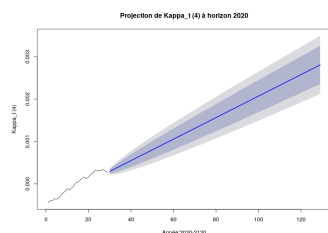


FIGURE 3.174 – SPO - $\kappa_t^{(4)}$ projeté jusqu'à 2120 SPO

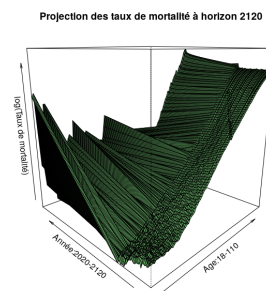


FIGURE 3.175 – SPO - $\mu_{x,t}$ projeté jusqu'à 2120 SPO

3.7.5 Fermetures de tables

Pour chaque modèle, des fermetures de tables sont appliquées aux données de mortalité projetées, comme expliqué en partie 2.2.8. Dans un premier temps, les fermetures de tables sont appliquées sur la plage d'apprentissage en fonction de l'âge, puis sur les données projetées afin d'aider à la compréhension. Comme attendu, il est possible d'observer la fermeture de table à partir de 80 ans par une distinctions des courbes à compter de cet âge.

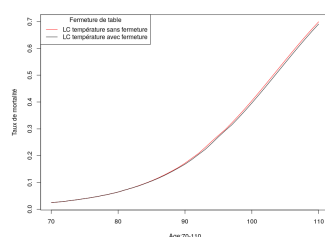


FIGURE 3.176 – Lee-Carter température - Fermetures de tables de 70 ans à 110 ans pour 1998 RU

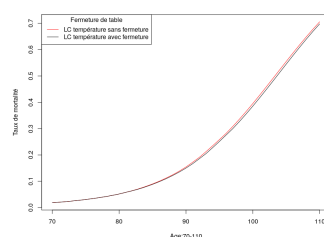


FIGURE 3.177 – Lee-Carter température - Fermetures de tables de 70 ans à 110 ans pour 2008 RU

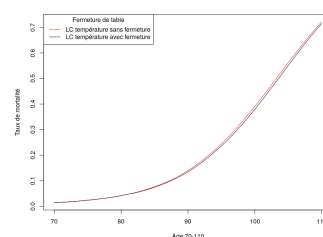


FIGURE 3.178 – Lee-Carter température - Fermetures de tables de 70 ans à 110 ans pour 2018 RU

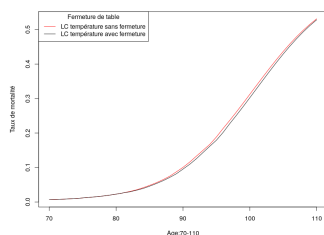


FIGURE 3.179 – Lee-Carter température - Fermetures de tables de 70 ans à 110 ans pour 2050 RU

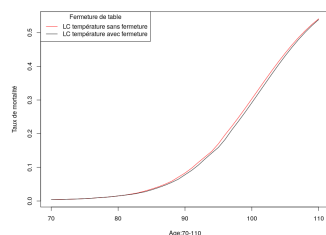


FIGURE 3.180 – Lee-Carter température - Fermetures de tables de 70 ans à 110 ans pour 2070 RU

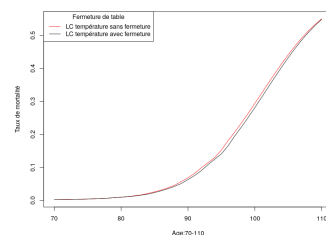


FIGURE 3.181 – Lee-Carter température - Fermetures de tables de 70 ans à 110 ans pour 2070 RU

En conclusion, pour chaque pays du portefeuille, les graphiques associés aux fermetures de tables ne présentent pas d'incohérence et de valeurs aberrantes et cette observation nous conforte dans leur emploi pour les valeurs projetées de taux de mortalité. En effet, il s'agit d'une étape primordiale pour contrer les instabilités des valeurs brutes aux grands âges.

3.8 Conclusion

Dans cette partie ont été modélisés des taux de mortalité relatifs aux modèles de Lee-Carter, de Lee-Carter température, de Plat et de SPO. Pour chaque modèle cité, des sensibilités ont été effectuées sur les paramètres afin de les ajuster au mieux aux données réelles de mortalité. En particulier, un intérêt particulier a été porté au calibrage du paramètre δ_x du modèle de Lee-Carter température avec une attention notamment concernant le pays choisi, certaines causes de décès, des tranches d'âges, la température, le sexe de la population sélectionnée ou encore le niveau socio-économique. Pour conclure, pour chaque pays du portefeuille étudié (le Royaume-Uni, la France et Israël), les paramètres retenus sont respectivement les maladies vectorielles, des tranches de 15 ans, la température maximale, une population mixte et le travail par niveau socio-économique n'a pas été retenu. Un travail a également été effectué en parallèle pour le choix des paramètres du modèle de SPO, avec en particulier une attention concernant le choix de la méthode de calcul de la corrélation, la plage de données de calibration, le choix de la température et le choix du paramètre a relatif à l'âge à partir duquel la température influence le niveau de santé d'une population. En conclusion, la corrélation choisie pour le modèle de SPO est la corrélation de Pearson pour des données allant de 1990 à 2018 avec la température maximale et un paramètre a valant 60 ans.

Cette analyse a notamment permis de définir le modèle de Lee-Carter température comme le modèle le plus pertinent pour intégrer la température à un modèle de taux de mortalité. En effet, après avoir effectué des sensibilités pour chaque paramètre des mo-

dèles afin qu'ils soient au plus proche des valeurs historiques, une comparaison a été faite afin d'émettre un jugement les concernant. Au moyen de tests statistiques, le modèle de Lee-Carter température est au moins aussi acceptable que ses concurrents et au mieux plus performant.

Il a ensuite été possible d'obtenir des prédictions à partir du modèle de Lee-Carter température jusqu'à horizon 2099 en y appliquant les cinq scénarios du GIEC, permettant ainsi de faire un lien avec la partie suivante qui vise à calculer le *Best Estimate Liabilities* du portefeuille. Il convient tout de même d'admettre que les taux de mortalité projetés comprennent un certain niveau d'incertitude. En effet, il se déterminent à partir des paramètres κ_t et T_t notamment qui évoluent eux-même dans un intervalle de confiance.

Chapitre 4

Impacts financiers du dérèglement climatique

Dans la partie précédente, les taux de mortalité sont projetés à horizon 2099 pour les modèles de Lee-Carter, Lee-Carter température, Plat et SPO. Une fois la fermeture de table appliquée, ces taux de mortalité peuvent permettre de calculer le *Best Estimate Liabilities* de PartnerRe.

4.1 Introduction et calcul du *Best Estimate Liabilities* sans réchauffement climatique

Il a été vu dans la partie 1.3.2 l'expression de la formule du *Best Estimate Liabilities* (BEL) :

$$BEL = \sum_{t=0}^n \frac{Flux\ sortants\ probables_t - Flux\ entrants\ probables_t}{(1 + r_t)^t} \quad (4.1)$$

où t est un pas de temps, r_t le taux d'actualisation sans risque et n la dernière période d'engagement de l'assureur ou du réassureur.

Différentes étapes se succèdent avant d'arriver au calcul du BEL.

1. Identification du type de risque et l'âge moyen de la population exposée. Il a été vu en partie 2.1.1 que les pays du portefeuille n'ont pas la même ampleur d'exposition aux risques de mortalité et de longévité.
2. Calcul du décrétement de la population à partir des taux de mortalité projetés : détermination de la probabilité de survie $p_{x,t} = 1 - q_{x,t}$ puis détermination de la probabilité de survie cumulée ${}_u p_{x,t}$ pendant u années aux âge x et année t .
3. Calcul des valeurs actuelles probables (VAP) de primes, frais et sinistres, et déduction du BEL à partir de l'âge d'entrée x et l'année d'évaluation t (ici 2022) :

- calcul des VAP de primes : $P = \sum_{i=1}^n \frac{P_i \times_i p_{x,t}}{(1+r_i)^i}$ où P_i représente les *cash flows* de primes après i années,
- calcul des VAP de coûts et frais : $C = \sum_{i=1}^n \frac{C_i \times_i p_{x,t}}{(1+r_i)^i}$ où C_i représente les *cash flows* de coûts et frais après i années,
- calcul des VAP de sinistres : $S = \sum_{i=1}^n \frac{SaR_i \times q_{x+i,t+i} \times_i p_{x,t}}{(1+r_i)^i}$ où SaR_i représente la *Sum at Risk* après i années.

Dans cette section, c'est le modèle de Lee-Carter température qui est retenu puisqu'il permet de prendre en considération les valeurs de la température dans les calculs de valeurs actuelles probables. Dans un premier temps, il convient de projeter le BEL sous l'hypothèse d'absence de dérèglement climatique. Alors, il est supposé que le paramètre température T_t du modèle reste constant entre 2022 et 2099 (scénario 0 : $+0^\circ C$). L'intérêt est d'abord porté aux contrats visant à couvrir des risques de mortalité et de longévité.

Dans ce contexte, les BEL associés respectivement aux risques de mortalité et de longévité valent €−352.047M et €406.212M. En cumulé, il reste globalement positif avec une valeur de €54.165M.

Risques de mortalité

Pays	(VAP) Prime	(VAP) Frais	(VAP) Sinistre	BEL
Royaume-Uni et Irlande (RU/I)	1 081.696	-130.654	-1 295.747	-347.364
Europe Continentale (EC)	134.126	-30.281	-109.003	-5.158
Moyen-Orient (MO)	59.586	-38.806	-17.142	3.638
Amérique latine (LATAM)	13.469	-1.803	-14.829	-3.163
Total	1 288.887	-201.544	-1 436.721	-352.047

Risques de longévité

Pays	(VAP) Prime	(VAP) Frais	(VAP) Sinistre	BEL
RU/I	7 049.953	-110.267	-6 533.474	406.212

Risques de mortalité et de longévité cumulés

Pays	(VAP) Prime	(VAP) Frais	(VAP) Sinistre	BEL
Total	8 338.830	-311.811	-7 970.195	54.165

4.2 Calcul du *Best Estimate Liabilities* avec réchauffement climatique

Après avoir estimé le BEL dans un contexte de stagnation de la température, il est possible de calculer l'impact financier du dérèglement climatique sur le portefeuille utilisé

pour l'étude à partir des cinq scénarios du GIEC.

Dans un premier temps, les valeurs actuelles probables sont recalculées pour les cinq scénarios mentionnés pour les contrats visant à couvrir les risques de mortalité et de longévité. En accord avec les tableaux suivants, plus la température augmente, plus l'impact financier est élevé. En effet, d'un côté le BEL associé au risque de mortalité augmente en négatif avec la température, ce qui est défavorable pour la compagnie. A l'inverse, avec l'augmentation de la température, le BEL associé au risque de longévité augmente en positif et la situation est favorable. En cumulé, le BEL passe de €54.165M pour un scénario sans dérèglement climatique à €57.509M dans le meilleur des cas pour un scénario où la température augmente de +1.4°. D'après les projections calculées, plus la température augmente pour les autres scénarios, plus la valeur du BEL diminue tout en restant positive.

Risques de mortalité

Pays	Scénario 0 +0°C	Scénario 1 +1.4°C	Scénario 2 +1.8°C	Scénario 3 +2.7°C	Scénario 4 +3.6°C	Scénario 5 +4.4°C
RU/I	-347.364	-347.364	-347.802	-348.406	-348.881	-349.783
EC	-5.158	-5.351	-5.356	-5.367	-5.370	-5.415
MO	3.638	3.629	3.629	3.628	3.627	3.625
LATAM	-3.163	-3.169	-3.169	-3.170	-3.170	-3.172
Total	-352.047	-352.255	-352.698	-353.315	-353.794	-354.745

Risques de longévité

Pays	Scénario 0 +0°C	Scénario 1 +1.4°C	Scénario 2 +1.8°C	Scénario 3 +2.7°C	Scénario 4 +3.6°C	Scénario 5 +4.4°C
RU/I	406.212	409.764	410.076	410.479	410.804	411.731

Risques de mortalité et de longévité cumulés

Pays	Scénario 0 +0°C	Scénario 1 +1.4°C	Scénario 2 +1.8°C	Scénario 3 +2.7°C	Scénario 4 +3.6°C	Scénario 5 +4.4°C
Total	54.165	57.509	57.378	57.164	57.01	56.986

Le fait que le BEL soit positif en cumulé s'explique par la plus grande exposition des produits visant à couvrir le risque de longévité du portefeuille étudié.

Le graphique suivant représente l'évolution des écarts de BEL entre le scénario où la température n'évolue pas entre 2022 et 2099 et les cinq autres scénarios d'évolution de la température. Ont été tracées les valeurs actuelles probables des risques de mortalité et de longévité. En accord avec ce graphique, les six premières années rencontrent un impact déficitaire tandis que les vingt années suivantes connaissent des *cash-flows* positifs. En

effet, les produits contenant un risque de mortalité ont un impact direct et instantané sur la valeur du BEL. Ces risques ont également une durée élevée, en résulte un impact de défaut aux années avancées. A l’opposé, les produits contenant un risque de longévité ont une durée plus faible qui compense l’impact de mortalité après quelques années de survie.

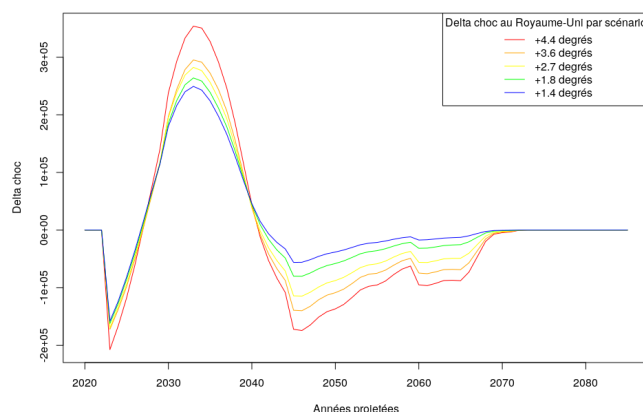


FIGURE 4.1 – Impact de la température sur le BEL au RU/I

En addition à l’analyse effectuée, il est intéressant d’observer l’impact du dérèglement climatique sur la valeur actuelle probable des montants de sinistres. A titre indicatif, les sinistres étant négatifs, une augmentation de 5% représente une situation défavorable et une augmentation du coût tandis qu’une diminution de -5% représente une diminution du coût et une situation favorable. Respectivement pour les risques de mortalité, longévité et les deux cumulés, les évolutions du montant de sinistre sont comprises dans $[0.20\%; 0.37\%]$, $[-0.08\%; -0.05\%]$ et $[-0.0075\%; -0.0014\%]$. En cumulé, comme pour le BEL, les tableaux révèlent une situation favorable pour le portefeuille et une compensation des risques.

Risque de mortalité

Pays	Scénario 0 $+0^{\circ}C$	Scénario 1 $+1.4^{\circ}C$	Scénario 2 $+1.8^{\circ}C$	Scénario 3 $+2.7^{\circ}C$	Scénario 4 $+3.6^{\circ}C$	Scénario 5 $+4.4^{\circ}C$
RU/I	- 1 295.747	0.21%	0.24%	0.29%	0.32%	0.39%
EC	- 109.003	0.18%	0.18%	0.19%	0.19%	0.24%
MO	- 17.142	0.05%	0.05%	0.06%	0.06%	0.07%
LATAM	-14.829	0.04%	0.04%	0.05%	0.05%	0.06%
Total	-1 436.721	0.20%	0.23%	0.28%	0.30%	0.37%

Risques de longévité

Pays	Scénario 0 +0°C	Scénario 1 +1.4°C	Scénario 2 +1.8°C	Scénario 3 +2.7°C	Scénario 4 +3.6°C	Scénario 5 +4.4°C
RU/I	- 6 533.474	-0.05%	-0.06%	-0.07%	-0.07%	-0.08%

Risques de mortalité et de longévité cumulés

Pays	Scénario 0 +0°C	Scénario 1 +1.4°C	Scénario 2 +1.8°C	Scénario 3 +2.7°C	Scénario 4 +3.6°C	Scénario 5 +4.4°C
Total	-7 970.195	-0.0042%	-0.0075%	-0.0074%	-0.0025%	-0.0014%

4.3 Réflexion sur les autres conséquences et risques du dérèglement climatique

Dans un second temps, il a été imaginé des scénarios croisés dans un contexte de hausse des températures. La température a un impact sur les conditions de vie des assurés et donc sur la morbidité qu'il convient de traiter dans cette partie. Mais encore, comme évoqué en partie 1.1.2, le dérèglement climatique peut avoir des conséquences économiques et favoriser par exemple des mouvements de rachat. Il a donc été imaginé en addition à l'impact sur les risques de mortalité et de longévité, des scénarios de rachat de contrats.

4.3.1 Risque de morbidité

L'impact de la température a été analysé pour les contrats visant à couvrir le risque de morbidité. Pour le portefeuille d'étude, seuls le Royaume-Uni/Irlande, l'Europe continentale et le Moyen-Orient présentent ce type de contrats. A noter qu'il n'est pas proposé dans cette partie de *stress tests* associés au maintien en invalidité ou incapacité mais uniquement des *stress tests* associés à leur incidence.

Dans le cas de la morbidité, les valeurs actuelles probables sont également calculées pour un scénario où la température n'évolue pas. Le montant du BEL est alors estimé à €-65.542M.

Risques de morbidité

Pays	(VAP) Prime	(VAP) Frais	(VAP) Sinistre	BEL
RU/I	160.455	-15.194	-173.261	-27.999
EC	26.516	-5.861	-45.810	-25.155
MO	53.365	-22.179	-43.574	-12.388
Total	240.336	-43.234	-262.645	-65.542

Comme pour les contrats visant à couvrir les risques de mortalité, les tableaux suivants révèlent que plus la température augmente, plus l'impact sur le BEL est important et défavorable. Selon le scénario choisi, la valeur du BEL passe progressivement de €-65.542M à €-66.526M, ce qui représente une diminution des revenus.

Risques de morbidité

Pays	Scénario 0 +0°C	Scénario 1 +1.4°C	Scénario 2 +1.8°C	Scénario 3 +2.7°C	Scénario 4 +3.6°C	Scénario 5 +4.4°C
RU/I	-27.999	-28.323	-28.354	-28.395	-28.426	-28.514
EC	-25.155	-25.289	-25.292	-25.298	-25.300	-25.330
MO	-12.388	-12.465	-12.505	-12.57	-12.622	-12.682
Total	-65.542	-66.077	-66.151	-66.263	-66.348	-66.526

En terme de montants de sinistres également, plus la température augmente, plus les dépenses augmentent, avec une évolution comprise dans l'intervalle [0.20%; 0.38%].

Risques de morbidité

Pays	Scénario 0 +0°C	Scénario 1 +1.4°C	Scénario 2 +1.8°C	Scénario 3 +2.7°C	Scénario 4 +3.6°C	Scénario 5 +4.4°C
RU/I	-173.261	0.19%	0.20%	0.23%	0.25%	0.30%
EC	-45.810	0.29%	0.30%	0.31%	0.32%	0.38%
MO	-43.574	0.17%	0.26%	0.42%	0.54%	0.67%
Total	-262.645	0.20%	0.23%	0.28%	0.31%	0.38%

Un cumul des valeurs actuelles probables des contrats visant à couvrir les risques de mortalité, longévité et mortalité a été calculé, permettant ainsi une vision globale du portefeuille. En fonction du scénario de température, un cumul des trois risques montre une sensibilité élevée en terme de calcul de BEL. Néanmoins, bien que la hausse des températures ait des impacts sur chaque type de contrat individuellement, ils se cumulent et révèlent finalement un mouvement infime sur les montants de sinistres. En effet, en fonction des scénarios de température, l'évolution des montants de sinistres varie dans l'intervalle [0.0000%; 0.0133%].

Risques de mortalité, morbidité et longévité cumulés

Pays	Scénario 0 +0°C	Scénario 1 +1.4°C	Scénario 2 +1.8°C	Scénario 3 +2.7°C	Scénario 4 +3.6°C	Scénario 5 +4.4°C
Total	-11.377	-8.568	-8.773	-9.099	-9.338	-9.540

Risques de mortalité, morbidité et longévité cumulés

Pays	Scénario 0 +0°C	Scénario 1 +1.4°C	Scénario 2 +1.8°C	Scénario 3 +2.7°C	Scénario 4 +3.6°C	Scénario 5 +4.4°C
Total	-8 232.840	0.0025%	0.0000%	0.0016%	0.0074%	0.0133%

4.3.2 Chocs de rachat

Deux scénarios de rachat ont été testés sur les contrats visant à couvrir les risques de mortalité et de morbidité séparément. Arbitrairement, le premier suppose que le taux de rachat augmente de 10% avec l'augmentation de la température. En effet, avec l'augmentation du nombre de sinistres en lien avec l'augmentation de la température, les assurés peuvent être incités à racheter leurs contrats pour compenser des éventuelles dépenses supplémentaires. Le second scénario suppose à l'inverse que le taux de rachat diminue de 10%. Cette hypothèse est également à tester puisque les assurés peuvent devenir plus averses au risque que le dérèglement climatique représente et ainsi conserver davantage leur assurance (comme ce fut le cas durant la crise COVID-19).

Chocs de rachat sur la mortalité

D'abord, il s'agit de se concentrer sur les contrats visant à couvrir les risques de mortalité en y appliquant successivement +10% puis -10% de rachat.

Avec l'application d'un taux de rachat de 10% sur les contrats couvrant le risque de mortalité, le montant du BEL augmente tout en restant négatif. Au mieux, il passe en effet à €-294.363M. Ce scénario améliore également le BEL global du portefeuille étudié avec jusqu'à €115.401M de revenu en cumulant les risques de mortalité et de longévité contre €57.509M sans l'augmentation du taux de rachat. Une augmentation des taux de rachat représente donc une situation favorable pour la compagnie.

Risques de mortalité avec +10% de rachat

Pays	Scénario 0 +0°C	Scénario 1 +1.4°C	Scénario 2 +1.8°C	Scénario 3 +2.7°C	Scénario 4 +3.6°C	Scénario 5 +4.4°C
RU/I	-347.364	-291.768	-292.154	-292.684	-293.101	-293.919
EC	-5.158	-3.524	-3.529	-3.540	-3.543	-3.587
MO	3.638	3.911	3.910	3.910	3.909	3.907
LATAM	-3.163	-2.982	-2.982	-2.982	-2.983	-2.984
Total	-352.047	-294.363	-294.755	-295.296	-295.718	-296.583

Risques de mortalité et de longévité avec +10% de rachat

Pays	Scénario 0 +0°C	Scénario 1 +1.4°C	Scénario 2 +1.8°C	Scénario 3 +2.7°C	Scénario 4 +3.6°C	Scénario 5 +4.4°C
Total	54.165	115.401	115.321	115.183	115.086	115.148

Sur les montants de sinistres, une augmentation du taux de rachat de +10% engendre un impact plus important que précédemment. Par exemple, pour une augmentation de +1.4°C d'ici 2099, le coût de sinistre diminue de -3.83% contre 0.20% sans rachat. Ce scénario est donc très favorable, avec une évolution comprise dans l'intervalle

$[-3.83\%; -3.68\%]$ pour les risques de mortalité isolés. En cumulant les risques de mortalité et de longévité, cet intervalle devient $[-0.7353\%; -0.7282\%]$, soit une évolution favorable.

Risques de mortalité avec +10% de rachat

Pays	Scénario 0 $+0^{\circ}C$	Scénario 1 $+1.4^{\circ}C$	Scénario 2 $+1.8^{\circ}C$	Scénario 3 $+2.7^{\circ}C$	Scénario 4 $+3.6^{\circ}C$	Scénario 5 $+4.4^{\circ}C$
RU/I	- 1 295.747	-4.09%	-4.06%	-4.01%	-3.98%	-3.92%
EC	- 109.003	-1.50%	-1.49%	-1.48%	-1.48%	-1.44%
MO	- 17.142	-1.59%	-1.59%	-1.59%	-1.58%	-1.57%
LATAM	-14.829	-1.22%	-1.22%	-1.22%	-1.22%	-1.21%
Total	-1 436.721	-3.83%	-3.81%	-3.76%	-3.73%	-3.68%

Risques de mortalité et de longévité avec +10% de rachat

Pays	Scénario 0 $+0^{\circ}C$	Scénario 1 $+1.4^{\circ}C$	Scénario 2 $+1.8^{\circ}C$	Scénario 3 $+2.7^{\circ}C$	Scénario 4 $+3.6^{\circ}C$	Scénario 5 $+4.4^{\circ}C$
Total	-7 970.195	-0.7321%	-0.7353%	-0.7352%	-0.7303%	-0.7282%

Le second scénario de -10% , largement défavorable pour la compagnie, est imaginé sur les produits visant à couvrir le risque de mortalité. En effet, le montant de BEL diminue excessivement allant jusqu'à $\text{€}-419.824M$ contre $\text{€}-354.745M$ maximum sans diminution du taux de rachat. En cumulant le risque de mortalité et de longévité dans ce contexte, le BEL reste négatif. Dans ce sens, une diminution du taux de rachat semble être un scénario risqué et défavorable pour la compagnie.

Risques de mortalité avec -10% de rachat

Pays	Scénario 0 $+0^{\circ}C$	Scénario 1 $+1.4^{\circ}C$	Scénario 2 $+1.8^{\circ}C$	Scénario 3 $+2.7^{\circ}C$	Scénario 4 $+3.6^{\circ}C$	Scénario 5 $+4.4^{\circ}C$
RU/I	-347.364	-409.681	-410.180	-410.873	-411.419	-412.417
EC	-5.158	-7.303	-7.308426	-7.320	-7.323	-7.368
MO	3.638	3.333	3.333	3.332	3.331	3.329
LATAM	-3.163	-3.366	-3.366	-3.367	-3.367	-3.368
Total	-352.047	-417.017	-417.521	-418.228	-418.778	-419.824

Risques de mortalité et de longévité avec -10% de rachat

Pays	Scénario 0 $+0^{\circ}C$	Scénario 1 $+1.4^{\circ}C$	Scénario 2 $+1.8^{\circ}C$	Scénario 3 $+2.7^{\circ}C$	Scénario 4 $+3.6^{\circ}C$	Scénario 5 $+4.4^{\circ}C$
Total	54.165	-7.253	-7.445	-7.749	-7.974	-8.093

D'un autre côté, le phénomène se traduit par une augmentation générale des montants de sinistres pouvant aller jusqu'à 0.8189% en cumulé par rapport à un scénario où la

température stagne. Pour un tel scénario, l'évolution défavorable du montant de sinistre est comprise dans l'intervalle [4.70%; 4.91%], qui devient [0.8051%; 0.8189%] en cumulé avec le risque de longévité.

Risques de mortalité avec –10% de rachat

Pays	Scénario 0 +0°C	Scénario 1 +1.4°C	Scénario 2 +1.8°C	Scénario 3 +2.7°C	Scénario 4 +3.6°C	Scénario 5 +4.4°C
RU/I	- 1 295.747	5.01%	5.05%	5.11%	5.15%	5.23%
EC	- 109.003	1.97%	1.97%	1.98%	1.99%	2.03%
MO	- 17.142	1.78%	1.78%	1.79%	1.78%	1.80%
LATAM	-14.829	1.37%	1.37%	1.37%	1.38%	1.38%
Total	-1 436.721	4.70%	4.74%	4.79%	4.83%	4.91%

Risques de mortalité et de longévité cumulés avec –10% de rachat

Pays	Scénario 0 +0°C	Scénario 1 +1.4°C	Scénario 2 +1.8°C	Scénario 3 +2.7°C	Scénario 4 +3.6°C	Scénario 5 +4.4°C
Total	-7 970.195	0.8068%	0.8051%	0.8068%	0.8135%	0.8189%

Chocs de rachat sur la morbidité

Ensuite, les taux de rachat sont appliqués au risque de morbidité.

Avec l'application d'un taux de rachat de 10%, en cumulant les risques de mortalité, de longévité et de morbidité, le BEL augmente en positif jusqu'à €56.857M de revenu contre €–8.568M maximum sans scénario de rachat. Dans ce sens, une augmentation du taux de rachat représente une situation avantageuse pour le portefeuille étudié.

Risques de morbidité avec +10% de rachat

Pays	Scénario 0 +0°C	Scénario 1 +1.4°C	Scénario 2 +1.8°C	Scénario 3 +2.7°C	Scénario 4 +3.6°C	Scénario 5 +4.4°C
RU/I	-27.999	-24.701	-24.729	-24.767	-24.797	-24.880
EC	-25.155	-24.947	-24.950	-24.957	-24.959	-24.989
MO	-12.388	-8.896	-8.926	-8.977	-9.017	-9.066
Total	-65.542	-58.544	-58.605	-58.701	-58.773	-58.935

Risques de mortalité, de longévité et de morbidité avec +10% de rachat

Pays	Scénario 0 +0°C	Scénario 1 +1.4°C	Scénario 2 +1.8°C	Scénario 3 +2.7°C	Scénario 4 +3.6°C	Scénario 5 +4.4°C
Total	-11.377	56.857	56.716	56.482	56.313	56.213

En terme de montants de sinistres, l'impact croisé de la température et du scénario de rachat est favorable pour la compagnie puisque son évolution est comprise dans l'intervalle $[-2.66\%; -2.52\%]$ pour le risque de morbidité isolé et dans $[-0.7962\%; -0.7852\%]$ en cumulant les risques.

Risques de morbidité avec +10% de rachat

Pays	Scénario 0 +0°C	Scénario 1 +1.4°C	Scénario 2 +1.8°C	Scénario 3 +2.7°C	Scénario 4 +3.6°C	Scénario 5 +4.4°C
RU/I	-173.261	-1.90%	-1.89%	-1.87%	-1.85%	-1.80%
EC	-45.810	-0.45%	-0.45%	-0.43%	-0.43%	-0.36%
MO	-43.574	-8.02%	-7.95%	-7.83%	-7.74%	-7.62%
Total	-262.645	-2.66%	-2.64%	-2.61%	-2.58%	-2.52%

Risques de mortalité, de longévité et de morbidité avec +10% de rachat

Pays	Scénario 0 +0°C	Scénario 1 +1.4°C	Scénario 2 +1.8°C	Scénario 3 +2.7°C	Scénario 4 +3.6°C	Scénario 5 +4.4°C
Total	-8 232.840	-0.7937%	-0.7962%	-0.7949%	-0.7893%	-0.7852%

Un dernier scénario avec -10% de rachat est imaginé sur les contrats visant à couvrir le risque de morbidité. Il s'avère que ce scénario a un impact défavorable pour le portefeuille d'étude avec une diminution considérable du BEL qui se retrouve négatif pour tous les scénarios où la température augmente. Dans le pire des cas, le BEL vaut alors $\text{€}-75.099M$ pour le risque de morbidité isolé contre $\text{€}-66.526M$ pour un scénario sans rachat. Ce scénario est ainsi risqué et désavantageux.

Risques de morbidité avec -10% de rachat

Pays	Scénario 0 +0°C	Scénario 1 +1.4°C	Scénario 2 +1.8°C	Scénario 3 +2.7°C	Scénario 4 +3.6°C	Scénario 5 +4.4°C
RU/I	-27.999	-32.219	-32.252	-32.297	-32.331	-32.424
EC	-25.155	-25.648	-25.651	-25.657	-25.659	-25.689
MO	-12.388	-16.707	-16.758	-16.841	-16.909	-16.986
Total	-65.542	-74.574	-74.661	-74.795	-74.899	-75.099

Risques de mortalité, de longévité et de morbidité avec -10% de rachat

Pays	Scénario 0 +0°C	Scénario 1 +1.4°C	Scénario 2 +1.8°C	Scénario 3 +2.7°C	Scénario 4 +3.6°C	Scénario 5 +4.4°C
Total	-11.377	-81.827	-82.106	-82.544	-82.873	-83.192

Enfin, le scénario de rachat présenté implique une augmentation des montants de sinistres dans l'intervalle $[3.44\%; 3.63\%]$, ce qui a pour conséquence une augmentation des montants de sinistres dans l'intervalle $[0.8901\%; 0.9087\%]$ en cumulé sur l'ensemble du portefeuille étudié.

Risques de morbidité avec -10% de rachat

Pays	Scénario 0 $+0^{\circ}C$	Scénario 1 $+1.4^{\circ}C$	Scénario 2 $+1.8^{\circ}C$	Scénario 3 $+2.7^{\circ}C$	Scénario 4 $+3.6^{\circ}C$	Scénario 5 $+4.4^{\circ}C$
RU/I	-173.261	2.44%	2.45%	2.48%	2.50%	2.55%
EC	-45.810	1.07%	1.08%	1.10%	1.10%	1.16%
MO	-43.574	9.91%	10.03%	10.22%	10.37%	10.55%
Total	-262.645	3.44%	3.47%	3.52%	3.56%	3.63%

Risques de mortalité, de longévité et de morbidité avec -10% de rachat

Pays	Scénario 0 $+0^{\circ}C$	Scénario 1 $+1.4^{\circ}C$	Scénario 2 $+1.8^{\circ}C$	Scénario 3 $+2.7^{\circ}C$	Scénario 4 $+3.6^{\circ}C$	Scénario 5 $+4.4^{\circ}C$
Total	-8 232.840	0.8909%	0.8901%	0.8935%	0.9012%	0.9087%

4.4 Conclusion

En conclusion, des scénarios croisés peuvent être imaginés prenant en compte la hausse des températures à horizon 2099. Peuvent ainsi être cumulés les BEL associés aux contrats visant à couvrir les risques de mortalité, de longévité et de morbidité afin de visualiser leur impact sur le portefeuille étudié. Dans cette partie, il a été montré que pour chaque risque individuellement, plus la température augmente, plus l'impact est important. Néanmoins, en cumulé ces impacts peuvent se compenser et mènent à un mouvement globalement favorable dans l'intervalle $[-0.0042\%; 0.0014\%]$ lorsque sont uniquement considérés les risques de mortalité et de longévité, et faiblement défavorable dans $[0.0000\%; 0.0133\%]$ lorsque le risque de morbidité est ajouté.

Par contre, un changement significatif dans le comportement des assurés peut avoir un impact sur les taux de rachat, plus important encore que ceux sur la mortalité, la longévité et la morbidité eux-mêmes. Dans un contexte de dérèglement climatique, un scénario favorable serait une augmentation de taux de rachat. A l'inverse, une diminution du taux de rachat pourrait constituer un véritable risque entraînant une augmentation des provisions en cas d'augmentation de la température. Ici, le phénomène qui permet de maintenir un niveau de revenu acceptable pour le portefeuille étudié au sein de PartnerRe est le fait que son portefeuille soit diversifié, ce qui garantit une compensation et une mutualisation des risques.

Pourcentage d'impact des chocs sur la VAP de sinistres

Risques	Scénario 1 +1.4°C	Scénario 2 +1.8°C	Scénario 3 +2.7°C	Scénario 4 +3.6°C	Scénario 5 +4.4°C
mortalité et longévité	-0.0042%	-0.0075%	-0.0074%	-0.0025%	-0.0014%
mortalité et longévité (+10% de rachat)	-0.7321%	-0.7353%	-0.7352%	-0.7303%	-0.7282%
mortalité, longévité (-10% de rachat)	0.8068%	0.8051%	0.8068%	0.8135%	0.8189%
mortalité, longévité et morbidité	0.0025%	0.0000%	0.0016%	0.0074%	0.0133%
mortalité, longévité et morbidité (+10% de rachat)	-0.7937%	-0.7962%	-0.7949%	-0.7893%	-0.7852%
mortalité, longévité et morbidité (-10% de rachat)	0.8909%	0.8901%	0.8935%	0.9012%	0.9087%

Chapitre 5

Conclusion

Bien que des travaux commencent à être effectués par la communauté scientifique, il est important de souligner que ce mémoire est avant tout un travail de recherche et une initiation à la réflexion de l'intégration de la température à des modèles de taux de mortalité au sein de l'entreprise. Il s'agit aussi d'un travail visant l'évaluation approximative de l'impact du dérèglement climatique sur les provisions.

5.1 Modèle de Lee-Carter température et limites

Dans le cadre de ce mémoire, une attention particulière a été portée sur la composante climatique et la hausse des températures et son impact sur les risques biométriques. L'attention s'est notamment portée sur le modèle de Lee-Carter température, un dérivé du modèle de Lee-Carter qui a été inspiré par le modèle de Lee-Carter par cause de décès.

Il s'avère que ce modèle est extrêmement sensible aux paramètres choisis et il convient de se familiariser avec ses limites. Dans un premier temps, des causes de décès ont été sélectionnées pour la modélisation, néanmoins le choix de ces dernières est propre à chaque interprétation. En effet, les critères de sélection des causes de décès peuvent varier, ce qui entraîne une variation des résultats du modèle. Pour cause, il faut prendre du recul sur la qualité des données en lien avec la température. En effet, entre la mort d'une personne et la mention du décès dans la base de données en passant par le certificat de décès, l'information peut être remaniée et modifiée. Il faut aussi prendre en compte le caractère "accélérateur de décès" de la température qui n'est pas mentionné dans le certificat de décès. En particulier, les données qui reflètent la cause "vagues de chaleurs", ne sont pas en accord avec les affirmations de l'Organisation Mondiale de la Santé qui annoncent une augmentation du nombre de décès en lien avec la température. En parallèle, il convient de prendre du recul quant à certains discours sur les causes de décès en lien avec la température : alors que certains médias visent à diffuser des informations sensationnelles telles que le nombre de morts causé par des maladies tropicales en Europe, des sujets plus importants mais susceptibles de moins captiver l'audimat peuvent être négligés tels que

le nombre de morts en lien avec la déshydratation. Il est donc nécessaire de faire preuve de discernement afin de sélectionner des causes de décès pertinentes à l'étude. Mais encore, le modèle de Lee-Carter température se doit d'être remis en question au sujet de l'hypothèse forte "les causes de décès choisies sont uniquement liées à la température". Dans l'absolu, cette hypothèse ne peut pas être vraie au regard de la qualité de données qu'il convient de mettre en doute mais également puisque d'autres facteurs rentrent en jeu (alimentation, niveau de richesse, progrès médicaux).

Dans le cadre de ce mémoire, diverses sensibilités ont été effectuées sur les causes de décès, les bandes d'âges, le sexe ou le niveau socio-économique associés à la population étudiée jusqu'à obtenir un modèle jugé pertinent pour l'étude. Enfin, ce modèle a été comparé à d'autres modèles tels que le modèle de Lee-Carter, le modèle de Plat et le modèle de SPO et il s'avère être le plus adapté pour l'intégration de la température.

Il convient également de justifier pourquoi le modèle de Lee-Carter température a été préféré au modèle de SPO dans le cadre de ce mémoire. D'abord, le modèle de Lee-Carter température permet de faire varier les scénarios de température et donc de quantifier l'impact au niveau des taux de mortalité, ce qui n'est pas le cas pour le modèle de SPO. De plus, contrairement au modèle de Lee-Carter température, il ne semble pas prendre en considération toute la population vulnérable à la température. En effet, avec le choix du paramètre a effectué, la corrélation entre la température et la mortalité des enfants ou des femmes enceintes par exemple est négligée. Au vu du nombre de paramètres à projeter pour ce modèle, les projections de taux de mortalité font preuve d'une grande incertitude. Enfin, l'idée même du modèle est de faire la corrélation entre les taux de mortalité et les températures historiques, ce qu'il convient de remettre en question étant donné l'évolution de la sensibilité des populations à la température avec le temps. L'étude révèle tout de même que le modèle de Lee-Carter température est mieux adapté à certains pays qu'à d'autres. Effectivement, il est moins pertinent pour Israël que pour le Royaume-Uni et la France et il pourrait être judicieux de chercher un autre modèle pour ce pays.

L'intégration de la variable température permet ainsi d'évaluer un impact financier à horizon futur et plusieurs scénarios ont été imaginés : des scénarios d'augmentation de température et différents scénarios de rachat sur les contrats visant à couvrir les risques de mortalité, de longévité et de morbidité. En fonction du scénario choisi sur chaque type de contrat individuellement, les impacts financiers varient, néanmoins il convient de remarquer que plus la température augmente, plus ils sont importants. Au global néanmoins, les valeurs actuelles probables semblent se compenser et le niveau de revenu reste acceptable, ce qui s'explique par la diversification du portefeuille de PartnerRe garantissant une bonne mutualisation des risques. En supposant que les conditions de l'accord de Paris soient respectées (limite de l'élévation de la température à $+2^{\circ}\text{C}$), alors l'impact financier sur les montants de sinistres du portefeuille étudié devrait être compris dans

l'intervalle $[-0.7949\%; 0.8935\%]$ selon des scénarios d'augmentation de taux de rachat et de diminution de taux de rachat respectivement. Cet écart relativement faible peut par ailleurs s'expliquer par le choix de la cause de décès qui n'est pas forcément représentative du dérèglement climatique dans son ensemble malgré la qualité des données.

5.2 Ouverture

Comme expliqué précédemment, le modèle de Lee-Carter température a été développé dans un but d'initiation à la réflexion de l'intégration de la température à des modèles de taux de mortalité. Ainsi, il convient de réfléchir aux solutions permettant d'améliorer ce modèle et de l'analyser en détail.

D'abord, dans le cadre de ce mémoire, il a été imaginé que les maladies ont un impact instantané sur les taux de décès, or il arrive qu'il y ait un retard (allant de quelques jours à quelques années) entre la survenance de la cause et le décès lui-même. Il pourrait être pertinent d'analyser le temps moyen de retard associé à chaque maladie afin de mieux modéliser les taux de mortalité.

Des modélisations ont également été faites par sexe mais n'ont pas été retenues. Il pourrait être pertinent de distinguer les maladies qui touchent en moyenne davantage les hommes et celles qui touchent davantage les femmes. Par exemple, la cause de décès "mort durant l'accouchement, en lien avec la chaleur" pourrait être retenue pour une étude sur les femmes uniquement. Aussi, une étude par niveau socio-économique n'a pas été retenue dans le cadre de ce mémoire car il n'y avait plus la distinction par pays. Il pourrait cependant être pertinent d'analyser les causes de décès sous-jacentes par niveau socio-économique et pour chaque pays puisque la population assurée et réassurée du portefeuille s'apparente à un niveau socio-économique élevé. Plus globalement, il s'agit du niveau socio-économique européen. Dans la même idée, si des données supplémentaires avaient été à disposition, il aurait été pertinent de dresser des taux de morbidité associés à des causes spécifiques, différentes des causes de décès. Cette distinction aurait permis de saisir les aspects différents de santé de la population et de dresser les impacts financiers propres à la morbidité. Un travail aurait également pu être effectué sur les lois de maintien en invalidité/dépendance afin de juger de l'impact de la température à ce niveau.

D'un autre côté, même si des intervalles de confiances ont été dressés sur les probabilités de décès, il n'ont pas été appliqués aux impacts financier, ce qui aurait pu donner une meilleure vision budgétaire à horizon futur. Concernant les impacts financiers, des mouvements de rachat ont été imaginés mais la température peut également avoir d'autres impacts sur les marchés financiers, comme des mouvements de taux d'intérêt. En particulier, il serait pertinent d'observer une augmentation des taux d'intérêt dans le cas où la population se retrouve dans une situation financière difficile avec un coût de la vie élevé. Une recherche sur les provisions pour sinistres à payer (PSAP) a également permis de souligner qu'avec le COVID-19, les délais de déclaration de sinistres se sont accentués. Il

pourrait être utile d'étendre le phénomène au dérèglement climatique. Par ailleurs, il faut s'intéresser à la plage d'étude qui jusqu'ici a pris en considération les années entre 1990 et 2018, c'est-à-dire avant COVID-19. Il faudrait analyser l'interaction entre les impacts du COVID-19 à long terme et la température. Dans ce contexte, un impact encore plus important pourrait-être observé avec une surmortalité générale et une morbidité accentuée. Ce travail ne pourra pas être réalisé dans l'immédiat étant donné le manque de données d'observation, néanmoins il permet de se questionner quant aux conséquences à venir sur la mortalité.

Pour terminer, si la température peut avoir un impact sur les risques techniques et sur le comportement des assurés, il est primordial de souligner que les risques étudiés dans le cadre de ce mémoire peuvent ne représenter qu'une infime partie de l'ampleur du dérèglement climatique. Cela révèle avec évidence que les études en lien avec le dérèglement climatique en sont encore à leurs balbutiements. Face à un phénomène d'une telle complexité, un investissement de taille est requis afin de mettre en place des solutions adaptées et durables à son encontre.

Bibliographie

- [App, 2022] (2022). Application guidance on running climate change materiality assessment and using climate change scenarios in the orsa. *European Insurance and Occupational Pensions Authority*.
- [ACP, 2022] (2022). La gouvernance des risques liés au changement climatique dans le secteur de l'assurance. *ACPR Banque de France*.
- [LC, 2023] (2023). Canicule : l'europe écrasée par des vagues de chaleur. *La Croix*.
- [EPA, 2023] (2023). Climate change and the health of older adults.
- [Don, 2023] (2023). Données mondiales. <https://www.donneesmondiales.com/>.
- [Glo, 2023] (2023). Goba1 climat. <https://global-climat.com/>.
- [Hea, 2023] (2023). Health data. <https://www.healthdata.org/>.
- [HMD, 2023] (2023). Human mortality database. <https://www.mortality.org/>.
- [LAT, 2023] (2023). Latin american mortality database. <https://www.sccc.wisc.edu/>.
- [Met, 2023] (2023). Met office. <https://www.metoffice.gov.uk/>.
- [MF, 2023] (2023). Meteo france. <https://meteofrance.fr/>.
- [Cli, 2023] (2023). National centers for environmental information. <https://www.ncei.noaa.gov/>.
- [ONS, 2023] (2023). Office for national statistics. <https://www.ons.gov.uk/>.
- [Min, 2023] (2023). Prédictions du giec. <https://meteofrance.fr/>.
- [A. CHAUDHRY et TANG, 2022] A. CHAUDHRY, M. LEITSHKIS, H. L. et TANG, Q. (2022). Modelling mortality risk of climate change. *ECA*.
- [AELLEN, 2022] AELLEN, N. (2022). Climate science : A summary for actuaries. *International Actuarial Association*.
- [AILLIOT, 2022] AILLIOT, P. (2022). Cours de séries temporelles. *EURIA*.
- [BEHAR, 1976] BEHAR, L. (1976). Des tables de mortalite aux xvii e et xviii e siecles.
- [CHOU, 2018] CHOU, M. (2018). Tables de mortalité prospectives best estimate sur un portefeuille obsèques. *Dauphine Université Paris, Institut des Actuaire*s.
- [COLENTZ, 2023] COLENTZ, A. (2023). Conséquences du changement climatique, les vagues de chaleur marines font peser des menaces durables dans l'océan comme sur terre.

- [Commisson, 2023] COMMISSON, E. (2023). Consequences of climate change.
- [de la Santé, 2021] de la SANTÉ, O. M. (2021). Changement climatique et santé.
- [DOUKOURE, 2023] DOUKOURE, H. S. (2023). Mise en place d'un modèle additif généralisé (gam) bayésien pour les swaps de longévité dans le contexte d'une analyse d'expérience. *Institut des Actuaire*s.
- [européen, 2015] EUROPÉEN, C. (2015). Accord de paris sur le changement climatique.
- [FALL, 2021] FALL, P. C. (2021). Intégration de facteurs liés à la température dans la modélisation du risque de mortalité. *Institut des actuaire*s.
- [FERNANDEZ, 2023] FERNANDEZ, C. (2023). Froid ou chaud : lequel vous tuera en premier ?
- [FOURNASSON, 2023] FOURNASSON, L. (2023). 275 milliard de dollars, c'est le coût des catastrophes naturelles dans le monde en 2022.
- [France, 2023] FRANCE, O. (2023). Les inondations de châteaulin et de pleyben sont-elles une fatalité ?
- [GERMAIN, 2022] GERMAIN, V. (2022). Prise en compte du changement climatique dans la modélisation des risques biométriques et financiers. *Institut des actuaire*s.
- [Guardian, 2023] GUARDIAN, T. (2023). Suicides indicate wave of doomerism over escalating climate crisis.
- [HUET et RAMSTEIN, 2022] HUET, S. et RAMSTEIN, G. (2022). *Le climat en 100 questions*. Texto, 48, rue de Faubourg-Montmartre - 75009 Paris.
- [M. SEKLECKA et C.O'HARE, 2015] M. SEKLECKA, A. P. et C.O'HARE (2015). Mortality effects of temperature changes in the united kingdom.
- [MARCHETTI, 2022] MARCHETTI, P. (2022). On sait enfin pourquoi les femmes ont plus froid que les hommes !
- [MOIVRE, 1725] MOIVRE, A. D. (1725). Annuities upon lives : or, the valuation of annuities upon any number of lives ; as alfo, of reversions.
- [Organization, 2018] ORGANIZATION, W. H. (2018). Heat and health.
- [P. MILLOSOVICH et KAISHEV, 2022] P. MILLOSOVICH, A. V. et KAISHEV, V. (2022). Package 'stmomo'.
- [PLANCHET et THEROND, 2011] PLANCHET, F. et THEROND, P. (2011). Modélisation statistique des phénomènes de durée. *Assurance Audit Actuariat*.
- [VERMET, 2023] VERMET, F. (2023). Apprentissage statistique : une approche connexionniste. Cours dispensé à l'EURIA.

Table des acronymes

ACPR	Autorité de Contrôle Prudentiel
ARIMA	<i>Autoregressive Integrated Moving Average</i>
BEL	<i>Best Estimates Liabilities</i>
CoC	<i>Cost of Capital</i>
EIOPA	<i>European Insurance and Occupational Pensions Authority</i>
EURIA	<i>European Institut of Actuaries</i>
GIEC	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
HMD	<i>Human Mortality DataBase</i>
MCR	<i>Minimum Captial Requirement</i>
MR	Marge pour Risque
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Économique
ORSA	<i>Own Risk and Solvency Assesment</i>
SaR	<i>Sum at Risk</i>
SCR	<i>Solvency Capital Requirement</i>
SDI	<i>Social Development Index</i>
VAP	Valeur Actuelle Probable

Table des figures

1	Lee-Carter température - δ_t RU	vi
2	Lee-Carter température - δ_t FR	vi
3	Lee-Carter température - δ_t ISR	vi
4	Temperature Lee-Carter - δ_t UK	xi
5	Temperature Lee-Carter - δ_t FR	xi
6	Temperature Lee-Carter - δ_t ISR	xi
1.1	La Terre sans et avec GES	2
1.2	Simulations de différents scénarios d'évolution de la température ($1.5^\circ C$, $2^\circ C, 4^\circ C$) depuis la période préindustrielle (1850-1900) [App, 2022]	6
1.3	Organigramme des solutions de transfert du risque	11
1.4	Risques dans la formule standard	16
2.1	Répartition des traités du portefeuille EMELA	20
2.2	Nombre de traités EMELA	21
2.3	Couvertures EMELA	21
2.4	BEL EMELA	21
2.5	VAP de sinistres EMELA	21
2.6	Prédictions du GIEC à horizon 2100	26
2.7	Lee-Carter - κ_t ajusté et κ_t non ajusté	29
2.8	Réseau de neurones	36
3.1	Lee-Carter - $\log(\mu_{x,t})$ au Royaume-Uni en fonction de l'âge x et l'année t .	45
3.2	Lee-Carter - Comparaison de α_x et β_x au Royaume-Uni	45
3.3	Lee-Carter - Comparaison de κ_t au Royaume-Uni avec et sans ajustement	46
3.4	Lee-Carter - $\ln(\mu_{x,t})$ au Royaume-Uni pour l'année 1998	46
3.5	Lee-Carter - $\ln(\mu_{x,t})$ au Royaume-Uni pour l'année 2008	46
3.6	Lee-Carter - $\ln(\mu_{x,t})$ au Royaume-Uni pour l'année 2018	46
3.7	Lee-Carter - $\ln(\mu_{x,t})$ au Royaume-Uni pour l'âge 45 ans	47
3.8	Lee-Carter - $\ln(\mu_{x,t})$ au Royaume-Uni pour l'âge 65 ans	47
3.9	Lee-Carter - $\ln(\mu_{x,t})$ au Royaume-Uni pour l'âge 85 ans	47
3.10	Lee-Carter - Résidus 3D du modèle au Royaume-Uni	47
3.11	Lee-Carter - Résidus 2D du modèle au Royaume-Uni	47
3.12	Lee-Carter - Visualisation des résidus du modèle au Royaume-Uni	48
3.13	Lee-Carter température - $\ln(\mu_{x,t}^{(1)})$ au Royaume-Uni	50

3.14	Lee-Carter température - $\alpha_x^{(1)}$ au Royaume-Uni	50
3.15	Lee-Carter température - Températures maximales au Royaume-Uni . . .	50
3.16	Lee-Carter température - Températures maximales centrées T_t au Royaume-Uni	50
3.17	Lee-Carter température - δ_t pour le Royaume-Uni	51
3.18	Lee-Carter température - δ_t pour la France	51
3.19	Lee-Carter température - δ_t pour Israël	51
3.20	Lee-Carter température - α_x au Royaume-Uni	52
3.21	Lee-Carter température - δ_t au Royaume-Uni	52
3.22	Lee-Carter température - Températures maximales centrées T_t au Royaume-Uni	52
3.23	Lee-Carter température - β_x au Royaume-Uni	52
3.24	Lee-Carter température - κ_t au Royaume-Uni	52
3.25	Lee-Carter température - Intervalle de confiance des q_x en 1998 au Royaume-Uni	53
3.26	Lee-Carter température - Taux de mortalité pour 1998 au Royaume-Uni .	53
3.27	Lee-Carter température - Taux de mortalité pour 2008 au Royaume-Uni .	53
3.28	Lee-Carter température - Taux de mortalité pour 2018 au Royaume-Uni .	53
3.29	Lee-Carter température - Taux de mortalité pour 45 ans au Royaume-Uni	54
3.30	Lee-Carter température - Taux de mortalité pour 65 ans au Royaume-Uni	54
3.31	Lee-Carter température - Taux de mortalité pour 85 ans au Royaume-Uni	54
3.32	Lee-Carter température - Décès par âge pour l'asthme RU	56
3.33	Lee-Carter température - Décès par année pour l'asthme RU	56
3.34	Lee-Carter température - Nombre de morts pour les autres causes RU . .	57
3.35	Lee-Carter température - Nombre de morts pour les expositions de chaleur et de froid RU	57
3.36	Lee-Carter température - δ_x pour (1) RU	59
3.37	Lee-Carter température - δ_x pour (1)+(2) RU	59
3.38	Lee-Carter température - δ_x pour (1)+(3) RU	59
3.39	Lee-Carter température - δ_x (1)+(2)+(3) RU	59
3.40	Lee-Carter température - Q-Q pour (1) pour le RU	59
3.41	Lee-Carter température - Q-Q pour (1)+(2) RU	59
3.42	Lee-Carter température - Q-Q pour (1)+(3) RU	59
3.43	Lee-Carter température - Q-Q pour (1)+(2)+(3) RU	59
3.44	Lee-Carter température - δ_x pour (1) FR	60
3.45	Lee-Carter température - δ_x pour (1)+(2) FR	60
3.46	Lee-Carter température - δ_x pour (1)+(3) FR	60
3.47	Lee-Carter température - δ_x (1)+(2)+(3) FR	60
3.48	Lee-Carter température - δ_x pour (1) ISR	61
3.49	Lee-Carter température - δ_x pour (1)+(2) ISR	61
3.50	Lee-Carter température - δ_x pour (1)+(3) ISR	61
3.51	Lee-Carter température - δ_x (1)+(2)+(3) ISR	61
3.52	Lee-Carter température - δ_x avec une bande 5 ans RU	63

3.53	Lee-Carter température - δ_x avec une bande 15 ans RU	63
3.54	Lee-Carter température - δ_x avec une bande 45 ans RU	63
3.55	Lee-Carter température - δ_x avec une bande 5 ans FR	64
3.56	Lee-Carter température - δ_x avec une bande 15 ans FR	64
3.57	Lee-Carter température - δ_x avec une bande 45 ans FR	64
3.58	Lee-Carter température - δ_x avec une bande 5 ans ISR	65
3.59	Lee-Carter température - δ_x avec une bande 15 ans ISR	65
3.60	Lee-Carter température - δ_x avec une bande 45 ans ISR	65
3.61	Lee-Carter température - Trois températures RU	66
3.62	Lee-Carter température - Trois températures FR	66
3.63	Lee-Carter température - Trois températures ISR	66
3.64	Lee-Carter température - δ_x pour la température maximale RU	66
3.65	Lee-Carter température - δ_x pour la température moyenne RU	66
3.66	Lee-Carter température - δ_x pour la température minimale RU	66
3.67	Lee-Carter température - δ_x pour la température maximale FR	67
3.68	Lee-Carter température - δ_x pour la température moyenne FR	67
3.69	Lee-Carter température - δ_x pour la température minimale FR	67
3.70	Lee-Carter température - δ_x température maximale ISR	67
3.71	Lee-Carter température - δ_x pour la température moyenne ISR	67
3.72	Lee-Carter température - δ_x pour la température minimale ISR	67
3.73	Lee-Carter température - δ_x pour les femmes RU	72
3.74	Lee-Carter température - δ_x pour les hommes RU	72
3.75	Lee-Carter température - δ_x pour les deux sexes RU	72
3.76	Lee-Carter température - δ_x pour les femmes FR	72
3.77	Lee-Carter température - δ_x pour les hommes FR	72
3.78	Lee-Carter température - δ_x pour les deux sexes FR	72
3.79	Lee-Carter température - δ_x pour les femmes ISR	73
3.80	Lee-Carter température - δ_x pour les hommes ISR	73
3.81	Lee-Carter température - δ_x pour les deux sexes ISR	73
3.82	Lee-Carter température - Taux de mortalité en fonction du sexe à 45 ans RU	73
3.83	Lee-Carter température - Taux de mortalité en fonction du sexe à 65 ans RU	73
3.84	Lee-Carter température - Taux de mortalité en fonction du sexe à 85 ans RU	73
3.85	Lee-Carter température - Taux de mortalité en fonction du sexe en 1998 RU	74
3.86	Lee-Carter température - Taux de mortalité en fonction du sexe en 2008 RU	74
3.87	Lee-Carter température - Taux de mortalité en fonction du sexe en 2018 RU	74
3.88	Lee-Carter température - Niveau socio-économique du portefeuille	75
3.89	Lee-Carter température - δ_x pour un niveau socio-économique faible	76
3.90	Lee-Carter température - δ_x pour un niveau socio-économique faible-moyen	76
3.91	Lee-Carter température - δ_x pour un niveau socio-économique moyen	76
3.92	Lee-Carter température - δ_x pour un niveau socio-économique élevé-moyen	77

3.93 Lee-Carter température - δ_x pour un niveau socio-économique élevé	77
3.94 Lee-Carter température - Impact sur la mortalité en fonction du SDI au RU	77
3.95 Lee-Carter température - Impact sur la mortalité en fonction du SDI en France	77
3.96 Lee-Carter température - Impact sur la mortalité en fonction du SDI en Israël	77
3.97 Impact sur la longévité en fonction du SDI au Royaume-Uni	78
3.98 Plat - α_x RU	78
3.99 Plat - $\kappa_t^{(1)}$ RU	78
3.100 Plat - f_2 RU	78
3.101 Plat - $\kappa_t^{(2)}$ RU	78
3.102 Plat - f_3 RU	79
3.103 Plat - $\kappa_t^{(3)}$ RU	79
3.104 Plat - γ_{t-x} RU	79
3.105 Plat - $\ln(\mu_{x,t})$ en 1998 RU	79
3.106 Plat - $\ln(\mu_{x,t})$ en 2008 RU	79
3.107 Plat - $\ln(\mu_{x,t})$ en 2018 RU	79
3.108 Plat - $\ln(\mu_{x,t})$ à 45 ans RU	79
3.109 Plat - $\ln(\mu_{x,t})$ à 65 ans RU	79
3.110 Plat - $\ln(\mu_{x,t})$ à 85 ans RU	79
3.111 SPO - α_x RU	80
3.112 SPO - $\kappa_t^{(1)}$ RU	80
3.113 SPO - f_2 RU	80
3.114 SPO - $\kappa_t^{(2)}$ RU	80
3.115 SPO - f_3 RU	81
3.116 SPO - $\kappa_t^{(3)}$ RU	81
3.117 SPO - f_4 RU	81
3.118 SPO - $\kappa_t^{(4)}$ RU	81
3.119 SPO - γ_{t-x} RU	81
3.120 SPO - Corrélation de Pearson entre $\mu_{x,t}$ et T_t entre 2006 et 2018 RU . . .	83
3.121 SPO - α_x RU (1922-2018)	84
3.122 SPO - $\kappa_t^{(1)}$ RU (1922-2018)	84
3.123 SPO - $\kappa_t^{(2)}$ RU (1922-2018)	84
3.124 SPO - $\kappa_t^{(3)}$ RU (1922-2018)	84
3.125 SPO - f_4 RU (1922-2018)	84
3.126 SPO - $\kappa_t^{(4)}$ RU (1922-2018)	84
3.127 SPO - γ_{t-x} RU (1922-2018)	85
3.128 SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ en 1998 RU (1922-2018)	85
3.129 SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ en 2008 RU (1922-2018)	85
3.130 SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ en 2018 RU (1922-2018)	85
3.131 SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ à 45 ans RU (1922-2018)	85
3.132 SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ à 65 ans RU (1922-2018)	85

3.133SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ à 85 ans RU (1922-2018)	85
3.134SPO - α_x RU (1950-2018)	86
3.135SPO - $\kappa_t^{(1)}$ RU (1950-2018)	86
3.136SPO - $\kappa_t^{(2)}$ RU (1950-2018)	86
3.137SPO - $\kappa_t^{(3)}$ RU (1950-2018)	86
3.138SPO - f_4 RU (1950-2018)	86
3.139SPO - $\kappa_t^{(4)}$ RU (1950-2018)	86
3.140SPO - γ_{t-x} RU (1950-2018)	86
3.141SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ en 1998 RU (1950-2018)	87
3.142SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ en 2008 RU (1950-2018)	87
3.143SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ en 2018 RU (1950-2018)	87
3.144SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ à 45 ans RU (1950-2018)	87
3.145SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ à 65 ans RU (1950-2018)	87
3.146SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ à 85 ans RU (1950-2018)	87
3.147SPO - α_x RU (1990-2018)	87
3.148SPO - $\kappa_t^{(1)}$ RU (1990-2018)	87
3.149SPO - $\kappa_t^{(2)}$ RU (1990-2018)	87
3.150SPO - $\kappa_t^{(3)}$ RU (1990-2018)	88
3.151SPO - f_4 RU (1990-2018)	88
3.152SPO - $\kappa_t^{(4)}$ RU (1990-2018)	88
3.153SPO - γ_{t-x} RU (1990-2018)	88
3.154SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ en 1998 RU (1990-2018)	88
3.155SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ en 2008 RU (1990-2018)	88
3.156SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ en 2018 RU (1990-2018)	88
3.157SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ à 45 ans RU (1990-2018)	89
3.158SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ à 65 ans RU (1990-2018)	89
3.159SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ à 85 ans RU (1990-2018)	89
3.160SPO - $\kappa_t^{(4)}$ pour $a = 30$ FR	91
3.161SPO - $\kappa_t^{(4)}$ pour $a = 50$ FR	91
3.162SPO - $\kappa_t^{(4)}$ pour $a = 60$ FR	91
3.163Lee-Carter - κ_t projeté jusqu'à 2120 RU	94
3.164Lee-Carter - $\ln(\mu_{x,t})$ projeté jusqu'à 2120 RU	94
3.165Lee-Carter température - κ_t projeté jusqu'à 2120 RU	95
3.166Lee-Carter température - $\ln(\mu_{x,t})$ projeté jusqu'à 2099 RU	95
3.167Plat - $\kappa_t^{(1)}$ projeté jusqu'à 2120 RU	95
3.168Plat - $\kappa_t^{(2)}$ projeté jusqu'à 2120 RU	95
3.169Plat - $\kappa_t^{(3)}$ projeté jusqu'à 2120 RU	95
3.170Plat - $\ln(\mu_{x,t})$ projeté jusqu'à 2020 RU	96
3.171SPO - $\kappa_t^{(1)}$ projeté jusqu'à 2120 RU	96
3.172SPO - $\kappa_t^{(2)}$ projeté jusqu'à 2099 RU	96
3.173SPO - $\kappa_t^{(3)}$ projeté jusqu'à 2099 RU	96

3.174	SPO - $\kappa_t^{(4)}$ projeté jusqu'à 2120 SPO	97
3.175	SPO - $\mu_{x,t}$ projeté jusqu'à 2120 SPO	97
3.176	Lee-Carter température - Fermetures de tables de 70 ans à 110 ans pour 1998 RU	97
3.177	Lee-Carter température - Fermetures de tables de 70 ans à 110 ans pour 2008 RU	97
3.178	Lee-Carter température - Fermetures de tables de 70 ans à 110 ans pour 2018 RU	97
3.179	Lee-Carter température - Fermetures de tables de 70 ans à 110 ans pour 2050 RU	98
3.180	Lee-Carter température - Fermetures de tables de 70 ans à 110 ans pour 2070 RU	98
3.181	Lee-Carter température - Fermetures de tables de 70 ans à 110 ans pour 2070 RU	98
4.1	Impact de la température sur le BEL au RU/I	104
5.1	Lee-Carter - α_x en France en fonction de l'âge x	129
5.2	Lee-Carter - β_x en France en fonction de l'âge x	129
5.3	Lee-Carter - κ_t en France en fonction de l'année t	129
5.4	Lee-Carter - α_x en Israël en fonction de l'âge x	129
5.5	Lee-Carter - β_x en Israël en fonction de l'âge x	129
5.6	Lee-Carter - κ_t en Israël en fonction de l'année t	129
5.7	Lee-Carter température - Q-Q pour (1) pour la FR	130
5.8	Lee-Carter température - Q-Q pour (1)+(2) FR	130
5.9	Lee-Carter température - Q-Q pour (1)+(3) FR	130
5.10	Lee-Carter température - Q-Q pour (1)+(2)+(3) FR	130
5.11	Lee-Carter température - Q-Q pour (1) pour ISR	130
5.12	Lee-Carter température - Q-Q pour (1)+(2) ISR	130
5.13	Lee-Carter température - Q-Q pour (1)+(3) ISR	130
5.14	Lee-Carter température - Q-Q pour (1)+(2)+(3) ISR	130
5.15	Plat - α_x FR	131
5.16	Plat - $\kappa_t^{(1)}$ FR	131
5.17	Plat - f_2 FR	131
5.18	Plat - $\kappa_t^{(2)}$ FR	131
5.19	Plat - f_3 FR	131
5.20	Plat - $\kappa_t^{(3)}$ FR	131
5.21	Plat - γ_{t-x} FR	131
5.22	Plat - $\ln(\mu_{x,t})$ en 1998 FR	131
5.23	Plat - $\ln(\mu_{x,t})$ en 2008 FR	131
5.24	Plat - $\ln(\mu_{x,t})$ en 2018 FR	131
5.25	Plat - $\ln(\mu_{x,t})$ à 45 ans FR	131
5.26	Plat - $\ln(\mu_{x,t})$ à 65 ans FR	131

5.27	Plat - $\ln(\mu_{x,t})$ à 85 ans FR	131
5.28	Plat - α_x ISR	132
5.29	Plat - $\kappa_t^{(1)}$ ISR	132
5.30	Plat - f_2 ISR	132
5.31	Plat - $\kappa_t^{(2)}$ ISR	132
5.32	Plat - f_3 ISR	132
5.33	Plat - $\kappa_t^{(3)}$ ISR	132
5.34	Plat - γ_{t-x} ISR	132
5.35	Plat - $\ln(\mu_{x,t})$ en 1998 ISR	132
5.36	Plat - $\ln(\mu_{x,t})$ en 2008 ISR	132
5.37	Plat - $\ln(\mu_{x,t})$ en 2015 ISR	132
5.38	Plat - $\ln(\mu_{x,t})$ à 45 ans ISR	132
5.39	Plat - $\ln(\mu_{x,t})$ à 65 ans ISR	132
5.40	Plat - $\ln(\mu_{x,t})$ à 85 ans ISR	132
5.41	SPO - α_x FR (1900-2018)	133
5.42	SPO - $\kappa_t^{(1)}$ FR (1900-2018)	133
5.43	SPO - $\kappa_t^{(2)}$ FR (1900-2018)	133
5.44	SPO - $\kappa_t^{(3)}$ FR (1900-2018)	133
5.45	SPO - f_4 pour la FR (1900-2018)	133
5.46	SPO - $\kappa_t^{(4)}$ FR (1900-2018)	133
5.47	SPO - γ_{t-x} FR (1900-2018)	133
5.48	SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ en 1998 FR (1900-2018)	134
5.49	SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ en 2008 FR (1900-2018)	134
5.50	SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ en 2018 FR (1900-2018)	134
5.51	SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ à 45 ans FR (1900-2018)	134
5.52	SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ à 65 ans FR (1900-2018)	134
5.53	SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ à 85 ans FR (1900-2018)	134
5.54	SPO - α_x FR (1950-2018)	134
5.55	SPO - $\kappa_t^{(1)}$ FR (1950-2018)	134
5.56	SPO - $\kappa_t^{(2)}$ FR (1950-2018)	134
5.57	SPO - $\kappa_t^{(3)}$ FR (1950-2018)	134
5.58	SPO - f_4 FR (1950-2018)	134
5.59	SPO - $\kappa_t^{(4)}$ FR (1950-2018)	134
5.60	SPO - γ_{t-x} FR (1950-2018)	135
5.61	SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ en 1998 FR (1950-2018)	135
5.62	SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ en 2008 FR (1950-2018)	135
5.63	SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ en 2018 FR (1950-2018)	135
5.64	SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ à 45 ans FR (1950-2018)	135
5.65	SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ à 65 ans FR (1950-2018)	135
5.66	SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ à 85 ans FR (1950-2018)	135
5.67	SPO - α_x FR (1990-2018)	136
5.68	SPO - $\kappa_t^{(1)}$ FR (1990-2018)	136

5.69	SPO - $\kappa_t^{(2)}$ FR (1990-2018)	136
5.70	SPO - $\kappa_t^{(3)}$ FR (1990-2018)	136
5.71	SPO - f_4 FR (1990-2018)	136
5.72	SPO - $\kappa_t^{(4)}$ FR (1990-2018)	136
5.73	SPO - γ_{t-x} FR (1990-2018)	136
5.74	SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ en 1998 FR (1990-2018)	136
5.75	SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ en 2008 FR (1990-2018)	136
5.76	SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ en 2018 FR (1990-2018)	136
5.77	SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ à 45 ans FR (1990-2018)	137
5.78	SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ à 65 ans FR (1990-2018)	137
5.79	SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ à 85 ans FR (1990-2018)	137
5.80	Lee-Carter température - Fermetures de tables de 1990 à 2018 pour 45 ans RU	138
5.81	Lee-Carter température - Fermetures de tables de 1990 à 2018 pour 65 ans RU	138
5.82	Lee-Carter température - Fermetures de tables de 1990 à 2018 pour 85 ans RU	138
5.83	Lee-Carter température - Fermetures de tables de 2020 à 2099 pour 45 ans RU	138
5.84	Lee-Carter température - Fermetures de tables de 2020 à 2099 pour 65 ans RU	138
5.85	Lee-Carter température - Fermetures de tables de 2020 à 2099 pour 85 ans RU	138

Annexes

Modèle de Lee-Carter

Les courbes du modèle de Lee-Carter sont tracées pour les autres pays.

En France :

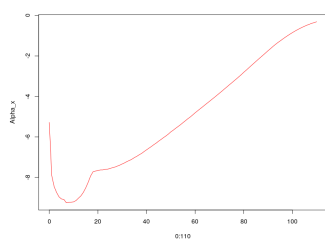


FIGURE 5.1 – Lee-Carter - α_x en France en fonction de l'âge x

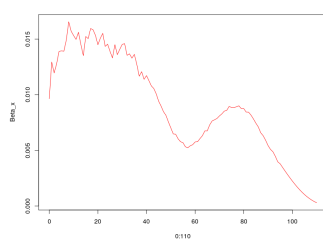


FIGURE 5.2 – Lee-Carter - β_x en France en fonction de l'âge x

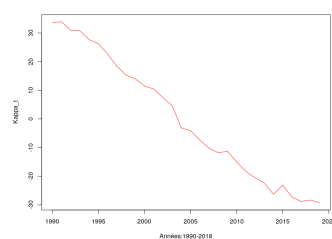


FIGURE 5.3 – Lee-Carter - κ_t en France en fonction de l'année t

En Israël :

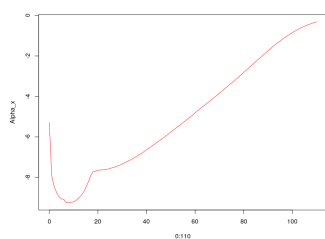


FIGURE 5.4 – Lee-Carter - α_x en Israël en fonction de l'âge x

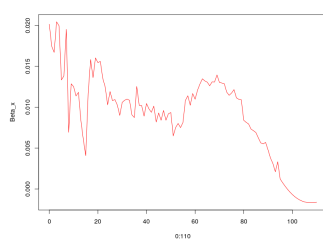


FIGURE 5.5 – Lee-Carter - β_x en Israël en fonction de l'âge x

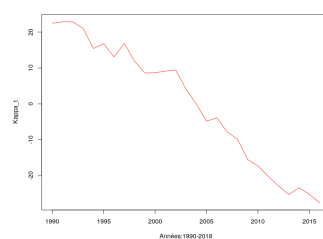


FIGURE 5.6 – Lee-Carter - κ_t en Israël en fonction de l'année t

Modèle de Lee-Carter température

Causes de décès liées à la température

Une étude a été faite sur les résidus des modèles restreints afin de juger l'hypothèse forte "la cause de décès dépend uniquement de la température". Des graphiques *Quantile-Quantile* sont tracés.

En France :

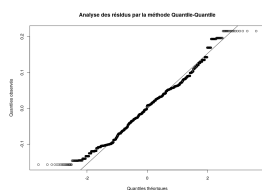


FIGURE 5.7 – Lee-Carter température - Q-Q pour (1) pour FR

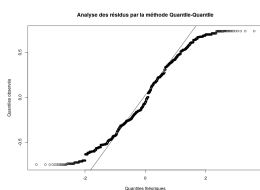


FIGURE 5.8 – Lee-Carter température - Q-Q pour (1)+(2) pour FR

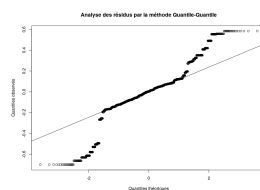


FIGURE 5.9 – Lee-Carter température - Q-Q pour (1)+(3) pour FR

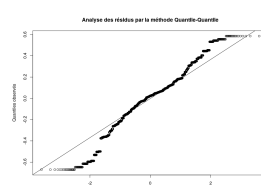


FIGURE 5.10 – Lee-Carter température - Q-Q pour (1)+(2)+(3) pour FR

En Israël :

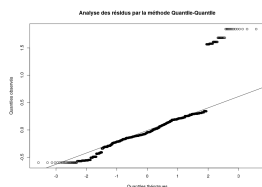


FIGURE 5.11 – Lee-Carter température - Q-Q pour (1) pour ISR

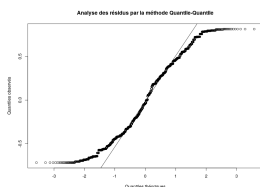


FIGURE 5.12 – Lee-Carter température - Q-Q pour (1)+(2) pour ISR

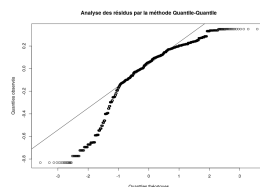


FIGURE 5.13 – Lee-Carter température - Q-Q pour (1)+(3) pour ISR

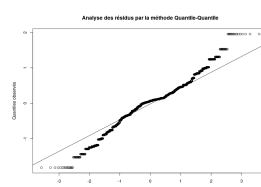


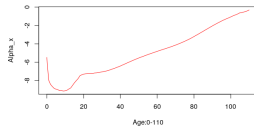
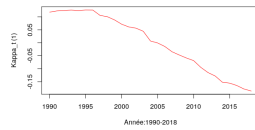
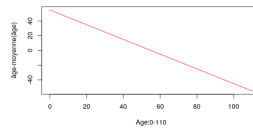
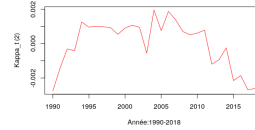
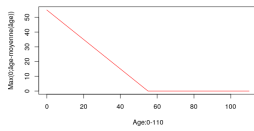
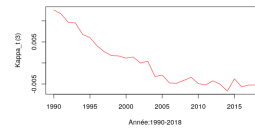
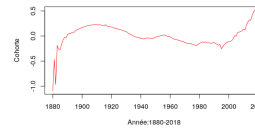
FIGURE 5.14 – Lee-Carter température - Q-Q pour (1)+(2)+(3) pour ISR

Modèle de Plat

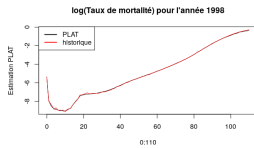
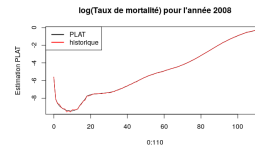
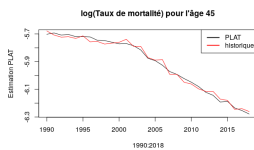
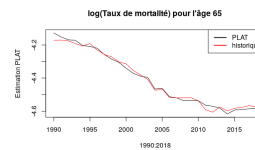
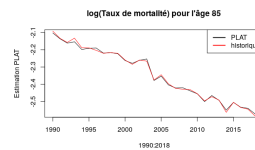
Les graphiques associés au modèle de Plat ont été tracés pour l'ensemble des pays du portefeuille d'étude.

En France, il est possible de dresser les différentes courbes associées aux paramètres du modèle de Plat. Il est en particulier notable que le modèle est sensible au pays étudié en particulier au niveau de la représentation des $\kappa_t^{(i)}$, $\forall i \in \{1, 3\}$. Par exemple, pour la

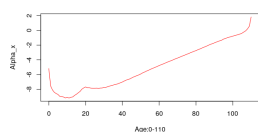
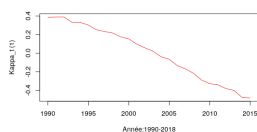
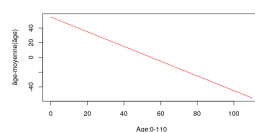
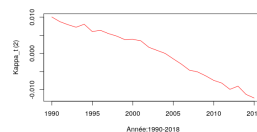
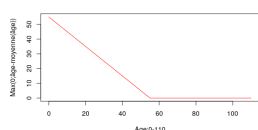
France (contrairement au Royaume-Uni), la courbe des $\kappa_t^{(2)}$ semble prendre la forme d'une parabole concave, tandis que $\kappa_t^{(3)}$ a une tendance baissière traduisant une diminution de la mortalité aux âges faibles.

FIGURE 5.15 – Plat - α_x FRFIGURE 5.16 – Plat - $\kappa_t^{(1)}$ FRFIGURE 5.17 – Plat - f_2 FRFIGURE 5.18 – Plat - $\kappa_t^{(2)}$ FRFIGURE 5.19 – Plat - f_3 FRFIGURE 5.20 – Plat - $\kappa_t^{(3)}$ FRFIGURE 5.21 – Plat - γ_{t-x} FR

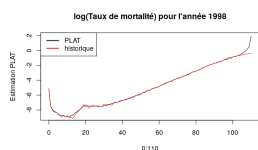
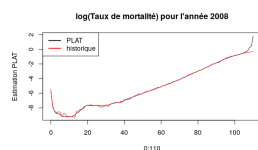
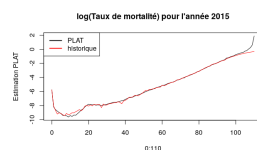
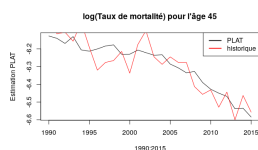
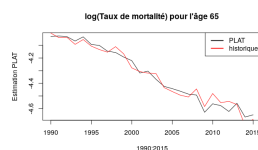
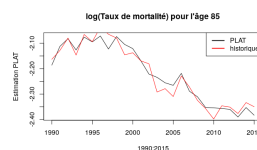
A partir de ces paramètres, il est possible de comparer les taux de mortalités observés et ceux estimés par le modèle de Plat. Les taux de mortalité estimés semblent proches des valeurs observées.

FIGURE 5.22 – Plat - $\ln(\mu_{x,t})$ en 1998 FRFIGURE 5.23 – Plat - $\ln(\mu_{x,t})$ en 2008 FRFIGURE 5.24 – Plat - $\ln(\mu_{x,t})$ en 2018 FRFIGURE 5.25 – Plat - $\ln(\mu_{x,t})$ à 45 ans FRFIGURE 5.26 – Plat - $\ln(\mu_{x,t})$ à 65 ans FRFIGURE 5.27 – Plat - $\ln(\mu_{x,t})$ à 85 ans FR

En Israël, il est également possible de tracer les courbes des paramètres. Globalement, les tendances se rapprochent de celles du Royaume-Uni.

FIGURE 5.28 – Plat - α_x ISRFIGURE 5.29 – Plat - $\kappa_t^{(1)}$ ISRFIGURE 5.30 – Plat - f_2 ISRFIGURE 5.31 – Plat - $\kappa_t^{(2)}$ ISRFIGURE 5.32 – Plat - f_3 ISRFIGURE 5.33 – Plat - $\kappa_t^{(3)}$ ISRFIGURE 5.34 – Plat - γ_{t-x} ISR

A partir de ces paramètres, il est possible de comparer les estimations du modèle de Plat aux valeurs réelles de mortalité. Il convient de remarquer qu'alors que les courbes de taux de mortalité par années sont relativement similaires dans le cas de Israël, les courbes par âges présentent des différences notables et plus prononcées que pour la France. Ce phénomène peut être causé à cause de la plage de taille différente pour Israël (1990-2015).

FIGURE 5.35 – Plat - $\ln(\mu_{x,t})$ en 1998 ISRFIGURE 5.36 – Plat - $\ln(\mu_{x,t})$ en 2008 ISRFIGURE 5.37 – Plat - $\ln(\mu_{x,t})$ en 2015 ISRFIGURE 5.38 – Plat - $\ln(\mu_{x,t})$ à 45 ans ISRFIGURE 5.39 – Plat - $\ln(\mu_{x,t})$ à 65 ans ISRFIGURE 5.40 – Plat - $\ln(\mu_{x,t})$ à 85 ans ISR

Modèle de SPO

D'autres courbes du modèle de SPO ont été tracées, en particulier pour la France.

Période de calibration

Dans un premier temps, il convient d'étudier les modèle de SPO sur une large plage de données allant de 1900 jusqu'à 2020. Sur la base de ces données, le modèle présente une forte volatilité. En effet, pour les paramètres $\kappa_t^{(1)}$, $\kappa_t^{(2)}$, $\kappa_t^{(3)}$ et $\kappa_t^{(4)}$, des pics sont visibles autour des années 1920 et 1940, ce qui rappelle la surmortalité en lien avec les Première et Seconde Guerres Mondiales. Ce phénomène biaise le modèle et il n'est pas pertinent de retenir cette plage de données.

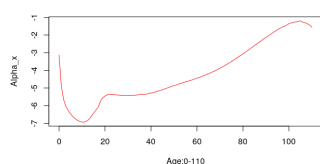


FIGURE 5.41 – SPO - α_x
FR (1900-2018)

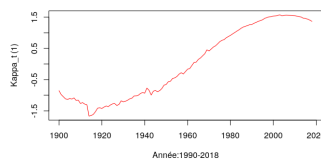


FIGURE 5.42 – SPO - $\kappa_t^{(1)}$
FR (1900-2018)

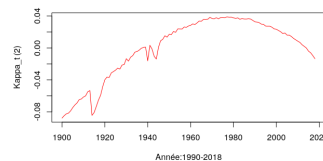


FIGURE 5.43 – SPO - $\kappa_t^{(2)}$
FR (1900-2018)

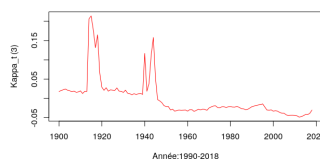


FIGURE 5.44 – SPO - $\kappa_t^{(3)}$
FR (1900-2018)

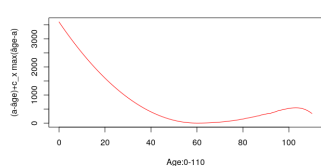


FIGURE 5.45 – SPO - f_4
pour la FR (1900-2018)



FIGURE 5.46 – SPO - $\kappa_t^{(4)}$
FR (1900-2018)

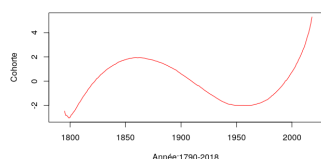


FIGURE 5.47 – SPO - γ_{t-x} FR (1900-2018)

Des courbes peuvent tout de même être établies afin de visualiser l'écart entre les estimations du modèles et les valeurs réelles de taux de mortalité. Il convient de remarquer un écart significatif entre les valeurs observées et celles estimées par le modèle basé sur la plage de données 1900-2018.

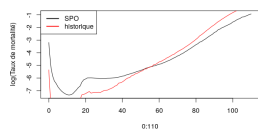


FIGURE 5.48 – SPO
- $\ln(\mu_{x,t})$ en 1998 FR
(1900-2018)

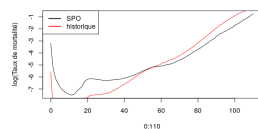


FIGURE 5.49 – SPO
- $\ln(\mu_{x,t})$ en 2008 FR
(1900-2018)

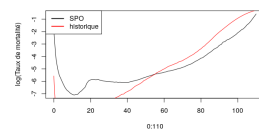


FIGURE 5.50 – SPO
- $\ln(\mu_{x,t})$ en 2018 FR
(1900-2018)

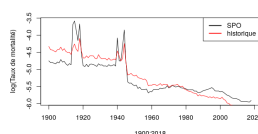


FIGURE 5.51 – SPO
- $\ln(\mu_{x,t})$ à 45 ans FR
(1900-2018)

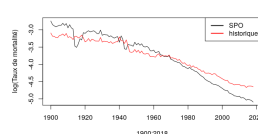


FIGURE 5.52 – SPO
- $\ln(\mu_{x,t})$ à 65 ans FR
(1900-2018)

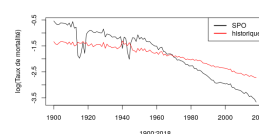


FIGURE 5.53 – SPO
- $\ln(\mu_{x,t})$ à 85 ans FR
(1900-2018)

Ensuite, la plage de données est restreinte de 1950 à 2018. Une tendance plus nette et lisse se dessine avec une diminution globale de $\kappa_t^{(1)}$, $\kappa_t^{(2)}$ et $\kappa_t^{(3)}$ pour la France, ainsi qu'une augmentation pour $\kappa_t^{(4)}$. Cette dernière courbe traduit une augmentation de l'impact de la température sur la mortalité.

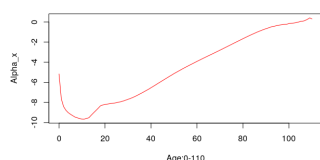


FIGURE 5.54 – SPO - α_x
FR (1950-2018)

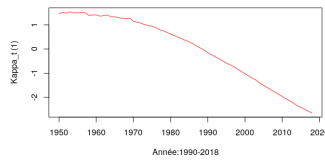


FIGURE 5.55 – SPO - $\kappa_t^{(1)}$
FR (1950-2018)

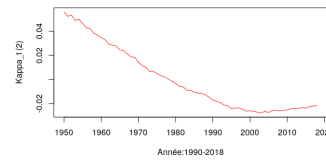


FIGURE 5.56 – SPO - $\kappa_t^{(2)}$
FR (1950-2018)

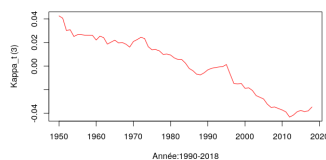


FIGURE 5.57 – SPO - $\kappa_t^{(3)}$
FR (1950-2018)

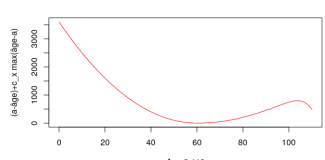


FIGURE 5.58 – SPO - f_4
FR (1950-2018)

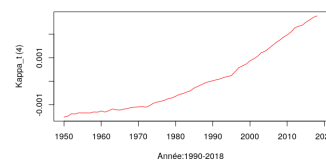
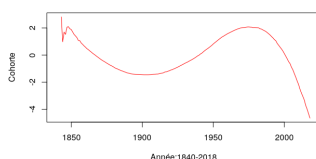
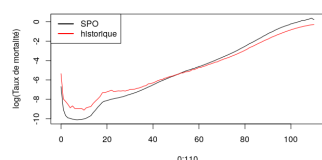
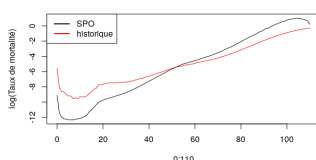
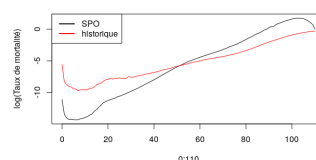
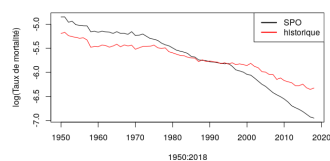
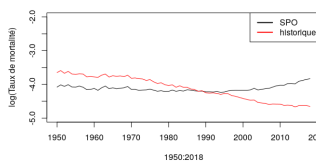
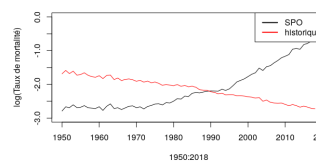


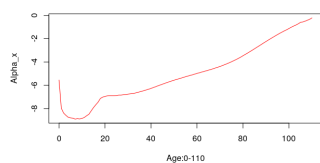
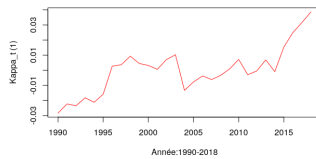
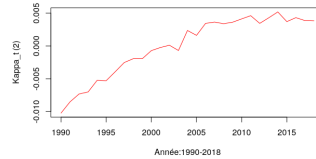
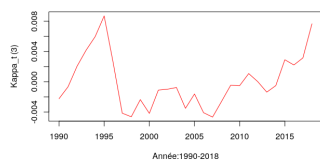
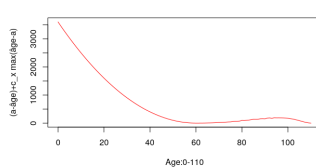
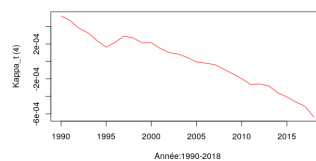
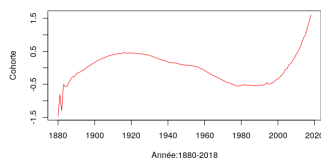
FIGURE 5.59 – SPO - $\kappa_t^{(4)}$
FR (1950-2018)

FIGURE 5.60 – SPO - γ_{t-x} FR (1950-2018)

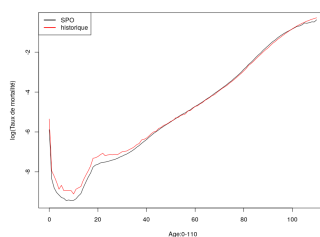
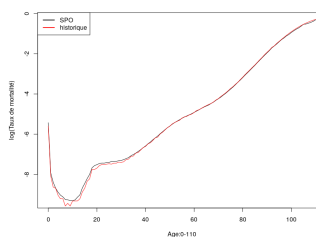
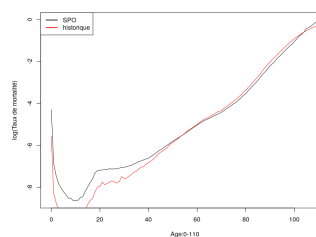
Comme précédemment, les valeurs réelles sont comparées aux valeurs estimées du modèle et il est possible d'observer un écart significatif entre les taux de mortalité. Par exemple, la courbe des taux de mortalité historiques pour l'âge 85 ans diminue en fonction du temps alors que celle des taux de mortalité estimés par le modèle de SPO augmente.

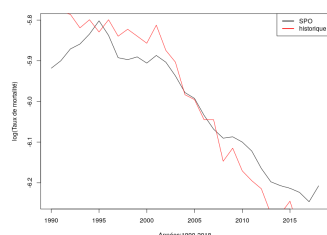
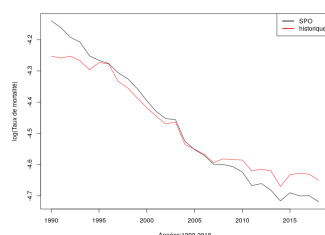
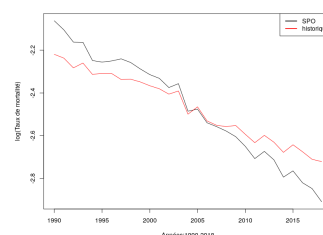
FIGURE 5.61 – SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ en 1998 FR (1950-2018)FIGURE 5.62 – SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ en 2008 FR (1950-2018)FIGURE 5.63 – SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ en 2018 FR (1950-2018)FIGURE 5.64 – SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ à 45 ans FR (1950-2018)FIGURE 5.65 – SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ à 65 ans FR (1950-2018)FIGURE 5.66 – SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ à 85 ans FR (1950-2018)

Enfin, il est possible de tester le modèle de SPO sur la plage de données allant de 1990 à 2018 pour la France en particulier. Il s'agit de la plage de données retenue pour le calcul des tests statistiques afin que le modèle de SPO soit comparé aux autres modèles.

FIGURE 5.67 – SPO - α_x
FR (1990-2018)FIGURE 5.68 – SPO - $\kappa_t^{(1)}$
FR (1990-2018)FIGURE 5.69 – SPO - $\kappa_t^{(2)}$
FR (1990-2018)FIGURE 5.70 – SPO - $\kappa_t^{(3)}$
FR (1990-2018)FIGURE 5.71 – SPO - f_4
FR (1990-2018)FIGURE 5.72 – SPO - $\kappa_t^{(4)}$
FR (1990-2018)FIGURE 5.73 – SPO - γ_{t-x} FR (1990-2018)

Des courbes logarithmiques de taux de mortalité peuvent ainsi être tracées afin de comparer les données estimées à celles observées.

FIGURE 5.74 – SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ en 1998 FR (1990-2018)FIGURE 5.75 – SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ en 2008 FR (1990-2018)FIGURE 5.76 – SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ en 2018 FR (1990-2018)

FIGURE 5.77 – SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ à 45 ans FR (1990-2018)FIGURE 5.78 – SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ à 65 ans FR (1990-2018)FIGURE 5.79 – SPO - $\ln(\mu_{x,t})$ à 85 ans FR (1990-2018)

Enfin, un tableau récapitulatif des résultats des tests statistiques est dressé. Il est possible d'observer - malgré une tendance baissière du paramètre $\kappa_t^{(4)}$ (donc non en ligne avec les résultats attendus) - des résultats plus pertinent pour la plage de données 1990-2018. Il s'agit effectivement de la plage de données sélectionnées pour la modélisation, au regard de ce qui est dit pour les analyses sur le Royaume-Uni qui représente plus de 80% du portefeuille d'étude.

Plage d'apprentissage

Tests	Plage 1900-2018	Plage 1950-2018	Plage 1990-2018
Erreur d'estimation	84.5464%	118.3278%	24.7952%
MAPE	84.6743%	112.1985%	15.5639%
R^2	72.7765%	21.4705%	98.9938%
SMR	100.1138%	64.6923%	100.3187%

Plage projetée

Tests	Plage 1900-2018	Plage 1950-2018	Plage 1990-2018
Erreur d'estimation	156.9656%	262.8069%	48.9587%
MAPE	529.2770%	174.4439%	49.8312%
R^2	64.2587%	35.5535%	97.4383%
SMR	127.9164%	21.2423%	114.1472%

Fermetures de tables

Des fermetures de tables ont été appliquées aux taux de mortalité estimés à partir du modèle de Lee-Carter température au Royaume-Uni. Comme attendu, il n'y a pas de fermeture de table aux âges antérieurs à 80 ans, par contre une distinction entre les taux de mortalité se révèle avec la figure 5.82. Il en va de même pour les tables de mortalité projetées à horizon 2099 comme le montre la figure 5.85.

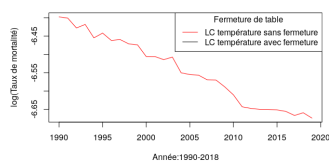


FIGURE 5.80 – Lee-Carter température - Fermetures de tables de 1990 à 2018 pour 45 ans RU

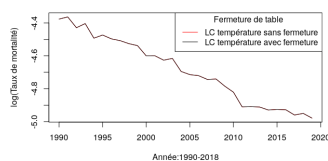


FIGURE 5.81 – Lee-Carter température - Fermetures de tables de 1990 à 2018 pour 65 ans RU

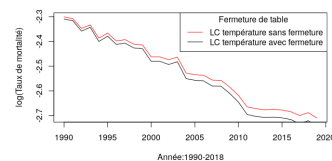


FIGURE 5.82 – Lee-Carter température - Fermetures de tables de 1990 à 2018 pour 85 ans RU

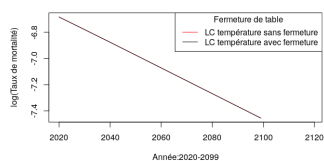


FIGURE 5.83 – Lee-Carter température - Fermetures de tables de 2020 à 2099 pour 45 ans RU

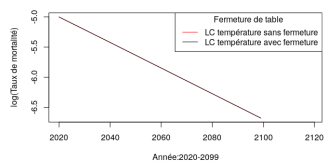


FIGURE 5.84 – Lee-Carter température - Fermetures de tables de 2020 à 2099 pour 65 ans RU

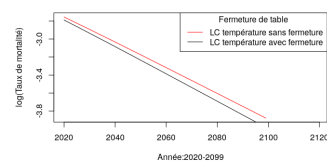


FIGURE 5.85 – Lee-Carter température - Fermetures de tables de 2020 à 2099 pour 85 ans RU