

Mémoire présenté le :

**pour l'obtention du Diplôme Universitaire d'actuariat de l'ISFA
et l'admission à l'Institut des Actuaires**

Par : GIMIÉ Florian

Titre : Mesure de l'impact des vagues de chaleur sur le risque de passage aux
urgences et d'hospitalisation

Confidentialité : NON OUI (Durée : 1 an 2 ans)

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

*Membre présents du jury de l'Institut
des Actuaires*

signature

Mme. Anaëlle LE BERRE

M. Michaël CHOUKROUN

Mme. Patricia PENGOV

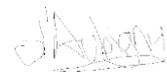
Membres présents du jury de l'ISFA

M. Armand BERNOU

*Entreprise : Swiss Life Prévoyance et
Santé*

Nom : Delphine DROUET D'AUBIGNY

Signature :



Directeur de mémoire en entreprise :

Nom : Adomo ALLO

Signature :



Invité :

Nom : Pierre MARJOLLET

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 le contexte des changements climatiques, l'intensification et la récurrence des épisodes caniculaires présentent un risque pour la santé des personnes. En effet, dans un devoir de veille sanitaire, Santé publique France a relevé systématiquement lors des derniers étés un afflux de passages aux urgences en lien avec des pathologies liées à la chaleur telles que la déshydratation et l'hyperthermie, et ce, notamment en période de canicule. Parfois, ces passages aux urgences peuvent mener à des hospitalisations avec une gravité variable, dépendante, en partie, du comportement et des antécédents des individus.

Pour l'assureur possédant des activités en santé, à l'instar des épidémies saisonnières, les vagues de chaleur pourraient sur le long terme impliquer un coût supplémentaire lié aux soins, en particulier pour des pathologies dues à la chaleur mais également pour des aggravations de maladies respiratoires et rénales au cours de la vie des assurés.

Après avoir présenté l'enjeu climatique sur le territoire métropolitain, ce mémoire s'intéresse à l'identification et à la quantification de l'impact des températures estivales sur le risque de passages aux urgences et d'hospitalisation. Dans un premier temps, la recherche d'un lien entre ces risques et un indicateur biométéorologique est effectuée sur un portefeuille individuel global regroupant plusieurs profils d'assurés à l'aide de modèles linéaires généralisés. Par la suite, une étude de cas est réalisée sur un portefeuille individuel constitué d'une population cible d'assurés retraités. Enfin, avec ce même portefeuille supposé constant et sur la base des résultats de la recherche de corrélation, une projection de l'effet des températures sur le nombre d'assurés passant aux urgences est proposée, afin de comprendre dans un cadre précis le coût supplémentaire que le réchauffement pourrait induire.

| |
|---|
| <p>Mots-clés : changement climatique, GIEC, santé individuelle, vulnérabilité à la chaleur, hospitalisation, urgences, MLG</p> |
|---|

Abstract

In the context of climate change, the intensification and recurrence of heatwaves pose a risk to people's health. Indeed, Santé publique France which monitors several health risks has systematically observed over the last summers a rise in the admissions of hospital emergency services for heat-related illnesses such as dehydration and hyperthermia, especially during heatwaves. This can sometimes lead to people being hospitalized with a variable degree of seriousness, which particularly depends on their behaviour and medical background.

In the future, along with seasonal illnesses, heatwaves may cause an additional cost for health insurers not only due to heat illnesses, but also to the worsening of respiratory and kidney diseases during the policyholders' lifetime.

After presenting the stakes of climate change in Metropolitan France, this paper focuses on identifying and quantifying the effect of summer temperatures on the emergency and hospitalization risks. First of all, a research of a link between these risks and a biometeorological factor is conducted and applied on a global individual portfolio composed of several types of policyholders thanks to generalized linear models. Thereafter, a case study is led on a specific individual portfolio exclusively made up of retired policyholders. Finally, with the exact same portfolio, projections of the impact of temperature on the number of policyholders visiting the emergency department are proposed based on the previous results of the search for causal links in order to understand the additional cost climate change and global warming might imply.

| |
|---|
| <p><u>Keywords</u> : climate change, IPCC, individual health, heat vulnerability, hospitalization, emergency, GLM</p> |
|---|

Note de synthèse

Introduction

Les enjeux croissants du changement climatique soulèvent un questionnement sur le risque de santé. En effet, les phénomènes météorologiques extrêmes de plus en plus récurrents, tels que des températures estivales anormalement élevées sur le territoire métropolitain, se traduisant parfois par une série de vagues de chaleur, constituent un défi à la fois sanitaire mais également actuariel.

Si le risque de surmortalité en période de canicule est bel et bien présent (canicule d'août 2003, par exemple), il en est de même pour les risques de passage aux urgences et d'hospitalisation. En effet, lors de la publication des bulletins de santé publique, les acteurs de la veille saisonnière Santé publique France et l'Institut de Veille Sanitaire en font le constat à l'échelle nationale. À terme, avec le réchauffement climatique, ces événements météorologiques pourraient engendrer un coût supplémentaire, non seulement pour l'Assurance Maladie, mais également pour la complémentaire santé.

L'objectif de ce mémoire est de proposer une démarche d'ouverture afin d'identifier, mais également de quantifier, un lien potentiel entre la chaleur et le risque de passages aux urgences ainsi que le risque d'hospitalisation pour plusieurs portefeuilles de santé individuelle. Ainsi, il cherchera comment mesurer l'impact des températures estivales sur ces deux risques en santé.

Canicules historiques et réchauffement climatique à horizon 2100 en France métropolitaine

Une première analyse descriptive détaillée des températures estivales a été réalisée afin de mieux comprendre le récent enjeu climatique sur le territoire métropolitain. Pour ce faire, une base de données de Météo France recensant les relevés trihoraires de température de 42 stations météorologiques réparties sur le territoire a été récupérée et retraitée. L'historique s'étend de 2010 à 2023 et tient compte des mois de mai à septembre qui sont ceux d'intérêt. Cela a permis de montrer une tendance globale à la hausse des températures moyennes et extrêmes. À titre d'illustration, les températures moyennes ont connu une hausse d'environ +1,5°C en comparant les périodes 2010-2013 et 2020-2023.

En conséquence, une augmentation des occurrences de canicules a été identifiée sur une plus vaste partie du territoire ces dernières années. Dans ce mémoire, la canicule est définie en fonction des indicateurs biométéorologiques IBM_{min} et IBM_{max} qui correspondent respectivement aux moyennes mobiles sur trois jours des températures minimales et maximales :

$$IBM_{min}(i) = \frac{1}{3} \sum_{k=i}^{i+3} T_{min}(k); IBM_{max}(i) = \frac{1}{3} \sum_{k=i}^{i+3} T_{max}(k)$$

Par ailleurs, ces canicules durent plus longtemps et sont plus intenses. Certaines régions, telles que les Hauts-de-France, peu habituées à ce type de phénomène, ont ainsi connu une vigilance rouge pour canicule pour la première fois en août 2020.

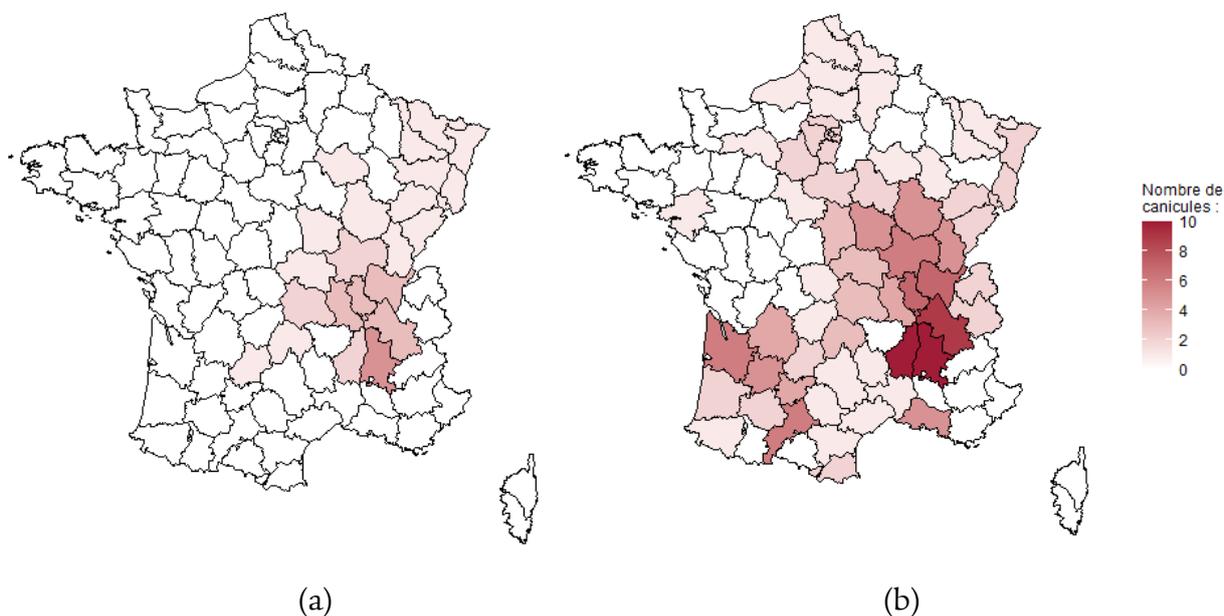


Figure 1 : Nombre de canicules par département
(a) : 2010-2016 ; (b) : 2017-2023

Il est probable que ce phénomène météorologique soit amené à se manifester de plus en plus souvent dans les décennies à venir. Grâce au jeu de données climatiques DRIAS-2020, les prévisions de canicules à horizon 2100 ont été établies sur la base des températures minimales et maximales issues des points à proximité de 14 villes de référence, réparties sur le territoire. Le couple de modèles climatiques CNRM-CM5 / ALADIN63 a été choisi pour réaliser cette étude, et trois scénarios du GIEC simulant des trajectoires optimiste, *business as usual* et pessimiste ont été conservés.

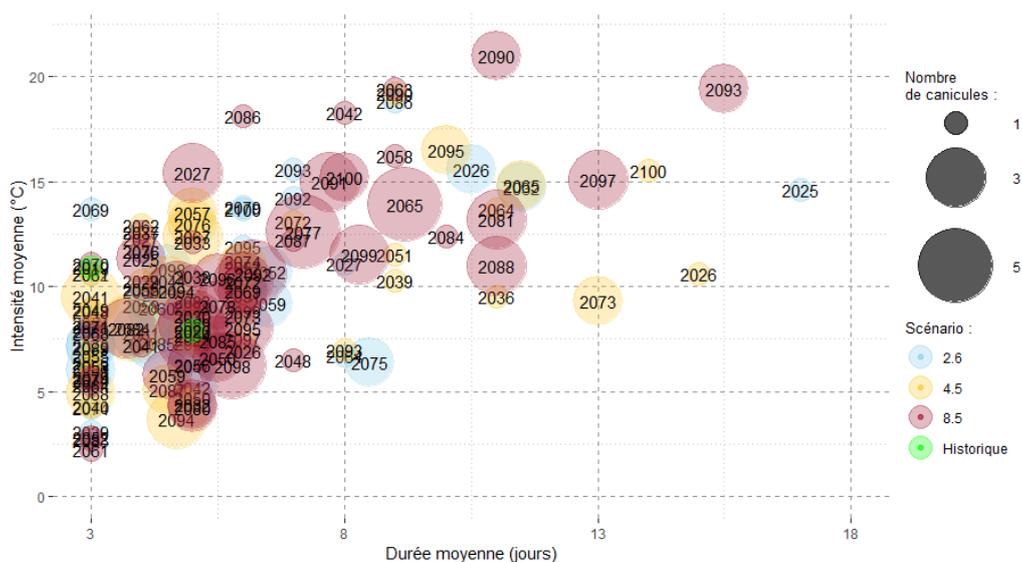


Figure 2 : Projections des canicules à horizon 2100 selon trois scénarios RCP du GIEC (Île-de-France)

Le scénario RCP 8.5 prévoit, par exemple, un triplement du nombre de canicules avec une intensité accrue d'ici la fin du siècle. Seul un maintien du réchauffement en dessous de 2°C (RCP 2.6) permettrait de limiter le risque d'occurrence et d'intensification de ces événements.

Portefeuilles d'études Swiss Life Prévoyance & Santé (SLPS)

En parallèle de l'étude climatique, des bases de données, portant sur deux portefeuilles SLPS en santé individuelle, ont été constituées. Le premier portefeuille regroupe tous types d'assurés et sert d'initiation à la recherche d'un lien entre la chaleur et le risque de passage aux urgences et d'hospitalisation de manière générale. Ensuite, le second portefeuille s'intéresse aux assurés du produit individuel SwissLife Santé Retraités et s'inscrit dans une étude de cas à la fin du mémoire. Un tel portefeuille, qui plus est en développement, est digne d'intérêt, car il cible une population de personnes retraitées qui présentent, par conséquent, un critère de vulnérabilité supplémentaire lié à l'âge. Les prestations hospitalières ont été récupérées pour une date de survenance située entre mai et septembre inclus, pour les années 2016 à 2023. Finalement, les informations ayant pu être obtenues sont l'âge au moment du sinistre, le genre et le lieu de résidence des assurés, ainsi que la garantie et les dates de début et fin de soin.

Mises en relation avec les données météorologiques, ces données de santé ont permis la mise en place d'une modélisation du lien entre les températures estivales et le risque de passage aux urgences et d'hospitalisation pour les deux portefeuilles.

Modélisation et résultats

La recherche d'un impact de la chaleur sur le risque de passage aux urgences et d'hospitalisation a été réalisée à l'aide de modèles linéaires généralisés (MLG). La variable réponse retenue est le nombre hebdomadaire d'assurés ayant eu un passage aux urgences et/ou une hospitalisation. Par ailleurs, afin de déterminer, de la façon la plus exhaustive possible, les passages aux urgences et hospitalisations, les garanties du forfait urgences et du forfait journalier ont été choisies. En effet, ces dernières restent généralement à la charge de l'assuré, sauf pour des cas spécifiques.

Pour ne pas introduire un problème de colinéarité, la composante de chaleur conservée dans la modélisation est la somme des indicateurs biométéorologiques IBM_{min} et IBM_{max} , et garde un caractère interprétable.

Des modèles de régression de Poisson et binomiale négative ont été testés et comparés sur la base du critère empirique de déviance pour la qualité d'ajustement, et de l'AIC pour la performance. Dans le cas des passages aux urgences, cela a permis d'aboutir à un modèle optimal pour chacun des portefeuilles, dont les résultats pour le second sont présentés ci-après :

| X | BN (modèle complet) | | |
|----------------------------|---------------------|----------|--------------------------|
| | Coefficient | Valeur-p | IC (95%) |
| Intercept | -6,630304 | < 2e-16 | [-6,72604 ; -6,53493] |
| GenreF | 0,080354 | 1,41e-08 | [0,057066 ; 0,10367] |
| GroupeRegionIle-de-France | 0,135290 | 1,99e-07 | [0,092264 ; 0,17786] |
| GroupeRegionNord | 0,138206 | 2,47e-16 | [0,11044 ; 0,16592] |
| Cat_age75+ | 0,145642 | 0,097963 | [0,00065774 ; 0,29028] |
| IBM_sev_semaine | 0,013117 | < 2e-16 | [0,010966 ; 0,015272] |
| Annee2017 | 0,134390 | 0,000132 | [0,076629 ; 0,19231] |
| Annee2018 | 0,169134 | 7,56e-07 | [0,11299 ; 0,22550] |
| Annee2019 | 0,212660 | 2,64e-10 | [0,15742 ; 0,26815] |
| Annee2020 | 0,182875 | 6,61e-08 | [0,12729 ; 0,23869] |
| Annee2021 | 0,273951 | 3,67e-16 | [0,21878 ; 0,32938] |
| Annee2022 | 0,588662 | < 2e-16 | [0,53645 ; 0,64123] |
| Annee2023 | 0,803698 | < 2e-16 | [0,75305 ; 0,85476] |
| Cat_age75+*IBM_sev_semaine | -0,0063361 | 0,004725 | [-0,010064 ; -0,0026552] |

Table 1 : Valeur, significativité et intervalle de confiance des coefficients pour le second modèle BN complet

En retenant un seuil de 5% pour les p-valeurs, il a été conclu que la composante de chaleur est une variable significative sur le nombre hebdomadaire d'assurés sinistrés dans le modèle. Ainsi, il a été montré qu'il existait une corrélation positive avérée entre la fréquence des passages aux urgences et la sévérité de l'indicateur biométéorologique. Par conséquent, en période de canicule, pendant laquelle l'indicateur biométéorologique est anormalement élevé, le nombre de passages augmente en moyenne. Cependant, du fait de l'impossibilité de connaître le motif des passages, il est difficile d'affirmer une causalité.

Concernant les hospitalisations, un résultat contre-intuitif a été obtenu. En effet, le nombre hebdomadaire d'assurés se faisant rembourser le forfait journalier est négativement corrélé à la composante de chaleur. Une explication probable, et qui montre une des limites de l'étude, est l'effet des hospitalisations programmées, qui sont prises en compte dans le modèle. Ici également, le datamart ne permet pas de distinguer ces dernières des hospitalisations pour pathologies liées à la chaleur.

Projection à horizon 2100 de l'effet des températures sur la fréquence des passages aux urgences pour le portefeuille SwissLife Santé Retraités (SLSR)

Dans cette dernière partie, il semblait intéressant de regarder l'impact que pourrait avoir le réchauffement climatique sur un portefeuille, qui est supposé constant, à l'aide des résultats précédemment établis. Par conséquent, les coefficients du MLG ont été réutilisés pour simuler, à l'aide d'une loi binomiale négative, une projection du nombre d'assurés sollicitant les urgences, et ce, selon trois scénarios proposés par le GIEC, à savoir les RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5. La moyenne empirique a été calibrée sur la base de coefficients de régression préalablement obtenus.

Ces projections ont permis d'établir un ordre de grandeur, à la fois du nombre d'assurés sollicitant les urgences, et du coût. Toutefois, il convient de noter qu'elles s'inscrivent dans un cadre précis (hypothèse de causalité, portefeuille de retraités, base réglementaire actuelle

pour le forfait urgences, résultats basés sur un MLG). Par ailleurs, elles ne cherchent pas à prédire l'évolution du portefeuille, mais simplement à mettre en exergue le risque de dérive de la sinistralité, dans un but de prise de conscience.

Cette étude a permis de montrer que, dans le cas des scénarios pessimiste et *business as usual*, le niveau de sinistralité serait maintenu, *a minima*, à un niveau tel qu'il fut connu en 2022 et 2023, voire se dégraderait pour le scénario RCP 8.5.

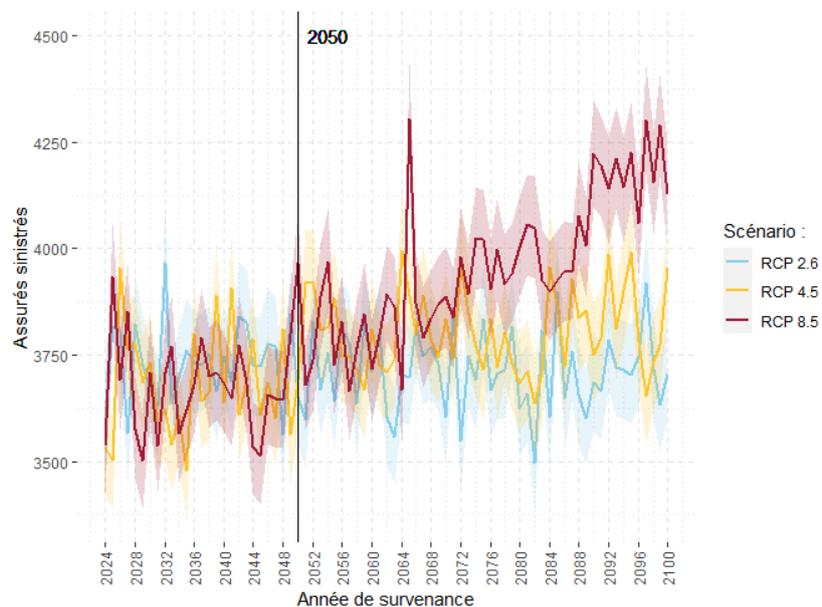


Figure 3 : Simulation du nombre annuel de passages aux urgences

Ainsi, dès la seconde moitié du siècle, cela représenterait une hausse de 5% à 15% du nombre de sinistrés, ce qui engendrerait un coût supplémentaire concernant les passages aux urgences. Par ailleurs, un nombre plus élevé de personnes aux urgences impliquerait un nombre d'hospitalisations plus important, et donc un risque supplémentaire d'occurrence de sinistres de pointe.

Bien entendu, ces considérations s'appuient sur les résultats d'un MLG et, en particulier, sur le coefficient de régression associé à l'IBM. Il se peut qu'il soit amené à changer à l'avenir, en fonction des canicules et de l'évolution sociétale qui pourrait impliquer une meilleure capacité d'adaptation par les populations, par exemple.

Conclusion

Une première étude des températures estivales historiques sur le territoire métropolitain a pu montrer une multiplication, un rallongement ainsi qu'une intensification des épisodes de chaleur ces dernières années. Les projections climatiques soulignent le risque d'aggravation de ces phénomènes météorologiques sur tout le siècle si les politiques climatiques ne permettent pas de maintenir le réchauffement en deçà de 2°C. L'utilisation des modèles linéaires généralisés a permis de conclure quant à la significativité de la composante de chaleur sur la fréquence des passages aux urgences pour deux portefeuilles individuels. Enfin, les projections de sinistralité ont pu identifier un risque de dérive dans le cas des scénarios non favorables RCP 4.5 et RCP 8.5.

Synthesis note

Introduction

The evergrowing stake of climate change raises the question of health risks. Indeed, the rising number of extreme weather events, such as uncommonly high temperatures in Metropolitan France which sometimes result in heatwaves, are not only a health challenge but also an actuarial one.

During a heatwave event, the mortality risk does exist together with emergency and hospitalization risks. Indeed, the watchdogs of the overall sanitary situation, *i.e.*, Santé publique France and the Institut de Veille Sanitaire, have observed sanitary effects in their public health reports. In the future, these meteorological phenomena could not only imply an additional cost for the Assurance Maladie but also represent a rising cost for the health insurers.

The aim of this study is to propose an opening approach in order to identify and quantify a possible interaction between heat and the emergency and hospitalization risks for several individual health portfolios. Thus, this work will attempt to measure the effect of summer temperatures on these two health-related risks.

Historical heatwaves and global warming up to 2100 in Metropolitan France

In order to understand recent climate stakes in Metropolitan France, a first detailed descriptive analysis of summer temperatures was made. To do so, a database from Météo France that gathers three hourly temperatures recorded by 42 meteorological stations spread all over the country was used and transformed. The available data history covers a period that starts from 2010 to 2023 and only takes into account the months from May to September, which are those of interest. This allowed to show an increasing global trend of average and extreme temperatures. By way of illustration, when comparing the 2010-2013 and 2020-2023 periods, average temperatures roughly increased by 1.5°C.

As a result, an increase in heatwave occurrences has been put in evidence in a larger part of Metropolitan France over the last few years. In this study, a heatwave is defined according to two biometeorological indicators, IBM_{min} and IBM_{max} , which respectively account for the three-day moving averages of minimal and maximal temperatures :

$$IBM_{min}(i) = \frac{1}{3} \sum_{k=i}^{i+3} T_{min}(k); IBM_{max}(i) = \frac{1}{3} \sum_{k=i}^{i+3} T_{max}(k)$$

Moreover, those heatwaves last much longer and are more intensive. Some regions that are usually not accustomed to these phenomena, such as the Hauts-de-France, experienced a Météo France red alert for the first time in August 2020.

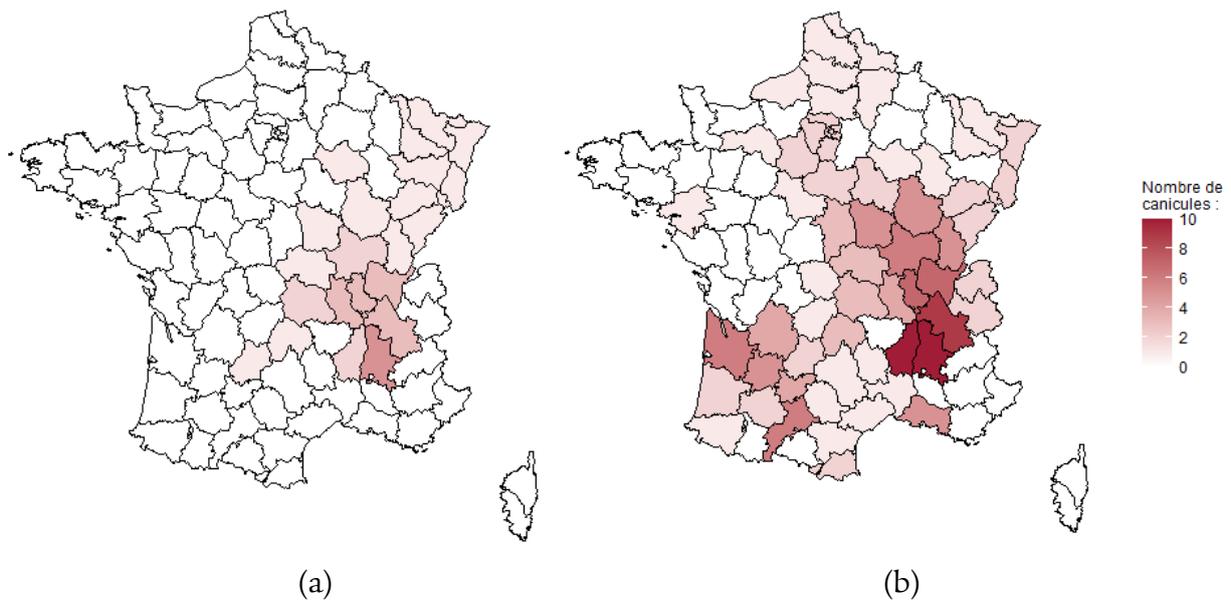


Figure 1 : Number of heatwaves per French department
 (a) : 2010-2016 ; (b) : 2017-2023

It is likely for such an extreme weather event to appear more often in the incoming decades. Thanks to the DRIAS-2020 climate dataset, the heatwave predictions until 2100 were established given the minimal and maximal temperatures from the specific geographical points close to 14 cities of reference spread all over Metropolitan France. The couple of climate models CNRM-CM5 / ALADIN63 was selected to carry out this study, and three IPCC scenarios which simulate optimistic, *business as usual* and pessimistic climate pathways were used.

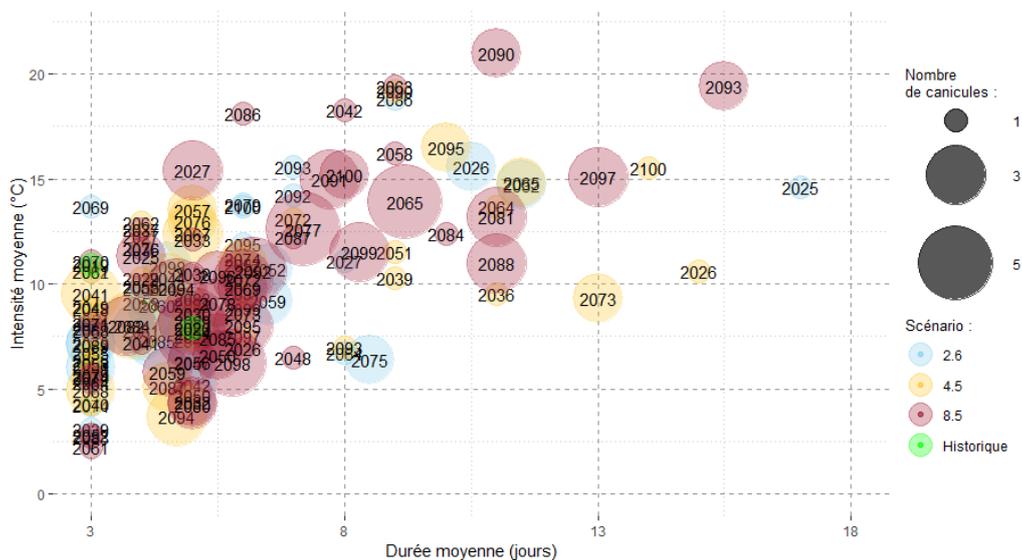


Figure 2 : Projections of heatwaves until 2100 given 3 IPCC scenarios (Île-de-France)

For example, the RCP 8.5 scenario predicts a number of heatwaves three times higher than nowadays, along with an increased intensity, at the end of the century. In order to limit the

risks of the intensification and frequency of such events, only global warming limited to 2°C maximum (RCP 2.6) would be efficient.

Swiss Life Prévoyance & Santé (SLPS) study portfolios

Along with the climate study, databases which focus on two SLPS individual health portfolios were created. The first portfolio gathers all types of policyholders and aims to initiate the search for a link between heat and the emergency and hospitalization risks in a general way. Then, the second portfolio concerns the policyholders of a specific SwissLife health insurance product, SwissLife Santé Retraités, and is part of a case study at the end of this work. Such a developing portfolio can be interesting, given the target group of retired people who represent an additional risk factor to heat on account of their age.

Claims for emergency and hospitalization services were collected for an occurrence between May and September, both months included, and for the years 2016 to 2023. Finally, the information that was possible to obtain is the age on the occurrence day of the claim, the gender and the residence of the policyholders, as well as the guarantee and the dates of the beginning and the end of the medical care.

Put together with the meteorological data, this health data allowed to establish a modelling of the interaction between summer temperatures and the emergency and hospitalization risks for both portfolios.

Modelling and results

The search for the impact of heat on the emergency and hospitalization risks was conducted thanks to generalized linear models (GLM). The chosen response variable is the weekly number of policyholders who had to visit the emergency department or needed to be hospitalized. Furthermore, in order to determine, in the most complete way, the number of visits to the emergency rooms and hospitalizations, the guarantees of the French emergency fee and the French daily fee for hospitalization were selected, as they generally have to be paid by the policyholder.

So as to avoid a colinearity issue, the heat variable which was kept in the modelling is the sum of the IBM_{min} et IBM_{max} biometeorological indicators and is interpretable.

Poisson and negative binomial regression models were tested and compared on the basis of the empirical deviance criterion as regards the model goodness-of-fit, and of the AIC regarding the performance. As for the visits to emergency rooms, this allowed to obtain an optimal model for both portfolios, the results of which are presented on the following page for the second model :

| X | NB (complete model) | | |
|----------------------------|---------------------|----------|--------------------------|
| | Coefficient | p-value | CI (95%) |
| Intercept | -6,630304 | < 2e-16 | [-6,72604 ; -6,53493] |
| GenreF | 0,080354 | 1,41e-08 | [0,057066 ; 0,10367] |
| GroupeRegionIle-de-France | 0,135290 | 1,99e-07 | [0,092264 ; 0,17786] |
| GroupeRegionNord | 0,138206 | 2,47e-16 | [0,11044 ; 0,16592] |
| Cat_age75+ | 0,145642 | 0,097963 | [0,00065774 ; 0,29028] |
| IBM_sev_semaine | 0,013117 | < 2e-16 | [0,010966 ; 0,015272] |
| Annee2017 | 0,134390 | 0,000132 | [0,076629 ; 0,19231] |
| Annee2018 | 0,169134 | 7,56e-07 | [0,11299 ; 0,22550] |
| Annee2019 | 0,212660 | 2,64e-10 | [0,15742 ; 0,26815] |
| Annee2020 | 0,182875 | 6,61e-08 | [0,12729 ; 0,23869] |
| Annee2021 | 0,273951 | 3,67e-16 | [0,21878 ; 0,32938] |
| Annee2022 | 0,588662 | < 2e-16 | [0,53645 ; 0,64123] |
| Annee2023 | 0,803698 | < 2e-16 | [0,75305 ; 0,85476] |
| Cat_age75+*IBM_sev_semaine | -0,0063361 | 0,004725 | [-0,010064 ; -0,0026552] |

Table 1 : Value, significance and confidence interval for the coefficients of the second NB complete model

With a 5% threshold for the p-values, it was shown that the heat component is a significant variable on the weekly number of policyholders who had to visit the emergency rooms in the model.

Thus, it was proved that there is an obvious positive correlation between the frequency of such visits and the sum of the biometeorological factors. As a result, during a heatwave when the biometeorological indicator is unusually high, the average number of visits increases. However, owing to the impossibility of knowing why these visits occurred, it appears difficult to conclude on a causality.

Regarding hospitalizations, a counterintuitive result was obtained. Indeed, the weekly number of policyholders who had their French daily fee reimbursed is correlated negatively with the heat component. A possible explanation, which shows one of the limits of the study, is the impact of the planned hospitalizations that are taken into account in the model. Here again, the datamart does not allow to separate the latter from heat-related hospitalizations.

Projection up to 2100 of the effect of temperatures on the frequency of visits to the emergency department concerning the SwissLife Santé Retraités portfolio

In this last part, thanks to the previous results, it seemed interesting to study the impact that global warming might have on a portfolio which is supposed to remain constant. Therefore, the GLM coefficients were used again to simulate, with the help of a negative binomial distribution, a projection of the number of policyholders who had to visit the emergency department. This was done for the three IPCC scenarios, namely RCP 2.6, RCP 4.5 and RCP 8.5.

The empirical mean was calculated according to the previously obtained regression coefficients.

Those projections allowed to establish a rough estimate of both the number of policyholders who visited the emergency department and the cost those visits implied. Nevertheless, it should be made clear that such projections ought to be considered in a specific context (causality hypothesis, portfolio of retired people, current law for the French emergency fee, results based on a GLM). Besides, they do not seek to predict the likely evolution of the portfolio, but merely mean to highlight the drift of its loss experience. Concerning the pessimistic and *business as usual* scenarios, this study allowed to show that the level of the loss experience would be at least maintained on the same level as the one the portfolio experienced in 2022 and 2023, or might even be worse in the RCP 8.5 pathway.

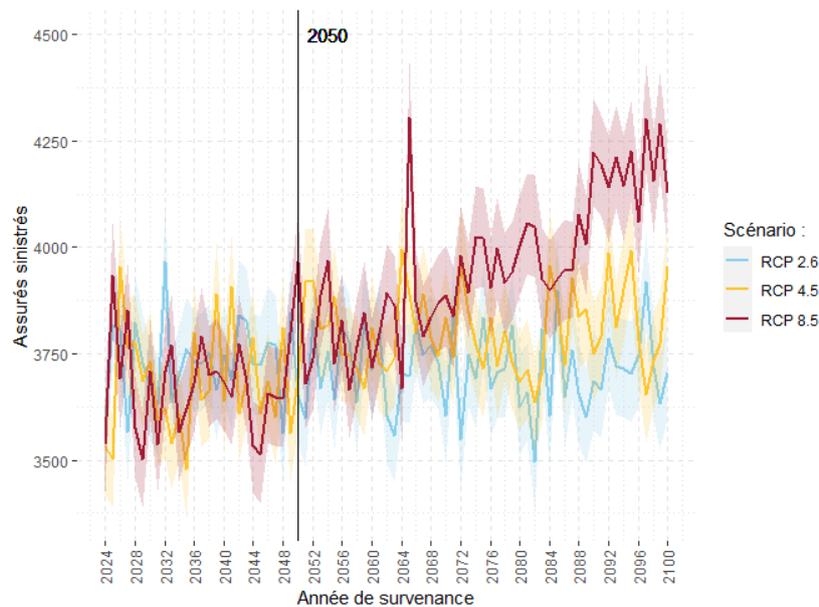


Figure 3 : Simulation of the yearly number of visits to the emergency department

Thus, as soon as the 2050s, this could represent a rise of 5% to 15% in the number of policyholders who have a claim. This would imply an additional cost for SLPS regarding the visits to the emergency department. Moreover, a higher number of policyholders in the emergency rooms might involve a higher number of hospitalizations, and therefore, a higher risk of expensive claims. Obviously, these considerations are based on the results of a GLM, and particularly on the regression coefficient linked to the sum of the biometeorological indicators. This coefficient is likely to change in the future, according to the incoming heatwaves as well as the societal evolution that might result in the population's better capacity to deal with the heat, for instance.

Conclusion

A first study of past summer temperatures in Metropolitan France has shown a rise in the number of heatwaves along with an increase in their duration and intensity over the past years. The climate projections highlight the fact these extreme meteorological events might get worse over the century if the climate policies are not efficient enough to maintain global warming under 2°C. The use of general linear models allowed to reach a conclusion regarding the significance of the heat component over the frequency of emergency visits for the two individual portfolios. Finally, the projections of the loss experience allowed to identify the risk of a drift in unfavourable scenarios, namely RCP 4.5 and RCP 8.5.

Remerciements

Tout au long de la réalisation de ce mémoire, j'ai pu compter sur le soutien indéfectible de plusieurs personnes, aussi bien collaboratrices de SwissLife qu'externes. Ces quelques lignes témoignent de ma sincère reconnaissance envers :

- Adomo Allo, mon tuteur entreprise et actuaire du service Inventaire & MTP qui, par sa disponibilité et son accompagnement, a contribué à l'avancement des travaux de recherche.
- Delphine Drouet d'Aubigny, directrice de la Direction Pilotage & Solvabilité de Swiss Life Prévoyance et Santé, et Sébastien Lebreton, responsable des équipes du service Inventaire & MTP. Je les remercie de m'avoir accueilli au sein des équipes Pilotage & Solvabilité.
- Pierre Montagne et Pierre Marjollet, actuaires évoluant respectivement dans les services Solvabilité & Valeur et Inventaire & MTP. Leur suivi, leur expertise ainsi que leurs conseils m'ont été très précieux pour la progression des travaux.
- Angelo Bozic, Alexandre Dorot, Samir Mameri, Thibault Nicolas, Eugénie Oudin, Julie Ribault, et tous ceux qui auront, d'une manière ou d'une autre, apporté une pierre à l'édifice. Je les remercie pour leur bienveillance, leur disponibilité et leur aide.
- Aurélien Couloumy, mon tuteur pédagogique, qui a pu me conseiller et me guider lors des différents échanges que nous avons eus.
- L'ensemble du corps pédagogique de l'Institut de Science Financière et d'Assurances pour la qualité et la richesse de l'enseignement proposé.

Enfin, je remercie ma mère, mon père, ma sœur et ma famille d'avoir toujours été à mes côtés, dans les moments difficiles comme dans les moments heureux.

« Ce que d'autres ont réussi, on peut toujours le réussir »

Antoine de Saint-Exupéry

Sommaire

| | |
|---|----|
| Résumé..... | 2 |
| Abstract..... | 3 |
| Note de synthèse | 4 |
| Synthesis note | 9 |
| Remerciements | 14 |
| Introduction..... | 17 |
| Partie I - Contexte climatique | 20 |
| Chapitre 1 : Sixième rapport d'évaluation du GIEC | 21 |
| 1.1. Présentation..... | 21 |
| 1.2. Observations historiques | 21 |
| 1.3. Nouveaux scénarios d'évolution | 22 |
| Chapitre 2 : Évolution historique des températures en France métropolitaine | 25 |
| 2.1. Présentation et justification du choix de la base de données | 25 |
| 2.2. Retraitements préliminaires..... | 25 |
| 2.3. Historique des températures estivales en France métropolitaine depuis 2010 | 31 |
| 2.4. Épisodes exceptionnels de chaleur | 36 |
| 2.5. Conclusion et limites de l'étude descriptive | 42 |
| Chapitre 3 : Projection climatique à horizon 2100 | 44 |
| 3.1. Présentation des bases de données de projections | 44 |
| 3.2. Décomposition spatiale..... | 45 |
| 3.3. Réchauffement climatique en France à horizon 2100 | 46 |
| 3.4. Conclusion et limites de l'étude prospective | 53 |
| Partie II - Vulnérabilité à la chaleur..... | 54 |
| Chapitre 1 : Observations générales sur la vulnérabilité à la chaleur | 55 |
| 1.1. Mécanismes physiologiques..... | 55 |
| 1.2. Vulnérabilité à la chaleur | 55 |
| 1.3. Observations relevées par Santé publique France dans le cadre du Plan National Canicule..... | 59 |
| 1.4. Perception de la chaleur par les populations..... | 61 |
| Chapitre 2 : Fonctionnement de l'assurance santé en France | 63 |
| 2.1. La Sécurité sociale et l'Assurance Maladie..... | 63 |
| 2.2. Principe de la prise en charge des frais médicaux..... | 63 |
| 2.3. Remboursement des frais hospitaliers | 65 |
| Chapitre 3 : Étude de la vulnérabilité à la chaleur des assurés SwissLife pour les risques de passage aux urgences et d'hospitalisation..... | 67 |

| | |
|---|-----|
| 3.1. Cadre de l'étude | 67 |
| 3.2. Analyse générale du portefeuille d'étude | 72 |
| 3.3. Modélisation fréquentielle du lien chaleur-risque PaU-H | 77 |
| 3.7. Conclusion et limites de l'étude | 89 |
| Partie III – Étude de cas : Portefeuille SwissLife Santé Retraités | 90 |
| Chapitre 1 : Portefeuille SwissLife Santé Retraités | 91 |
| 1.1. Présentation générale du portefeuille | 91 |
| 1.2. Zoom sur une population d'assurés SLSR | 91 |
| 1.3. Analyse descriptive de l'échantillon d'assurés SLSR | 92 |
| 1.4. Analyse de la sinistralité de l'échantillon pour la survenance 2023 | 94 |
| Chapitre 2 : Quantification du lien entre la chaleur et le risque de passage aux urgences | 101 |
| 2.1. Données de l'étude | 101 |
| 2.2. Modélisation du lien pour le risque de passage aux urgences | 101 |
| Chapitre 3 : Étude prospective de la sinistralité pour les passages aux urgences | 106 |
| 3.2. Projections à horizon 2100 | 106 |
| 3.3. Conclusion de l'étude prospective | 113 |
| Conclusion générale | 115 |
| Table des figures | 118 |
| Bibliographie | 120 |
| Annexes | 122 |
| Annexe A : Groupements de régions | 122 |
| Annexe B : Seuils régionaux | 122 |
| Annexe C : Villes pour les projections de température | 123 |

Introduction

L'évolution du climat dans le monde, indéniablement influencée par l'activité humaine [GIEC, 2023], constitue un des grands enjeux des décennies à venir. En effet, selon la dixième édition du *Future Risks Report* publiée par AXA, pour la première fois depuis le début de la communication de ce rapport annuel en 2014, le changement climatique est placé, aussi bien par les experts que le public général sondés, en première position des risques émergents, et ce, dans chaque région du monde [AXA, 2023]. Ce résultat témoigne de l'inquiétude grandissante des populations quant à l'avenir incertain, mais également d'une prise de conscience graduelle du défi que le changement climatique représente.

Les effets du changement climatique sont nombreux. En France, il est notamment visible à travers une intensification et un allongement des événements météorologiques dits « extrêmes » tels que les épisodes de fortes chaleurs et de sécheresse, les pluies torrentielles ou encore les températures douces en période hivernale. Par ailleurs, la polarisation des saisons se manifeste par une précocité (ou une tardivité) de ces événements.

Ainsi, le changement climatique soulève un questionnement sur la capacité de résilience actuelle et future des êtres humains face à ses conséquences. Ses effets, tant directs (événements météorologiques, montée du niveau des eaux) qu'indirects (aggravation du niveau de pollution, perte de récolte, santé mentale), exposent les individus à des risques de morbidité et mortalité, et les infrastructures, à un risque de dommage. De manière générale, le niveau de vulnérabilité des individus vis-à-vis de ces effets est susceptible d'être profondément affecté et son évolution, comme le précise le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (ci-après dénommé GIEC), dépendra de l'efficacité des politiques climatiques entreprises par les États.

À cause de l'incidence du changement climatique sur la vie des assurés, les mutuelles, institutions de prévoyance et compagnies d'assurance sont des acteurs du marché de l'assurance confrontés à de multiples enjeux. En effet, en parallèle des évolutions réglementaires telles que la réforme du 100% santé en 2021 ou celle sur la prévoyance des travailleurs non-salariés (TNS) en 2022, et de la pandémie de Covid-19, plusieurs facteurs créés ou amplifiés par le dérèglement climatique peuvent affecter directement ou indirectement la sinistralité en santé et prévoyance. Quelques exemples, souvent interdépendants, permettent de mieux comprendre les risques pour un assureur sur ce marché :

- des épisodes de fortes chaleurs telles que la canicule de 2003 qui a entraîné près de 15 000 décès en excès en France métropolitaine [Santé publique France, 2004] ;
- des épisodes de grand froid tels que le vortex polaire de l'hiver 2023 qui a touché le Canada et plusieurs régions des États-Unis comme l'état de New-York ;
- la fonte graduelle du pergélisol qui peut favoriser la réactivation de virus et bactéries contre lesquels l'être humain n'est pas immunisé ;
- la formation d'un environnement propice à l'arrivée d'insectes hématophages tels que *Aedes albopictus*, plus communément appelé moustique tigre et normalement localisé dans les zones tropicales, ce qui peut provoquer l'émergence et la

propagation de maladies vectorielles comme le chikungunya, la dengue ou le virus zika ;

- une hausse de la probabilité d'occurrence de phénomènes météorologiques extrêmes comme les tempêtes (Lothar et Martin en 1999, Xynthia en 2010, Alex en 2020), les inondations (Var en 2010, Alpes-Maritimes en 2015) et les feux de forêts (Californie, Grèce, France, Algérie).

La dernière décennie en France a connu un nombre accru de vagues de chaleur. Un impact non négligeable sur le nombre de passages aux urgences et d'hospitalisations est systématiquement relevé durant ces périodes anormales à l'échelle nationale [Santé publique France, 2016-2022]. Par ailleurs, les projections du GIEC, qui estiment une hausse des températures dans n'importe quel scénario, laissent craindre une complication des étés sur tout le territoire métropolitain dans les années à venir en matière de santé publique.

Swiss Life Prévoyance et Santé (ci-après dénommée SLPS), entité de Swiss Life France, est une compagnie d'assurance gérant exclusivement les risques en santé et prévoyance. En santé, ses activités représentent environ 70% de son chiffre d'affaires. La Direction Pilotage & Solvabilité monitorise l'évolution des indicateurs actuariels et financiers des activités de SLPS et contrôle sa solvabilité dans le cadre des réglementations Solvabilité 2 (S2) et Swiss Solvency Test (SST). Lors de la clôture trimestrielle des comptes, elle est chargée d'évaluer les provisions nécessaires pour permettre à SLPS de faire face à ses engagements vis-à-vis de ses assurés. Il est alors important de bien appréhender une potentielle évolution de la sinistralité résultant du changement climatique afin d'anticiper une éventuelle dérive et d'assurer ainsi la pérennité de son activité.

Dans la littérature actuarielle, le lien entre les passages aux urgences ou hospitalisations et les vagues de chaleur est peu documenté. Dans un contexte de crise climatique, ce mémoire se veut être une ouverture sur le sujet et a ainsi un double objectif : chercher à établir un lien entre le risque de passages aux urgences ou d'hospitalisation et les vagues de chaleur, et essayer d'apporter une vision prospective de la sinistralité associée pour un portefeuille SLPS dans un but de prise de conscience et d'anticipation.

Par conséquent, à partir de données concrètes, ce mémoire tentera de répondre à la problématique centrale suivante :

Comment mesurer l'impact des vagues de chaleur sur le risque de passages aux urgences et d'hospitalisation ?

Ce mémoire ne répond donc pas un problème de tarification mais cherche à proposer une démarche pour intégrer la chaleur comme facteur exogène dans le cadre d'une problématique actuarielle concernant les assurés de SLPS.

La première partie se veut centrée sur le climat afin de justifier l'intérêt du sujet porté par le mémoire. Elle résume les principaux messages défendus par le sixième rapport de synthèse du GIEC avant de faire l'état des lieux des températures et des épisodes de forte chaleur que le territoire métropolitain a connus depuis 2010. À l'aide d'un couple de modèles climatiques, des projections de température minimale et maximale retenues sont ensuite présentées à horizon 2100 selon trois scénarios types du GIEC : un pessimiste, un optimiste et un *business as usual*. Elles permettront, pour chaque trajectoire envisagée, de comprendre l'évolution future des températures et les caractéristiques des canicules qu'elle impliquerait.

Par la suite, une présentation succincte du lien entre la santé et la température est faite, en mentionnant les facteurs de vulnérabilité relevés dans la littérature. Une recherche d'une corrélation entre la température et les passages aux urgences et hospitalisations sur la base de l'historique des températures estivales de 2010 à 2023 ainsi que sur les données de santé de SLPS est menée. Elle tente de comprendre, d'un point de vue fréquentiel, s'il existe un effet significatif des épisodes de forte chaleur sur la sinistralité d'un portefeuille d'assurés, comme il peut être constaté à l'échelle nationale dans les communiqués de santé publique. Enfin, dans l'objectif de comprendre le coût supplémentaire que pourrait présenter une intensification des vagues de chaleur sur la sinistralité, une étude prospective jusqu'en 2100 est mise en place sur un portefeuille de SLPS à l'aide des projections climatiques décrites en première partie concernant les passages aux urgences. À travers un exemple, elle cherche à mettre en évidence, selon les différents scénarios, l'effet qu'aurait le réchauffement climatique sur un portefeuille actuel.

Partie I - Contexte climatique

Chapitre 1 : Sixième rapport d'évaluation du GIEC

1.1. Présentation

La publication de la synthèse du sixième rapport d'évaluation du GIEC (AR6), le 20 mars 2023, marque la fin du sixième cycle d'évaluation du climat et fait suite au dernier rapport de référence communiqué en 2014, l'AR5. Ainsi, il réalise un nouvel état des lieux grâce à la dernière littérature scientifique en date sur le climat, constate l'efficacité des mesures prises par les gouvernements dans le cadre de leurs politiques climatiques, et propose un panel de projections climatiques plus complet. Enfin, des suggestions pour atténuer les effets du changement climatique et faciliter la transition vers des énergies plus durables sont données.

Ce rapport est le fruit de la collaboration de plusieurs centaines d'auteurs et relecteurs qui composent trois groupes de travail, dont chacun a un sujet d'étude spécifique dédié. L'AR6 est composé de plusieurs rapports spéciaux communiqués entre 2018 et 2019, ainsi que de trois volets, à savoir :

- « *The Physical Science Basis* » (publication en août 2021, Groupe de travail I) ;
- « *Impacts, Adaptation and Vulnerability* » (publication en 2022, Groupe de travail II) ;
- « *Mitigation of Climate Change* » (publication en 2022, Groupe de travail III).

Dans le rapport, la période de référence est celle retenue par l'Accord de Paris de 2015, c'est-à-dire la période préindustrielle (1850-1900). En réalité, la transition d'un mode de production basé sur l'eau et le vent vers celui reposant sur le charbon a commencé dès la moitié du XIX^{ème} siècle. Néanmoins, les répercussions de l'activité anthropogénique sur le climat sont principalement constatées plusieurs décennies plus tard. En effet, l'évolution climatique dispose d'un temps d'inertie [GIEC, 2023].

1.2. Observations historiques

Sur la période 2013-2022, la température à la surface a évolué en moyenne de +1,15°C (par rapport à la période de référence), en particulier sur terre, où l'augmentation est de 1,65°C. Le GIEC précise que l'activité humaine a provoqué, à elle seule, un réchauffement global de plus de 1°C. Cependant, l'augmentation n'est pas uniforme, elle varie selon les régions : les régions historiquement froides (calottes glaciaires, Sibérie), le Canada et l'Europe sont les plus touchées.

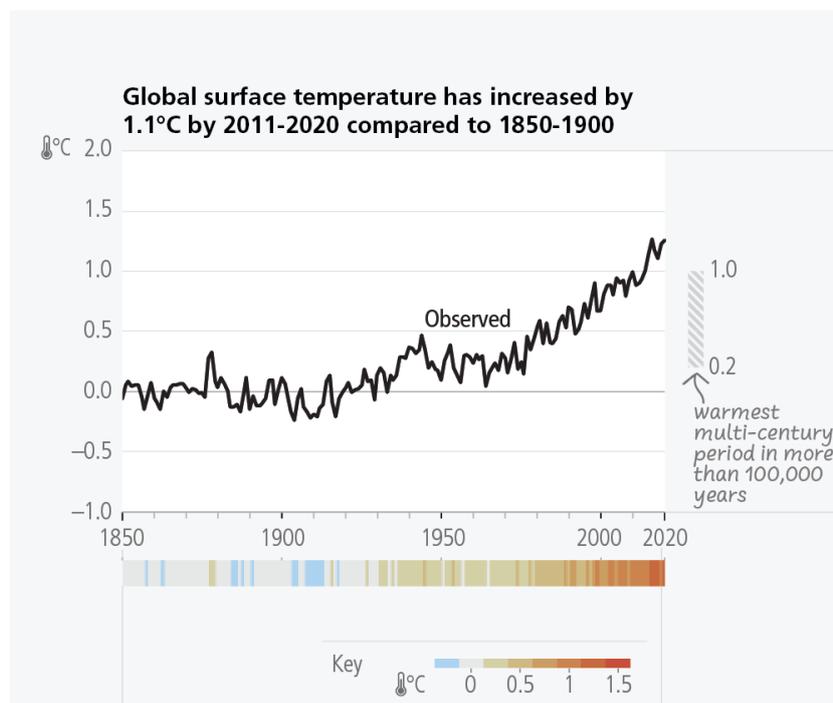


Figure I.1.1 : Évolution de l'écart de température entre la période de référence et 2011-2020
(source : GIEC)

Cette hausse est essentiellement causée par l'émission de gaz à effet de serre, notamment de dioxyde de carbone (CO₂) et de méthane (CH₄), qui sont respectivement responsables d'un réchauffement moyen de 0,8°C et de 0,5°C sur la période 2010-2019. En effet, en 2019, l'augmentation des émissions nettes de gaz à effet de serre est principalement imputable aux secteurs de l'énergie (34%), de l'industrie (24%) et du transport (15%). Les concentrations respectives en CO₂ et CH₄ dans l'air atteignent alors 410 parties par million (ppm) et 1896 parties par milliard (ppb) en 2021 contre moins de 300 ppm et moins de 1000 ppb en 1850.

Les conséquences sur le système climatique sont nombreuses et déjà visibles. Par exemple, entre 1901 et 2018, le niveau de la mer a augmenté en moyenne de 0,2 m, les océans se sont acidifiés et ont connu un réchauffement sans précédent qui compte pour 91% du réchauffement du système climatique. Par ailleurs, la fonte des glaciers de montagnes et calottes polaires contribue à la montée des eaux [CNRS]. Enfin, une amplification des événements extrêmes comme les vagues de chaleur, les pluies torrentielles ou les cyclones est observée dans le monde.

1.3. Nouveaux scénarios d'évolution

Le sixième rapport d'évaluation présente plusieurs nouveaux scénarios qui tiennent compte de variables anthropogéniques socio-économiques telles que le PIB, l'évolution de la population et l'urbanisation [GIEC, 2021]. Ces scénarios, appelés *Shared Socio-economic Pathways* (SSP), peuvent être assimilés aux *Representative Concentration Pathways* (RCP) des précédents rapports, bien qu'il existe quelques différences. Ils visent à couvrir un plus large éventail de possibilités que les RCP. Établis par le premier groupe de travail, ils reposent sur des données historiques à compter de 2015, sont initialement au nombre de neuf et sont désignés sous la forme SSPx-y où :

- SSPx est le chemin socio-économique emprunté, avec x le numéro du scénario ;
- y désigne la valeur du forçage radiatif (en $W * m^{-2}$) en 2100.

Pour le GIEC, le forçage radiatif est celui du système climatique surface-troposphère et peut être entendu comme le bilan radiatif lié aux perturbations introduites (par exemple, les émissions de gaz à effet de serre résultant des activités de l'être humain), c'est-à-dire la différence entre la puissance radiative reçue (du Soleil) et la puissance radiative émise par le système climatique (grâce à ses propriétés réfléchissantes) [GIEC, 2001].

À l'image du scénario SSP5-8.5, un forçage radiatif positif élevé se traduit donc par un important excédent de puissance radiative reçue et s'interprète par un réchauffement conséquent du système.

Les chemins socio-économiques, notés de 1 à 5, décrivent des trajectoires plus ou moins optimistes choisies par les États, notamment en termes d'investissements dans la santé publique et de politique climatique pour la transition vers des énergies plus durables. Ils peuvent être résumés de la manière suivante :

| <i>Shared socio-economic pathway (SSP)</i> | Développement humain | Politique d'adaptation climatique | Chemin représenté |
|--|----------------------|-----------------------------------|---|
| SSP1 | Positif | Positif | Durable |
| SSP2 | Neutre | Neutre | Intermédiaire |
| SSP3 | Négatif | Négatif | Rivalités régionales |
| SSP4 | Négatif | Négatif | Inégalités |
| SSP5 | Positif | Très négatif | Utilisation intense des énergies fossiles |

Table I.1.1 : Chemins socio-économiques présentés dans le sixième rapport de synthèse du GIEC

Ainsi, le SSP2 correspond à un scénario intermédiaire qui reste cohérent avec ce qui est constaté aujourd'hui (scénario non-choqué).

Les scénarios SSP1 et SSP5, bien qu'ils considèrent un développement humain positif, divergent sur la politique de développement durable : l'un se base sur une bonne application des mesures d'atténuation du réchauffement et de transition vers les énergies renouvelables tandis que l'autre maintient une économie basée sur une utilisation intensive des énergies fossiles.

Enfin, les SSP3 et SSP4 sont des scénarios pessimistes qui supposent un développement des sociétés perturbé par des inégalités et rivalités persistantes, les mettant en position de vulnérabilité face au changement climatique.

Finalement, cinq trajectoires SSPx-y sont retenues et correspondent à différents scénarios d'émissions et de concentrations de GES possibles. Ils impliquent alors un réchauffement climatique propre comme le montre le graphique suivant :

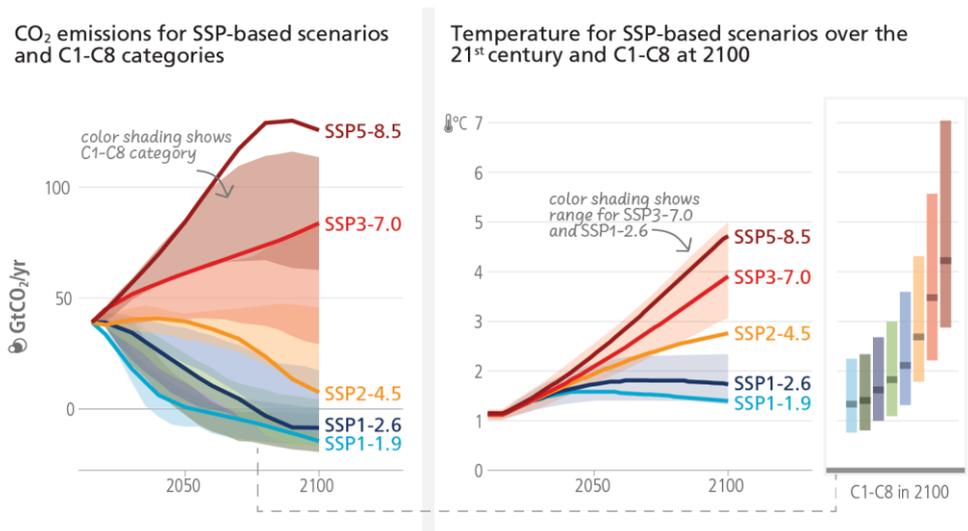


Figure I.1.2 : Projections des émissions de CO₂ et de réchauffement climatique par scénario SSP (source : GIEC)

Les scénarios d'émissions SSP1-1.9 et SSP1-2.6 correspondent à des trajectoires où le réchauffement climatique est maintenu en dessous des 2°C. Il est intéressant de noter que seul le SSP1-1.9 honore les ambitions de la COP27 : parvenir à rester en dessous des 1,5°C de réchauffement.

Le SSP2-4.5 est, quant à lui, la trajectoire *business as usual* et montre que le réchauffement peut approcher les 3°C d'ici 2100 si les efforts ne s'intensifient pas. Les émissions de GES resteraient à un niveau constant jusqu'en 2050 avant de décroître, ce qui traduirait un manque d'efficacité de la politique climatique mondiale.

Finalement, les scénarios pessimistes SSP3-7.0 et SSP5-8.5 prévoient une hausse continue des émissions de GES et un réchauffement climatique *best estimate* respectif de 3,6°C et 4,4°C. En ce qui concerne le scénario « catastrophe », le réchauffement s'établirait même à 2,4°C au milieu du siècle et pourrait atteindre 5,7°C en 2100 (avec un intervalle de confiance à 90%).

En résumé, toutes les projections estiment un réchauffement climatique sur la décennie à venir, et seulement deux trajectoires optimistes supposent une limitation du réchauffement sur le siècle. Néanmoins, tous les scénarios considèrent un réchauffement plus important qu'aujourd'hui. Du fait de la hausse de la température des océans, thermorégulateurs à l'échelle planétaire, et de l'air, les vagues de chaleur marines et terrestres devraient gagner en fréquence et en amplitude avec le réchauffement. En particulier, cette accélération est déjà visible en France.

Chapitre 2 : Évolution historique des températures en France métropolitaine

2.1. Présentation et justification du choix de la base de données

Météo France met gratuitement à disposition une base de données météorologiques regroupant des observations issues des messages internationaux d'observation en surface (SYNOP), dont la gestion est assurée par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) à travers le système mondial de télécommunication (SMT). Elle propose, pour 62 stations sur le territoire métropolitain et en dehors, des relevés trihoraires de plusieurs indicateurs météorologiques comme la température, l'humidité, la pluviométrie ou encore la vitesse du vent. L'historique s'étend du 1^{er} janvier 2010 à aujourd'hui.

La fiabilité de la source, la fréquence des relevés météorologiques, la couverture géographique disponible ainsi que la profondeur de l'historique furent des critères déterminants dans le choix de la base de données. D'autres bases de données plus complètes étaient également fournies par Météo France mais nécessitaient malheureusement l'achat d'une licence qui pouvait s'avérer très onéreuse.

2.2. Retraitements préliminaires

Afin d'exploiter les données, et d'assurer la qualité et la véracité de l'évolution des indicateurs de température, un travail conséquent de préparation fut nécessaire. Des étapes de suppression, de transformation et d'enrichissement ont été menées.

Pour un historique de données trihoraires allant du 1^{er} janvier 2010 au 30 septembre 2023 inclus, l'articulation des retraitements préliminaires est détaillée par la suite.

2.2.1. Éliminations

L'étude portant sur la France métropolitaine, les stations localisées dans les territoires d'outre-mer et les Terres australes et antarctiques françaises n'ont pas été conservées. De plus, du fait de la bonne qualité initiale de la donnée, peu de doublons sont présents et les quelques valeurs qui pouvaient paraître aberrantes ont été transformées. Le détail des stations qui ont été retirées de l'étude est présenté ci-dessous :

Suppressions sur les observations

Nombre d'observations avant retraitements : 2 324 616

| 1. Stations | | Observations supprimées : 657 027 (28,26%) |
|---------------------|-------------------------|--|
| Station | Observations supprimées | Motif |
| Cayenne-Matoury | 40 104 | DROM |
| Crozet | 35 022 | Terres australes et antarctiques |
| Dumont d'Urville | 35 547 | Terres australes et antarctiques |
| Europa | 32 615 | Terres australes et antarctiques |
| Gillot-Aéroport | 38 266 | DROM |
| Glorieuses | 32 585 | Terres australes et antarctiques |
| Juan de Nova | 14 412 | Terres australes et antarctiques |
| Kerguelen | 38 086 | Terres australes et antarctiques |
| La Désirade Météo | 16 968 | DROM |
| Lamentin-Aéro | 39 467 | DROM |
| Le Raizet Aéro | 39 594 | DROM |
| Maripasoula | 33 693 | DROM |
| Nouvelle-Amsterdam | 37 069 | Terres australes et antarctiques |
| Pamandzi | 28 313 | DROM |
| Saint-Georges | 35 661 | DROM |
| Saint-Laurent | 36 503 | DROM |
| St-Barthélémy Météo | 16 661 | COM |
| St-Pierre | 39 733 | COM |
| Trinité-Caravel | 32 780 | DROM |
| Tromelin | 33 948 | Terres australes et antarctiques |
| 2. Doublons | | Observations supprimées : 5 |

Nombre d'observations après retraitements : 1 667 584

Table I.2.1 : Suppressions sur les observations de la base de données météorologiques SYNOP

Au total, les données de 20 stations situées en dehors du territoire métropolitain ont été retirées, ce qui représente près de 28% du nombre d'observations.

En outre, seules les variables exploitables et utiles pour l'étude ont été conservées. Pour certaines variables redondantes (comme la température exprimée en Kelvin et en degré Celsius), la version la plus pertinente a été gardée (en l'occurrence, les variables de température exprimées en degré Celsius). Quant aux variables avec un nombre conséquent de données non renseignées, bien qu'elles eussent pu apporter une information complémentaire, elles ne furent pas conservées, car difficilement exploitables en conséquence.

Suppressions sur les variables

Nombre de variables avant retraitements : 82

| | |
|---|---------------------------|
| 1. Variables incompatibles avec l'étude | Variables supprimées : 54 |
| 2. Variables redondantes | Variables supprimées : 8 |
| 3. Variables insuffisamment renseignées | Variables supprimées : 5 |

| Variable | Observations manquantes |
|---|-------------------------|
| Température minimale sur 12 heures (°C) | 79,48% |
| Température minimale sur 24 heures (°C) | 91,12% |
| Température maximale sur 12 heures (°C) | 79,55% |
| Température maximale sur 24 heures (°C) | 91,20% |
| Température minimale du sol sur 12 heures (en °C) | 58,34% |

Nombre de variables après retraitements : 15

Table I.2.2 : Suppressions sur les variables de la base de données météorologiques SYNOP

2.2.2. Transformations

Peu de transformations ont été requises. La principale transformation fut réalisée sur la date de relevé des observations qui est décrite sous le format « AAAA-MM-JJTHH:MM:SS+HH:MM » peu manipulable. Par conséquent, de nouvelles variables *Year*, *Month*, *Day* et *Hour* ont été créées à partir de celle-ci. Par ailleurs, les relevés trihoraires prennent en considération le changement d'heure. Par souci de simplicité, la base horaire UTC+2 est conservée et appliquée pour chaque observation. Finalement, dans une journée, les relevés sont au nombre de 8, démarrent à 2h et terminent à 23h. Quelques corrections visant à homogénéiser les codes départementaux de Haute-Corse et Corse-du-Sud ont également été réalisées, car certaines disparités étaient présentes.

2.2.3. Enrichissement des données à disposition

Le travail de reconstruction des données a été le plus important. En effet, les stations météorologiques ne disposent pas nécessairement d'un historique trihoraire complet sur la période. Plus précisément, les données manquantes pouvaient être sous plusieurs formes :

- la ligne d'observation est présente mais le relevé de température absent et la station semble toujours enregistrer ;
- la ligne d'observation est présente, mais le relevé de température absent, car la station semble avoir fermé ;
- la ligne d'observation n'existe pas mais la station semble toujours enregistrer sur la période ;
- la ligne d'observation n'existe pas, car la station ne semble pas encore opérationnelle.

Les deuxième et quatrième cas désignent les stations qui ne disposent pas nécessairement d'un historique complet sur la période considérée. Il s'agit des stations de Reims-Prunay, pour laquelle les relevés ne commencent qu'en 2012, et de Cap Cépet qui ne communique plus de relevés à partir de 2020, ce qui laisse penser qu'elle n'est plus en service.

La répartition des observations se présente comme suit, sachant que les observations complètes et les observations présentes, mais non renseignées, forment le total des observations disponibles :

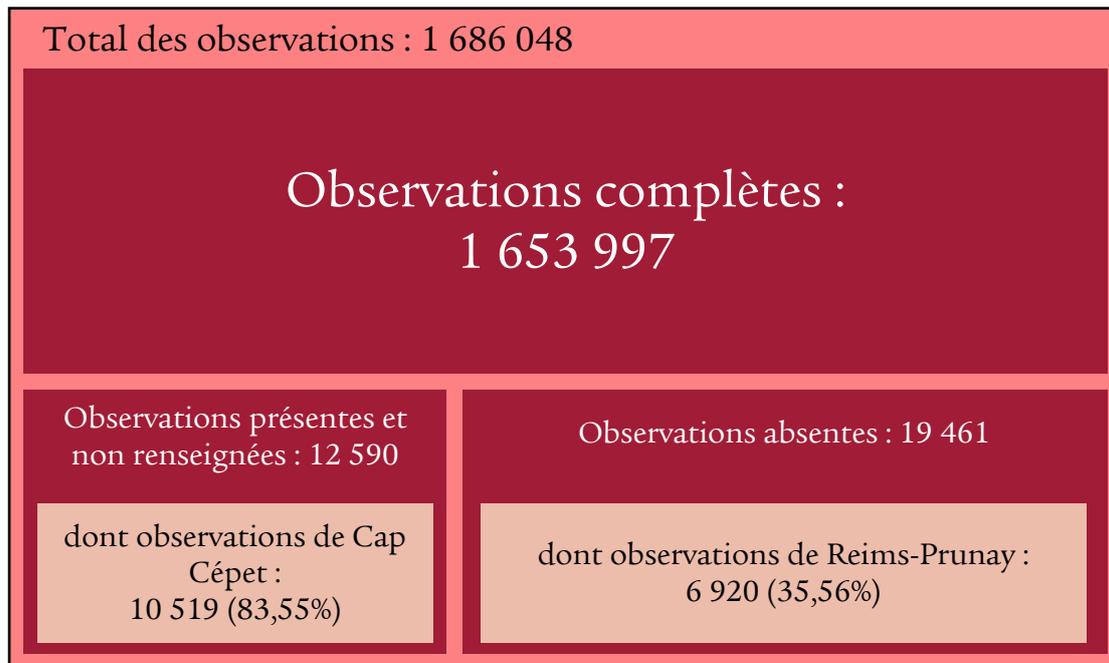


Figure I.2.1 : Répartition des observations météorologiques

La première étape consiste alors à reconstruire les observations manquantes afin d'aboutir à un historique homogène et complet pour chaque station, soit 40 144 observations. Cette phase est nécessaire pour pouvoir suivre au mieux l'évolution passée des jours caniculaires et des nuits tropicales qui seront définis plus loin.

La méthode retenue se base sur la moyenne des températures au même moment que celui du relevé absent, pour toutes les années d'historique disponibles. Autrement dit :

$$T^i(abs, m, d, h) = \frac{\sum_k \omega_k T^i(k, m, d, h)}{\sum_k \omega_k}$$

avec :

- T^i la température horaire de la station i ;
- abs l'année pour laquelle l'observation est manquante ;
- k les années pour lesquelles les observations sont disponibles ;
- m le mois d'observation ;
- d le jour d'observation ;
- h l'heure d'observation ;
- ω_k le poids associé à l'année d'observation k , dont l'expression est :

$$\omega_k = 1 - \frac{|abs - k| - 1}{\max\left(abs - \min_{a < abs}(a); \max_{a > abs}(a) - abs\right)}$$

Le poids, bien que discutable d'un point de vue climatique, permet de donner plus d'importance aux observations associées aux années proches de l'année manquante. En effet, même si le réchauffement ne constitue pas nécessairement une trajectoire croissante monotone, la tendance reste tout de même à la hausse entre 2010 et 2023, comme le montre ce graphique des écarts à la normale des températures moyennes en France métropolitaine :

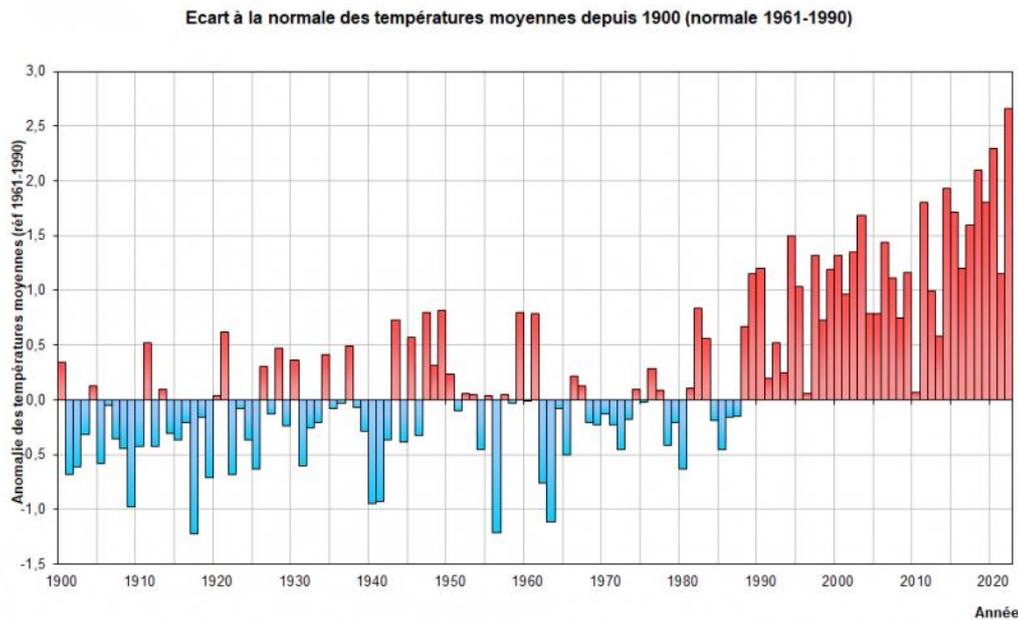


Figure I.2.2 : Historique des écarts à la normale des températures moyennes en France métropolitaine (*source : Météo France*)

Ainsi, des records d'écarts à la normale ont été relevés de plus en plus régulièrement ces dernières années.

D'autres méthodes se basant sur les températures disponibles des stations les plus proches ou sur la moyenne d'une période donnée pourraient également être choisies.

Pour les stations de Reims-Prunay et Cap Cépet, un traitement supplémentaire fut mené. En effet, la méthode précédente est efficace lorsqu'il s'agit de compléter des observations manquantes sur plusieurs heures, voire plusieurs journées, mais ne fonctionne guère lorsque plusieurs années d'historique sont absentes. Il fut alors choisi de s'inspirer des séries temporelles de la station la plus proche ou la plus pertinente géographiquement, à savoir Nice pour Cap Cépet, et Nancy-Ochey pour Reims-Prunay. Ainsi, la correction apportée sur ces périodes est la suivante :

$$T^i(y, m, d, h) = \alpha_i T^{ref}(y, m, d, h)$$

avec les mêmes notations que précédemment et :

- *ref* la station de référence ;
- α_i un quotient pour la station *i* défini par :

$$\alpha_i = \frac{\sum_k \beta_k \frac{T_k^i}{T_k^{ref}}}{\sum_k \beta_k}$$

avec :

- T_k la température moyenne de l'année k pour une station donnée ;
- β_k un poids.

Pour la station de Cap Cépet, l'historique s'étend de 2010 à 2019. La station de référence est Nice et, pour $k = 2010, \dots, 2019$, une moyenne annuelle des températures est calculée sur les années pleines. Les poids pour ces années valent respectivement 1, ..., 10 et permettent de tenir compte de l'évolution globale des températures moyennes. Quant à la station de Reims-Prunay, pour laquelle les enregistrements ne débutent qu'en 2012, la température annuelle est calculée sur 2013, ..., 2022 et les poids valent 10, ..., 1.



Figure I.2.3 : Températures moyennes annuelles pour les stations de Cap Cépet, Nice, Nancy-Ochet et Reims-Prunay

2.2.4. Traitement des départements non référencés

L'étude s'intéresse à l'évolution des températures à la maille administrative départementale. Par conséquent, les stations disponibles ne permettent pas de couvrir toute la France métropolitaine. Pour y remédier, l'historique des températures pour les départements ne possédant pas de station météorologique fut calculé sur la base de celui des départements voisins possédant une station.

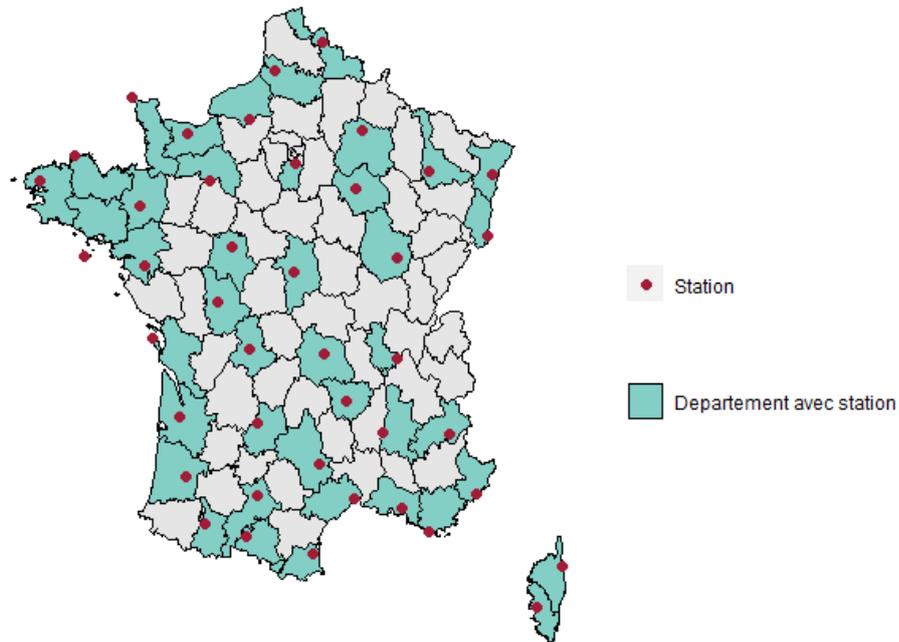


Figure I.2.4 : Répartition des stations météorologiques sur le territoire

Le raisonnement adopté est le suivant :

- si aucun département possédant une station ne borde le département à compléter, le plus proche voisin est retenu ;
- si un département possédant une station borde le département à compléter, il est retenu ;
- si plusieurs départements possédant une station bordent le département à compléter, une moyenne des historiques de température de chacun d'entre eux est retenue.

À titre d'illustration, Paris hérite de la station de l'Essonne qui est la plus proche géographiquement. Néanmoins, cette méthode a ses limites, car elle omet les potentiels îlots de chaleur associés à la pollution des zones urbaines qui peuvent amplifier les phénomènes de pics et vagues de chaleur l'été jusqu'à 10°C [CNRS, 2021]. Par ailleurs, la France métropolitaine peut connaître un rapide changement géographique et climatique d'un département à l'autre. Par exemple, le département de Haute-Savoie a pour plus proche voisin la station du Rhône, département au climat semi-continentale. La station des Hautes-Alpes fut conservée exceptionnellement du fait de son climat montagnard, plus cohérent avec celui de la Haute-Savoie.

2.3. Historique des températures estivales en France métropolitaine depuis 2010

Dans cette section, l'objectif est de présenter, à travers une étude descriptive, les températures moyennes et extrêmes en France, de décrire leur évolution sur la période 2010-2023, et ainsi justifier l'intérêt de la problématique en fonction des résultats obtenus. Afin de s'affranchir des températures hivernales qui ne rentrent pas dans le cadre de l'étude, l'analyse est réalisée du 1^{er} mai au 30 septembre de chaque année. Choisir d'intégrer les mois de mai et septembre permet de prendre en considération les éventuels épisodes de chaleur précoces ou tardifs survenus par le passé, mais aussi dans le futur lors des projections, où il n'est pas impossible que des températures anormales se produisent plus tôt ou plus tard. Dans la suite du mémoire, cette partie de l'année constitue **la période de référence de l'étude**.

2.3.1. Températures moyennes et extrêmes

La France est un pays riche du fait de ses nombreux climats. Météo France en dénombre cinq grands types.



Figure I.2.5 : Climats de la France métropolitaine (source : Météo France)

Bien que plusieurs indicateurs façonnent un climat, les températures moyennes sur la période permettent d'ores et déjà de distinguer plusieurs zones, comme celles des climats méditerranéen, océanique et de montagne. La moyenne nationale sur l'historique de l'étude est de 18,6°C et constitue la référence.

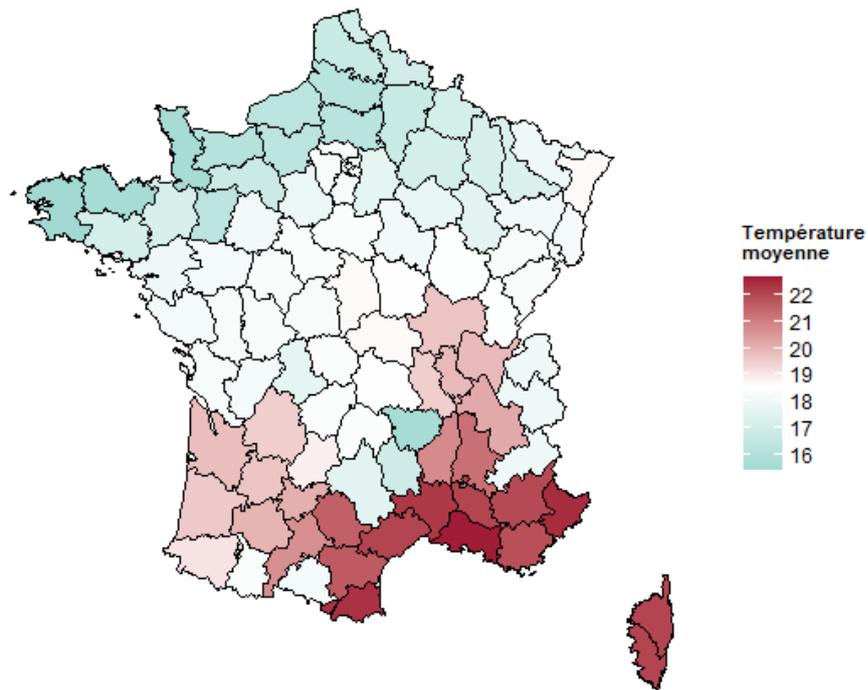


Figure I.2.6 : Températures moyennes sur 2010-2023

Le bassin méditerranéen recense les températures moyennes les plus élevées (22-23°C) et le Nord de la France les plus basses (15-16°C).

En complémentarité avec les températures moyennes, il peut être intéressant de voir la répartition des températures maximales. Pour conserver une tendance globale et s'affranchir des éventuelles journées avec des températures exceptionnelles, le choix porte plutôt sur le 95^{ème} quantile et est moyenné sur la période.

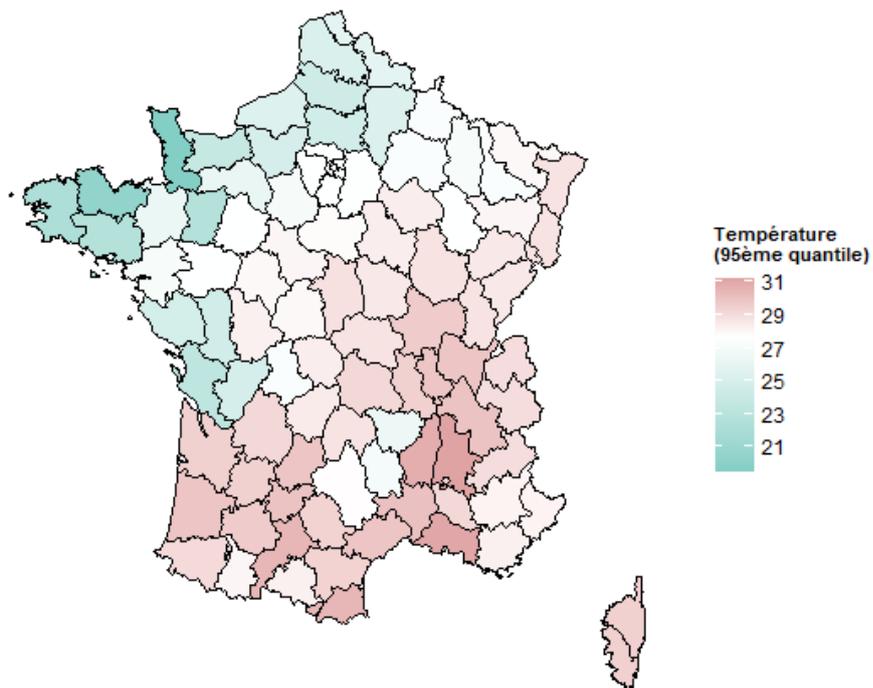


Figure I.2.7 : 95^{ème} quantile de température sur 2010-2023

Sur la période d'étude, la Bretagne, la Normandie et les Hauts-de-France connaissent des températures clémentes grâce à l'océan Atlantique et la Manche qui facilitent la régulation de la température de l'air. Néanmoins, avec le réchauffement des océans, l'efficacité de ladite régulation risque d'être amoindrie.

De manière générale, le 95^{ème} quantile moyenné sur la période est de 27,7°C et une partie importante de la France connaît des étés assez chauds.

2.3.2. Évolution des températures

La section précédente a permis de décrire brièvement la température moyenne à la maille départementale à l'aide de l'historique disponible. Dans le but de constater une tendance qui viendrait corroborer les messages du GIEC et de la littérature grise, cette partie vient quantifier son évolution. Pour faciliter la représentation, des regroupements de régions, dont le détail est disponible en annexe A, ont été réalisés. Ils tentent de tenir compte de plusieurs critères tels que la cohérence climatique et géographique.

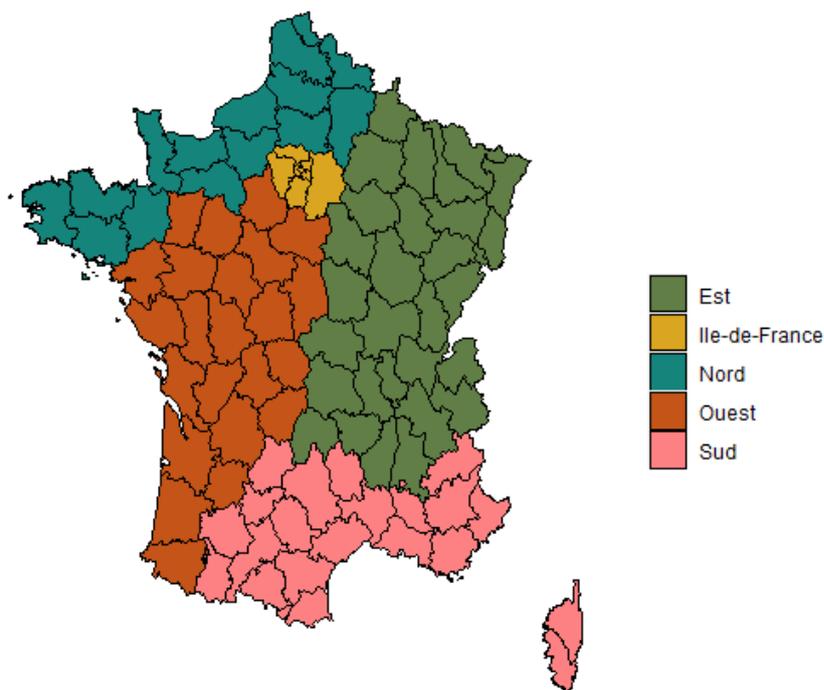
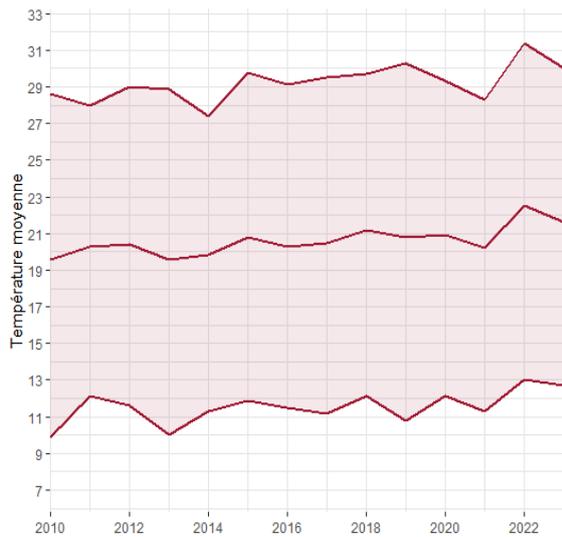
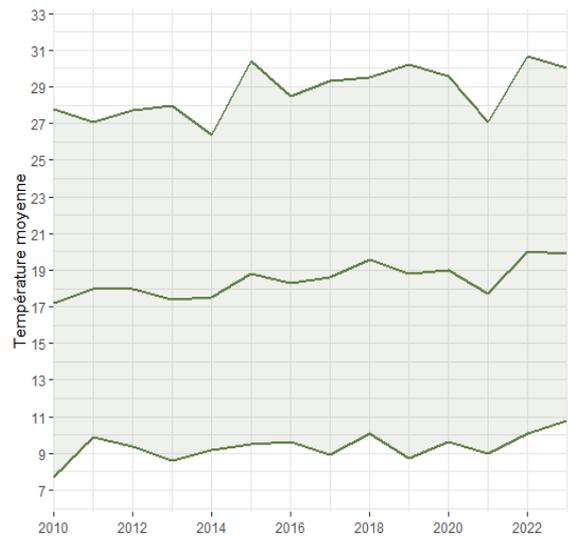


Figure I.2.8 : Carte des groupements de régions

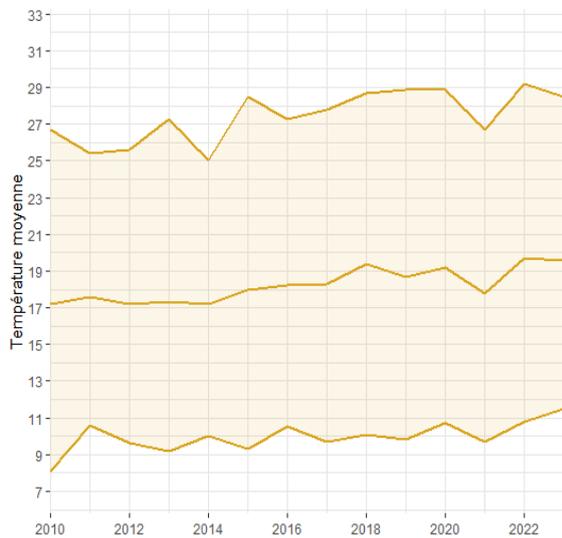
Pour chaque groupement géographique, les températures moyennes annuelles ainsi que les 5^{ème} et 95^{ème} quantiles moyennés sur l'année ont été représentés sur la période d'étude.



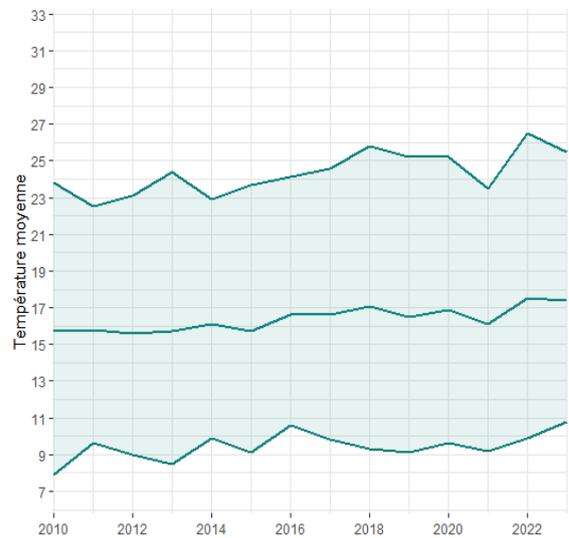
(a)



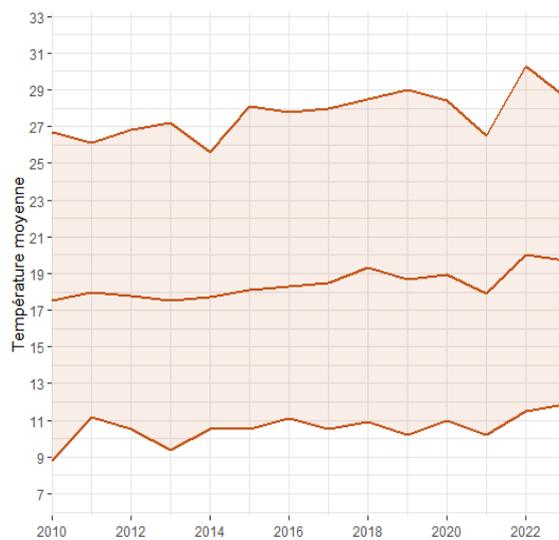
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure I.2.9 : Températures moyennes annuelles et quantiles 5% et 95%
 (a) : Sud ; (b) : Est ; (c) : Île-de-France ; (d) : Nord ; (e) : Ouest

À l'exception de l'année 2021, dont les mois de juillet et août furent assez frais, la période de mai jusqu'à septembre a connu des températures, aussi bien moyennes qu'extrêmes, plus élevées durant ces dernières années qu'il y a une décennie. À titre d'illustration, les années 2020-2023 ont connu des températures moyennes supérieures de 1,5 °C par rapport à 2010-2013 sur le territoire national. Un élément notable est la hausse moyenne du 95^{ème} quantile pour les régions du Nord, de l'Est et de l'Ouest, qui est de +1,7 °C en 2020-2023 par rapport à 2010-2013, tandis qu'elle s'établit pour les régions du Sud à +1,1 °C. En détaillant la hausse par département, elle est portée par les départements situés dans les terres intérieures qui sont moins sujettes à la régulation de température propre au climat océanique.

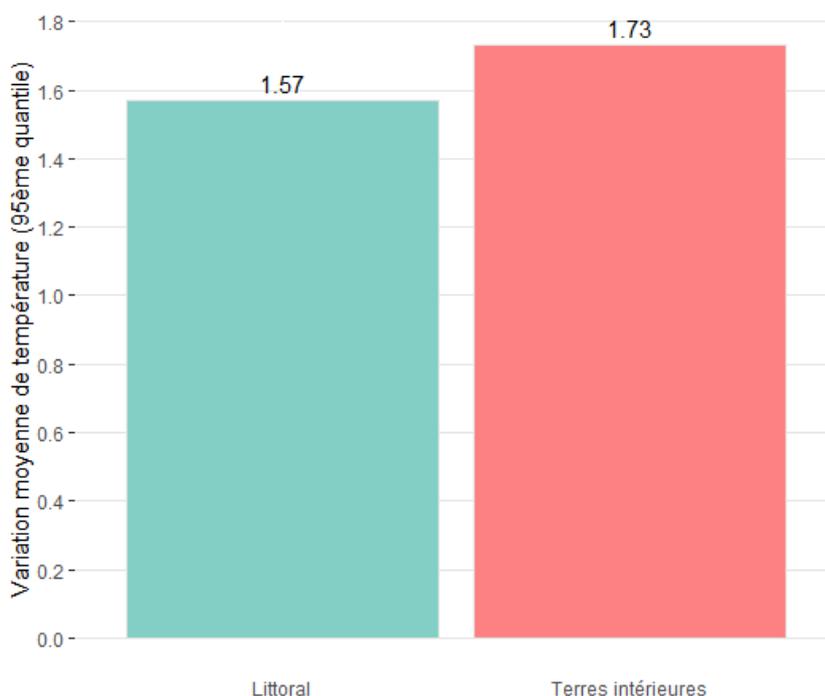


Figure I.2.10 : Variation moyenne du 95^{ème} quantile de température entre 2010-2013 et 2020-2023 (°C)

2.4. Épisodes exceptionnels de chaleur

2.4.1. Contexte

En période estivale, des épisodes de forte chaleur peuvent se produire. Suite aux températures historiques de 2003 qui ont eu des répercussions sanitaires conséquentes (environ 15 000 décès en excès sont attribués à la chaleur), l'État français a décrété, en 2004, la mise en place d'un Plan National Canicule (PNC) qui vise à mobiliser des moyens légaux pour répondre aux enjeux sanitaires liés aux épisodes de chaleur. Pour anticiper ces phénomènes météorologiques et faciliter la communication avec les populations, le PNC inclut un système d'alerte canicule en santé (Sacs) conçu par l'Institut de veille sanitaire (InVS) et Météo France.

La problématique résidait dans la création d'un indicateur météorologique qui capture avec la plus grande précision la surmortalité liée aux températures anormalement élevées. En d'autres termes, il s'agissait d'établir des seuils d'alerte au-delà desquels le phénomène météorologique pourrait représenter une menace sanitaire sérieuse, se traduisant par un excès de mortalité.

Par conséquent, des travaux de recherche ont été menés sur la base de la surmortalité historique, en corrélation avec les températures relevées, pour parvenir à la naissance d'un tel indicateur qui serait appliqué à l'échelle nationale [Santé publique France, 2006].

Dans le cadre du PNC, l'indicateur biométéorologique (IBM) retenu est le couple (IBM_{min} , IBM_{max}), dont chacun des termes désigne respectivement la moyenne des températures minimales et la moyenne des températures maximales sur trois jours :

$$IBM_{min}(i) = \frac{1}{3} \sum_{k=i}^{i+3} T_{min}(k); IBM_{max}(i) = \frac{1}{3} \sum_{k=i}^{i+3} T_{max}(k)$$

Quatorze villes de référence suffisamment réparties sur le territoire métropolitain ont ensuite été sélectionnées pour déterminer des seuils d'IBM propres au climat de la région. Finalement, à partir des seuils de ces villes et de considérations climatologiques [Santé publique France, 2006], des seuils départementaux ont été définis. A l'exception des villes de Paris, Marseille et Lyon, qui disposent d'un climat particulier du fait des îlots de chaleur, ces seuils ont été calculés sur la base du 99,5^{ème} quantile de la distribution de l'IBM sur 1981-2010 [Santé publique France, 2012].

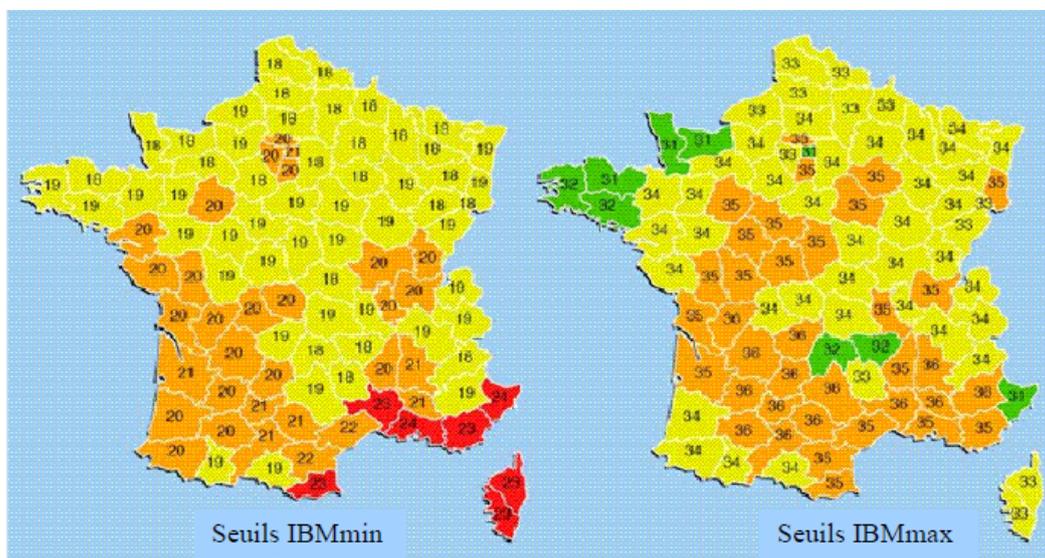


Figure I.2.11 : Seuils des IBM (IBM_{min} et IBM_{max}) départementaux (source : Météo France)

Les seuils IBM_{min} sont fixés, notamment pour la nuit, et les seuils IBM_{max} , pour la journée. Les couleurs sur les cartes ne sont *a priori* qu'une aide visuelle et ne reflètent pas un seuil de dangerosité plus ou moins grand, chaque seuil étant lui-même un niveau d'alerte propre au département, qui a un climat qui lui est particulier et une population dont la résilience est plus ou moins importante selon qu'elle est régulièrement exposée aux températures élevées (dans le sud de la France par exemple) ou non.

2.4.2. Définition des phénomènes météorologiques de l'étude

La détermination de seuils d'alerte biométéorologiques départementaux permet finalement de qualifier les phénomènes de forte chaleur en fonction de leur sévérité et leur durée. En effet, selon qu'ils franchissent les seuils, ou encore selon leur étendue sur le territoire national, leur appellation diffère. Ceci montre bien que les définitions ci-après sont intrinsèques au système d'alerte canicule en santé et ne s'appliquent aucunement de façon universelle.

Pour qualifier un épisode de forte chaleur, l'expression communément employée est « vague de chaleur ». Selon l'Organisation Météorologique Mondiale, la vague de chaleur se définit de manière générale comme « une période de conditions atmosphériques anormalement chaudes et désagréables ». Cette définition est intéressante, car elle mentionne le ressenti physiologique, ce qui est souvent la raison pour laquelle le terme est employé dans les discussions quotidiennes et les médias.

En parallèle, des expressions plus précises, s'appuyant sur les seuils d'alerte canicules, sont proposées par Météo France :

- Le **pic de chaleur** désigne un épisode de chaleur de moins de deux jours durant lequel les températures sont supérieures aux normales de saison de 5°C à 10°C. Les seuils d'alerte sont presque atteints ;
- L'**épisode persistant de chaleur** qualifie un épisode de chaleur de plus de trois jours pendant lequel les températures sont supérieures aux normales de saison de 5°C à 10°C mais les IBM restent en dessous des seuils d'alerte ;
- La **canicule** est un épisode de forte chaleur qui perdure pendant au moins trois jours et trois nuits consécutifs, et durant lequel les IBM atteignent les seuils d'alerte, voire les dépassent ;
- La **canicule extrême** (exemple : canicule d'août 2003) est une canicule d'intensité et d'étendue exceptionnelles. Les seuils d'alerte départementaux sont significativement dépassés.

Ainsi, une distinction est faite selon le niveau d'intensité, de durée et d'étendue géographique du phénomène. En accord avec le PNC, cette dernière permet d'associer un niveau d'alerte à un ou plusieurs événements météorologiques en fonction de l'indicateur IBM et de considérations sociétales (notamment pour la canicule extrême).

2.4.3. Niveaux d'alerte et communication météo

Selon le niveau de sévérité de la situation météorologique et sociale, le Sacs propose trois niveaux d'alerte :

- une veille obligatoire des indicateurs météorologiques et sanitaires assurée par l'InVS et Météo France est effective chaque année sur la période du 1^{er} juin au 31 août ;

- un niveau de mise en garde et actions (dit Miga) si au moins une canicule est effective ou anticipée afin de permettre aux préfets de mettre en œuvre des moyens d'information et de soutien aux populations. Le plan blanc pour les hôpitaux peut, par exemple, être activé ;
- en cas de situation exceptionnelle qui nécessite de mobiliser des moyens importants du fait des sévères répercussions (sécheresse, saturation des hôpitaux), le Sacs permet également l'activation d'un niveau de mobilisation maximale qui implique l'intervention du Premier ministre dans le déroulement du PNC.

Le niveau d'alerte Miga peut ainsi être associé aux canicules tandis qu'une mobilisation maximale peut avoir lieu en cas de canicule extrême telle que celle d'août 2003.

Enfin, dans le cadre de la communication par Météo France sur la situation météorologique à travers des cartes de vigilance météo, un lien, bien que non vérifié systématiquement, entre le code couleur (vert, jaune, orange, rouge) de la carte et les phénomènes météorologiques, peut être fait. Ainsi, les phénomènes dont les IBM restent en dessous des seuils, tels que le pic et l'épisode persistant de chaleur, seront assimilés à un niveau de vigilance jaune tandis que les canicules et canicules extrêmes se verront respectivement attribuer un niveau de vigilance orange et rouge. Cependant, comme évoqué précédemment, la construction d'un niveau de vigilance va au-delà de considérations biométéorologiques (IBM) et fait intervenir d'autres critères (situation sanitaire, avis expert des prévisionnistes, intervention de l'InVS) [Santé publique France, 2006].

2.4.4. Évolution des canicules sur le territoire métropolitain

La hausse graduelle des températures influe sur la probabilité d'occurrence des canicules et leur intensité dans le monde [GIEC, 2023]. Cette section cherche à représenter leur évolution sur le territoire métropolitain depuis l'été 2010.

L'identification d'une canicule nécessite la prise en compte des seuils d'alerte départementaux. Par souci de simplification, des seuils d'alerte régionaux disponibles en annexe B sont constitués en moyennant les seuils des départements d'une région donnée.

Le calcul préliminaire des températures minimale et maximale se fait respectivement sur :

- 20H00 (UTC+2) J-1 jusqu'à 20H00 (UTC+2) J pour la température minimale T_{min} ;
- 8H00 (UTC+2) J jusqu'à 8H00 (UTC+2) J+1 pour la température maximale T_{max} .

La base de relevés trihoraires permet ainsi de réaliser un tel calcul.

Par la suite, l'historique des indicateurs IBM_{min} et IBM_{max} est établi pour chaque département en calculant la moyenne mobile des températures minimales et maximales sur J, J+1 et J+2, où J est le jour de référence. Enfin, en conservant la définition donnée en 2.4.2, le nombre de canicules survenues sur le territoire peut être déduit. Comme la période d'étude est assez courte et par souci de pertinence, deux périodes 2010-2016 et 2017-2023 sont constituées pour permettre la comparaison.

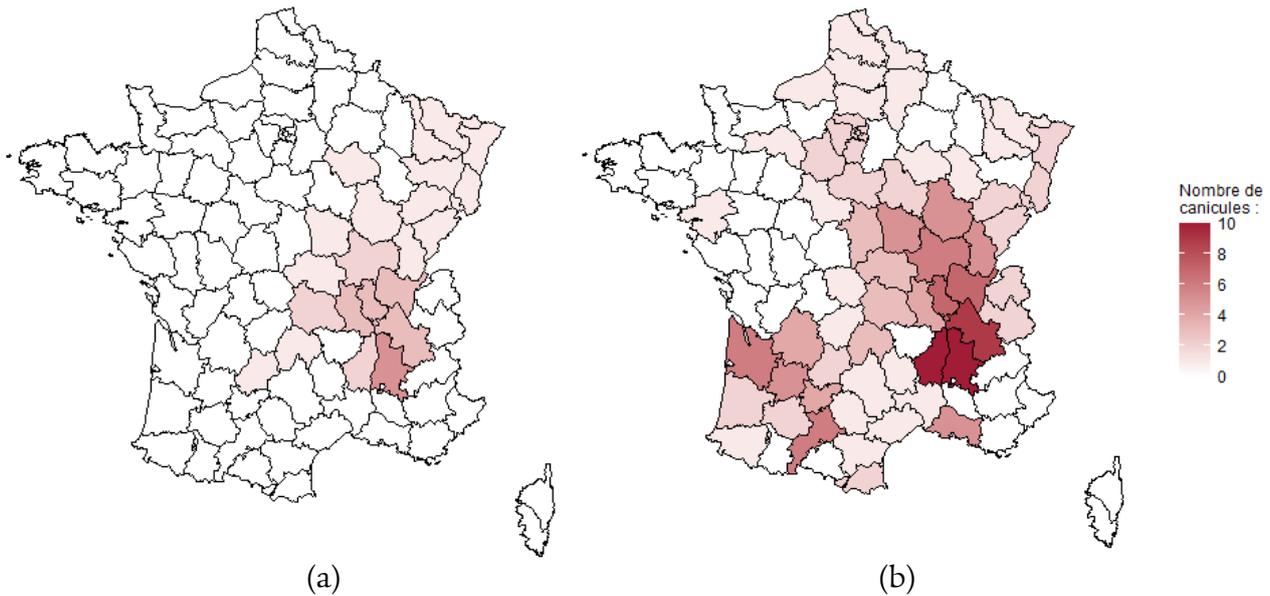


Figure I.2.12 : Nombre de canicules par département
(a) : 2010-2016 ; (b) : 2017-2023

Entre 2010 et 2016, les épisodes de canicule (comme ils ont été définis précédemment) furent rares, et concentrés en Auvergne-Rhône-Alpes et dans le Grand Est. L'été 2015 fut le plus chaud pour cette période avec une température moyenne au-dessus des normales 1981-2010 de 1,5°C. Toutefois, depuis 2017, les records de température se sont succédé. Outre une fréquence globale accrue, la propagation du phénomène est notable (Nouvelle-Aquitaine, Occitanie, Île-de-France). La région des Hauts-de-France, traditionnellement froide, a même été touchée en août 2020.

Cette augmentation de la fréquence du phénomène météorologique s'accompagne d'une intensification. Pour une canicule, l'intensité I s'interprète comme l'excédent maximal de température au-dessus des seuils IBM [Santé publique France, 2017] :

$$I = \max_j (IBM_{min}(j) - Seuil_{min}(dep)) + \max_j (IBM_{max}(j) - Seuil_{max}(dep))$$

avec :

- j le jour caniculaire considéré ;
- dep le département considéré.

Ainsi, une intensité exceptionnelle dans une région historiquement peu impactée peut impliquer l'activation d'une vigilance rouge par Météo France, comme ce fut le cas lors de l'épisode caniculaire dans les Hauts-de-France en 2020.

Le graphique suivant montre un léger renforcement moyen de l'intensité pour les départements qui ont eu au moins une canicule entre 2010 et 2016, sauf pour le Grand Est qui a connu des canicules aux températures plus clémentes. De plus, il met en valeur l'intensité considérable des canicules de 2019 et 2020 survenues en Île-de-France (environ +10°C) et celle de 2020 qui a touché les Hauts-de-France (environ +7,6°C).

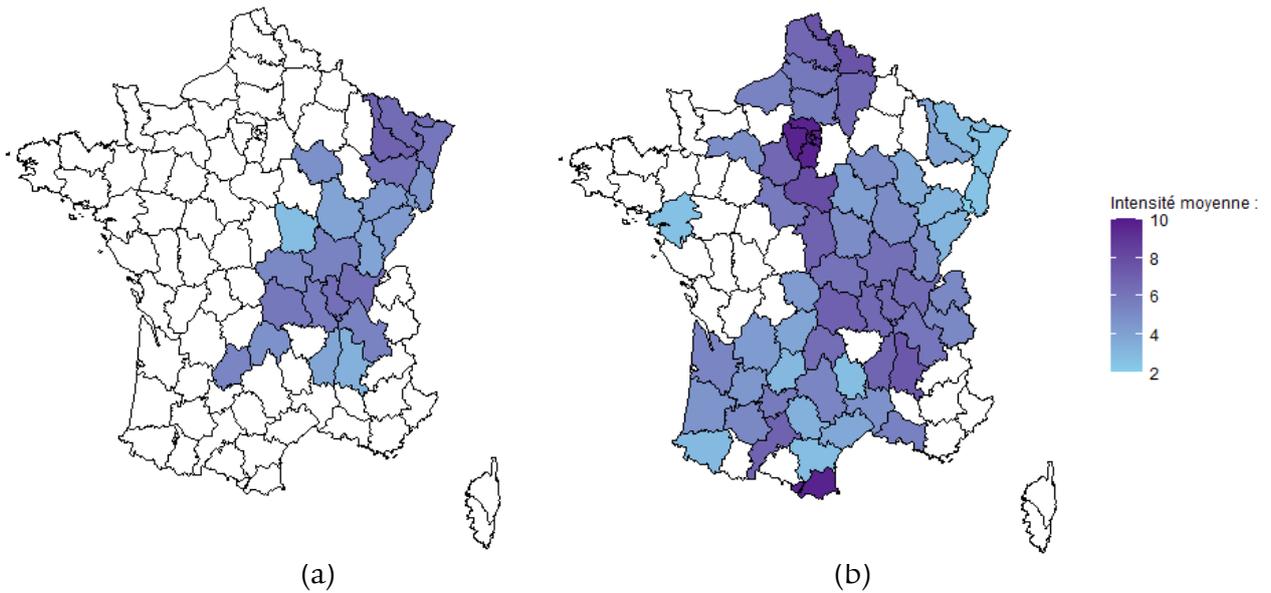


Figure I.2.13 : Intensité moyenne des canicules par département (en °C)
 (a) : 2010-2016 ; (b) : 2017-2023

Enfin, les récentes canicules sont remarquables par leur durée, certaines pouvant durer plus d'une semaine comme ce fut le cas en 2023 pour certains départements d'Auvergne-Rhône-Alpes (département du Rhône, par exemple). En moyenne, la durée des canicules varie entre trois et six jours. Cependant, avec une fréquence en hausse, ces événements météorologiques peuvent se succéder sur un même été.

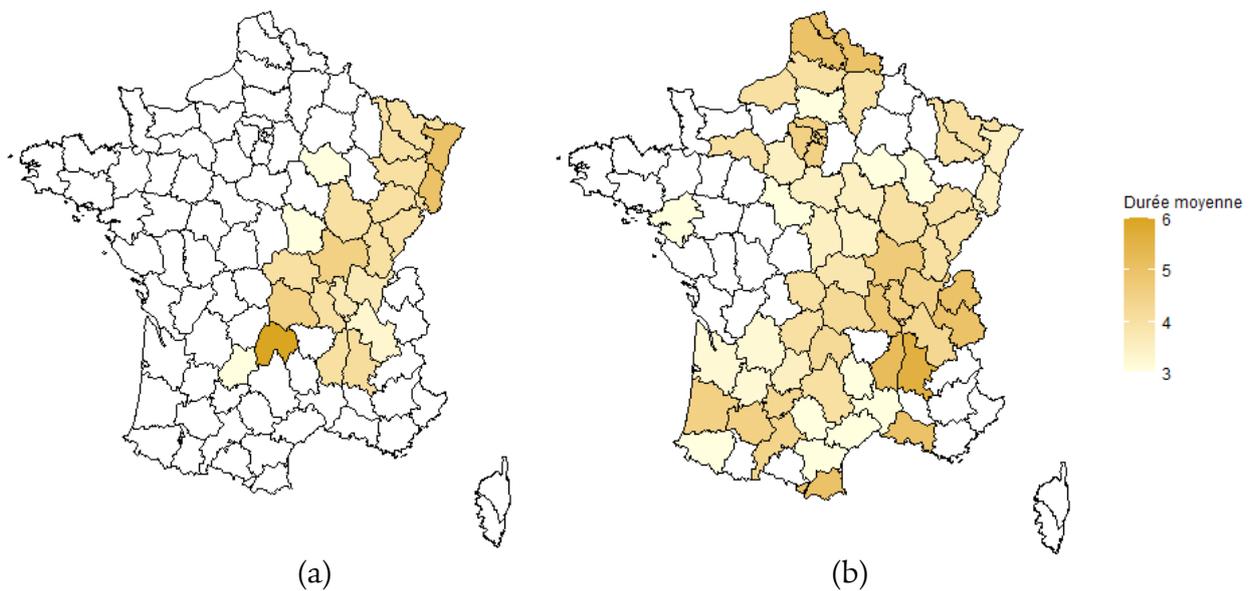


Figure I.2.14 : Durée moyenne des canicules par département (en jours)
 (a) : 2010-2016 ; (b) : 2017-2023

2.5. Conclusion et limites de l'étude descriptive

À partir des données météorologiques et d'un travail de préparation, l'étude portant sur les températures en France depuis 2010 a pu montrer une hausse progressive notable des températures en période estivale. Des épisodes de canicule se manifestent plus fréquemment, se font plus intenses et touchent régulièrement une plus grande partie du territoire métropolitain. L'étude vient ainsi corroborer les messages climatiques portés par le sixième rapport d'évaluation du GIEC qui alerte sur l'effet des activités anthropogéniques sur l'évolution des températures dans le monde. Depuis 2004, suite aux événements tragiques de la canicule d'août 2003, le système d'alerte canicule en santé (Sacs) permet d'alerter sur l'imminence ou la présence de vagues de chaleur sur le territoire métropolitain, caractérisées selon leur niveau d'intensité, d'étendue et de durée, et mises en comparaison avec des seuils d'indicateurs biométéorologiques.

Toutefois, du fait des retraitements que l'analyse a impliqués, ces résultats méritent d'être nuancés. Plusieurs limites et propositions d'amélioration sont évoquées :

- en plus des considérations pratiques, le choix d'une maille administrative départementale permet de rester cohérent avec le cadre de définition des seuils d'alerte canicule. Cependant, l'application des relevés de température d'une station à l'ensemble du département reste une approximation. En effet, à titre d'illustration, la station Cap Cépet (Saint-Mandrier-sur-Mer) est située sur une presqu'île et il n'est alors pas imprudent de dire que les données météorologiques relevées sur les terres intérieures varoises peuvent différer. Ce raisonnement peut s'appliquer à toutes les stations notamment situées sur le littoral. Par ailleurs, des stations situées en zone rurale peuvent omettre le phénomène d'îlot de chaleur des grandes métropoles. La mise en place d'un lissage spatial permet un gain en précision mais sort du cadre de l'étude ;
- par manque de stations, les séries de température de plusieurs départements ont été construites sur la base des stations adjacentes et en fonction de la pertinence géographique (relief, climat).

Néanmoins, au global, cela ne remet pas en cause l'évolution constatée sur la période 2010-2023 et donc la justification de l'enjeu climatique qui constitue l'objet de cette partie. Les données des 42 stations initialement récupérées ont pu représenter une partie conséquente du territoire métropolitain.

Outre la question concernant l'exactitude des données, il s'en pose une autre sur la pertinence des seuils des indicateurs biométéorologiques dans le cadre de l'étude :

- ces seuils ont été construits à partir d'une analyse de la mortalité en France et visent à évaluer au mieux à partir de quel moment une surmortalité liée aux fortes chaleurs peut être observée. Cependant, comme le constatent les bulletins de Santé publique France, l'évolution du risque de passage aux urgences ou d'hospitalisation (et même de mortalité) peut être visible même en dessous de ces seuils (pics de chaleur, épisodes persistants de chaleur). En effet, le décès représente l'événement ultime. Si des seuils devaient être définis à l'avenir quant au risque d'hospitalisation, il serait

intuitif de supposer qu'ils soient plus faibles, les individus présentant généralement des pathologies en premier lieu. La détermination de tels seuils peut constituer une ouverture. Dans ce mémoire, les seuils d'alerte canicule sont conservés ;

- comme son nom l'indique, l'indicateur biométéorologique dépend de considérations météorologiques et biologiques. Les seuils d'alerte sont ainsi intrinsèquement liés à des évolutions climatique et sociétale futures (capacité d'adaptation des populations, prévention, politique climatique). Ils peuvent donc être amenés à évoluer dans les décennies à venir.

Chapitre 3 : Projection climatique à horizon 2100

En s’inscrivant dans la continuité de l’étude précédente, et toujours dans un objectif de justification de l’enjeu climatique pour les activités de SLPS, ce chapitre présente des projections de température issues de modèles climatiques et basées sur trois scénarios du GIEC, à savoir les RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5. Il vise à apporter une idée claire du risque de multiplication et d’intensification des vagues de chaleur dans l’année en fonction de la trajectoire climatique envisagée.

3.1. Présentation des bases de données de projections

3.1.1. Modèles climatiques du DRIAS

Les données servant aux projections climatiques sont récupérées sur le site du DRIAS grâce aux recherches menées par les laboratoires français de l’Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), du Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (CERFACS) et du Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM). La découverte de cette source fut possible grâce au mémoire de Gaëlle PINCEMIN (2021) qui s’intéresse également aux projections des canicules pour mesurer l’impact de ces dernières sur le risque de mortalité. Le portail DRIAS rend facilement accessibles les modèles climatiques européens tels que ceux conçus par le CNRM, et le processus d’extraction des données est intuitif et gratuit. Ainsi, cette source constitue un choix intéressant lorsque des travaux actuariels nécessitent l’intervention d’une vision prospective du climat sur le territoire métropolitain. En effet, 42 simulations climatiques, dont 30 au total pour trois scénarios du GIEC, les RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5, sont disponibles grâce à 12 couples de modèles RCM/GCM.

Les modèles RCM (*Regional Climate Model*) simulent des données climatiques pour l’Europe à une résolution d’environ 12 km. Ces simulations sont contrôlées à leurs bords par les modèles GCM (*Global Climate Model*) issus de la cinquième phase du projet d’intercomparaison des modèles couplés CMIP5. Elles sont finalement projetées sur une grille de 8 km de résolution pour la France. Enfin, une correction statistique (notamment du biais) est effectuée avec la méthode ADAMONT.

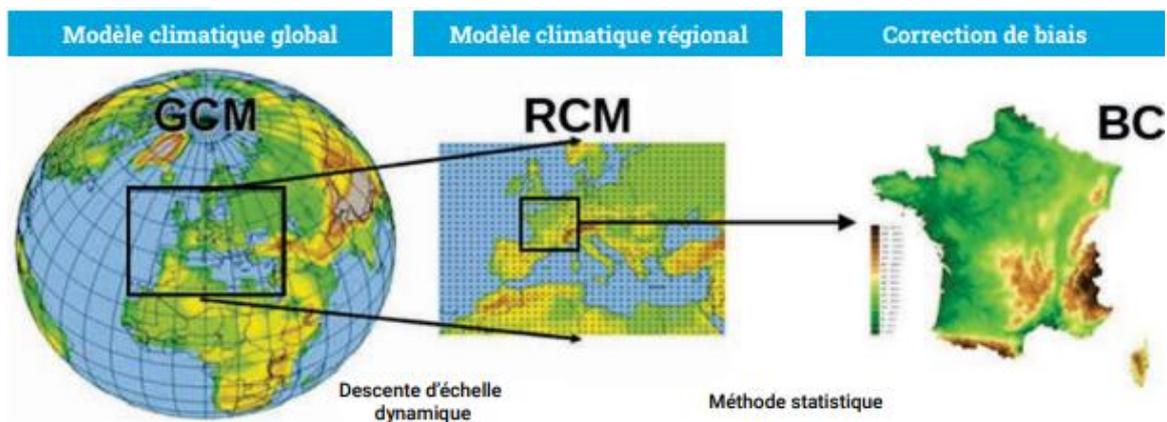


Figure I.3.1 : Résumé des étapes de descente d’échelle

3.1.2. Choix du couple RCM/GCM

Préliminairement, le choix d'un modèle climatique régional couplé à un modèle de forçage doit être fait parmi le panel de modèles disponibles. Ces couples de modèles supposent, pour chaque scénario, des évolutions de température plus ou moins fortes d'ici 2100. Par exemple, pour la saison estivale, les modèles ci-dessous évaluent un réchauffement dans le cadre du scénario RCP 4.5 pouvant aller jusqu'à +3,6°C pour le couple HadGEM2/CCLM4-8-17 :

JJA [2071-2100] - [1976-2005]

| Modèles | Delta |
|-------------------------|--------|
| HadGEM2 / CCLM4-8-17 | 3,6 °C |
| EC-EARTH / RCA4 | 2,5 °C |
| NorESM1 / HIRHAM5 | 2,5 °C |
| IPSL-CM5A / RCA4 | 2,3 °C |
| EC-EARTH / RACMO22E | 2,2 °C |
| CNRM-CM5 / ALADIN63 | 2,1 °C |
| MPI-ESM / REMO2009 | 1,9 °C |
| MPI-ESM / CCLM4-8-17 | 1,8 °C |
| CNRM-CM5 / RACMO22E | 1,4 °C |
| IPSL-CM5A / WRF381P | 0,9 °C |
| 5 ^e centile | 1,1 °C |
| Médiane | 2,2 °C |
| 95 ^e centile | 3,1 °C |

Figure I.3.2 : Réchauffement projeté pour chaque modèle à horizon 2071-2100 (saison estivale et RCP 4.5)

Un bon compromis est le modèle climatique régional ALADIN63 forcé par le modèle CNRM-CM5 qui se situe proche de la médiane pour chaque scénario. Il possède également des projections pour chacun des trois scénarios du GIEC. Par la suite, il est retenu pour les projections. Le portail du DRIAS met à disposition **trois séries de températures journalières : les températures maximale, minimale et moyenne** pour un point donné.

3.2. Décomposition spatiale

Le maillage spatial des modèles étant relativement fin (8 km de résolution), il n'est pas possible de récupérer les données de chaque point pour toute la France métropolitaine. Par conséquent, à l'image de l'étude menée par l'InVS et Météo France dans la recherche des seuils IBM départementaux, les points de quatorze villes de référence ont été récupérés. Le détail des zones extraites est disponible en annexe C. Ces villes sont dispersées sur le

territoire et ont pour objectif de représenter au mieux, en moyenne, le réchauffement futur en France métropolitaine. Un rayon de 30 km est retenu. Cela permet de ne pas récupérer systématiquement uniquement les points des chefs-lieux et grandes villes mais aussi les points situés en zone rurale. Une quarantaine de points est récupérée pour chaque ville, ce qui reste acceptable en termes de volume d'extraction et de temps d'exécution.

Ainsi, pour chaque zone géographique, comme définies en annexes A et C, les séries de températures de chaque point SAFRAN récupéré et situées dans une telle zone seront moyennées afin d'obtenir un réchauffement moyen à un niveau plurirégional. En d'autres termes, l'étude s'intéresse au réchauffement local de cinq zones géographiques qui sont celles établies précédemment :

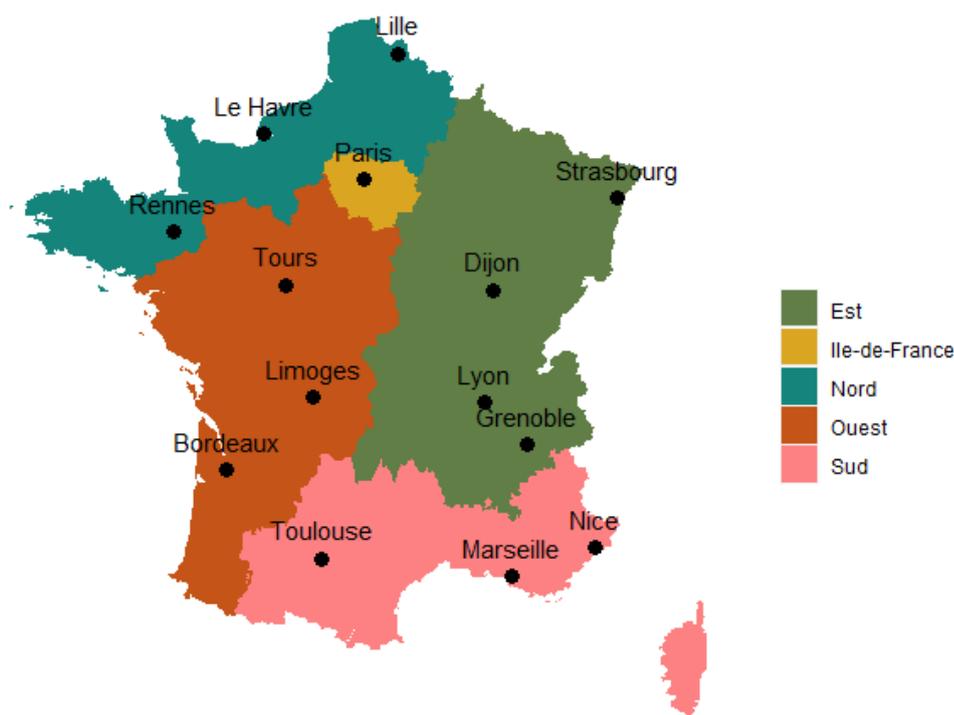


Figure I.3.3 : Découpage géographique pour les projections du réchauffement climatique sur le territoire métropolitain

Pour garder une cohérence, ce découpage est conservé pour les développements futurs. Par ailleurs, pour comparer les canicules projetées avec les canicules historiques, il n'était pas pertinent de récupérer directement les données de l'étude précédente qui s'intéressait aux températures à la maille départementale. Par conséquent, le même traitement sera appliqué à ces données historiques (2010-2023).

3.3. Réchauffement climatique en France à horizon 2100

3.3.1. Réchauffement moyen par scénario

Chaque scénario RCP suppose un réchauffement global à horizon 2100 en fonction de plusieurs facteurs anthropogéniques comme l'émission de gaz à effet de serre résultant des activités humaines. Cette section cherche à représenter le réchauffement moyen annuel

sur la période d'étude pour chaque zone en France dans le cadre de ces scénarios. Ici, le réchauffement est entendu comme l'écart de température à la température moyenne calculée sur 2010-2023 pour chaque zone géographique. Ce choix, plutôt que l'utilisation des normales actuelles (1991-2020) adoptées en 2022, relève de considérations pratiques au regard des données déjà disponibles.

Les températures moyennes calculées sur 2010-2023 entre mai et septembre sont présentées ci-dessous :

| Zone géographique | Température moyenne 2010-2023 |
|--------------------------|--------------------------------------|
| Est | 18,5°C |
| Île-de-France | 18,2°C |
| Nord | 16,4°C |
| Ouest | 18,4°C |
| Sud | 20,6°C |

Table I.3.1 : Température moyenne 2010-2023 dans chaque zone géographique

Avec une variabilité plus ou moins importante, le réchauffement attendu pour le territoire métropolitain reste assez similaire et stable entre les trois scénarios avant 2050, avec un écart pouvant aller parfois jusqu'à 3°C par rapport à 2010-2023. A partir de 2023, le scénario RCP 8.5 se distingue par une hausse progressive du réchauffement, atteignant 5°C, voire 6°C à la fin du siècle. Le scénario RCP 4.5 se maintient à un niveau de réchauffement annuel assez variable (entre 1°C et 3°C). Quant au scénario optimiste, il reste globalement en deçà des 2°C. Ceci dépend toutefois de la région considérée. Par exemple, dans le cas où cette trajectoire serait empruntée, le Nord connaîtrait un réchauffement plus proche des 2°C, tandis que l'Est ou le Sud seraient témoins d'un réchauffement aux alentours de 1°C. Enfin, il peut être relevé que la simulation climatique prévoit un pic considérable des températures moyennes pour l'année 2065, avec une variation de 4,7°C à 5,8°C selon la région. Cela pourrait impliquer un ou plusieurs phénomènes météorologiques d'intensité sans précédent.



Figure I.3.4 : Projections du réchauffement annuel pour les RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5
 (a) : Est ; (b) : Île-de-France ; (c) : Nord ; (d) : Ouest ; (e) : Sud

3.3.2. Évolution prospective des canicules

En fonction de la trajectoire climatique retenue, il peut être intéressant de voir les caractéristiques des vagues de chaleur futures en comparaison avec celles que la population a connues ces dernières décennies. En particulier, cette section s'intéresse aux canicules telles qu'elles sont définies par Météo France.

Pour chaque zone géographique, un seuil d'alerte est calculé sur la moyenne des seuils d'alerte régionaux définis en annexe B pour les régions appartenant à cette zone. Seuls les seuils pour l'Île-de-France ne varient pas, car la région est seule dans le groupement. L'Île-de-France est isolée afin de regarder l'évolution des canicules susceptibles de se produire dans la capitale et ses environs. Cependant, il convient de noter que Paris est la seule ville ayant été sélectionnée pour cette région. Malgré un rayon de sélection de 30 km, il est alors probable que les projections soient surestimées pour les zones rurales franciliennes. Par ailleurs, une conséquence attendue d'un moyennage des seuils et des températures à un niveau plurirégional sur les données historiques est une différence d'observation du nombre de canicules et de leurs caractéristiques avec le chapitre I.2. En effet, le domaine d'application ayant changé, il s'agirait ici de regarder en moyenne les canicules survenues sur un plus vaste territoire, en l'occurrence sur ces zones plurirégionales.

| Zone géographique | Seuil IBM_{min} | Seuil IBM_{max} |
|--------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Est | 18,8°C | 34,1°C |
| Île-de-France | 21,0°C | 31,0°C |
| Nord | 18,4°C | 32,7°C |
| Ouest | 19,4°C | 34,7°C |
| Sud | 21,7°C | 34,2°C |

Table I.3.2 : Seuils d'alerte canicule min et max pour les zones plurirégionales

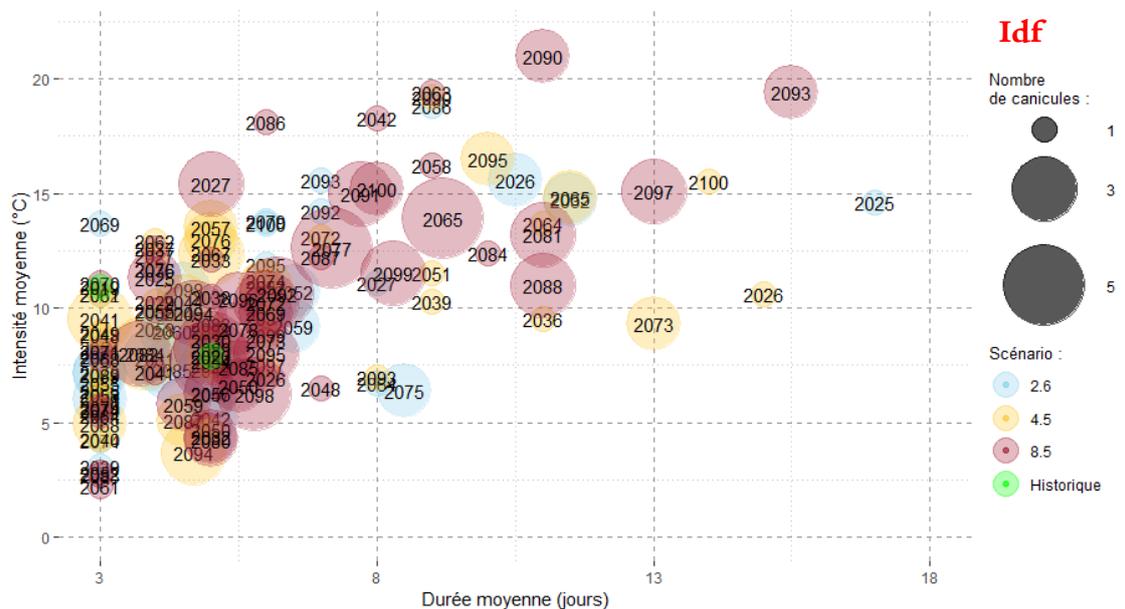
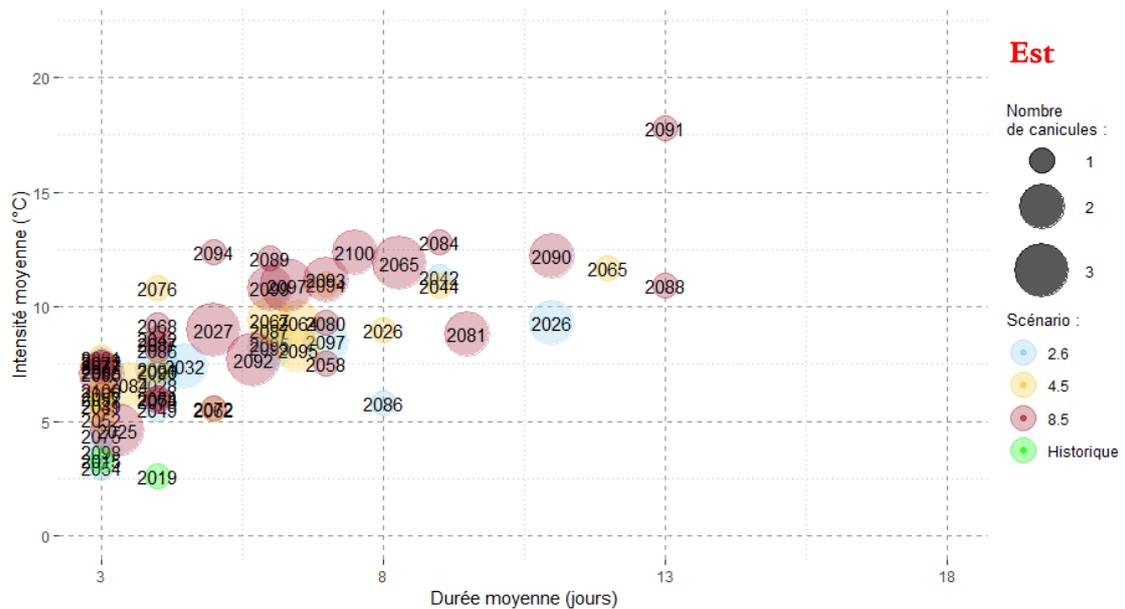
En appliquant de tels seuils aux IBM moyennés, quatre canicules historiques sont recensées :

- la canicule de 2015 survenue principalement dans l'Est début juillet ;
- la canicule de 2019 qui a touché la quasi-totalité du territoire et notamment l'Île-de-France et l'est de la France à la fin du mois de juillet ;
- la canicule d'août 2020 qui a déclenché la vigilance rouge canicule en Île-de-France et dans les Hauts-de-France ;
- la canicule tardive d'août 2023 que le sud de la France a notamment connue.

Ici, les canicules survenues au cours d'une année sont représentées selon leur nombre dans l'année, leur durée moyenne (rapport de la durée cumulée par le nombre de canicules) et leur intensité moyenne (rapport de l'écart aux seuils cumulé par le nombre de canicules). Ce choix de représentation est intéressant, car il permet d'évaluer en moyenne les caractéristiques des canicules, tout en précisant leur fréquence. Une représentation avec les valeurs cumulées est aussi possible. Par ailleurs, il existe un autre indicateur appelé sévérité et utilisé dans les représentations de Météo France. Il mesure l'écart cumulé aux seuils et non seulement le maximum des écarts aux seuils comme le fait l'intensité. Toutefois, il ne

fut pas intégré dans les représentations, déjà riches, car l'intensité porte une partie de l'information.

Les échelles ont été standardisées pour faciliter la comparaison entre zones géographiques. Deux canicules avec une probabilité d'apparition en 2027 et 2098 pour le scénario choqué RCP 8.5 ont été retirées, du fait d'une durée très importante (respectivement 23 et 38 jours pour la zone du Sud) et donc difficile à représenter sur l'échelle.



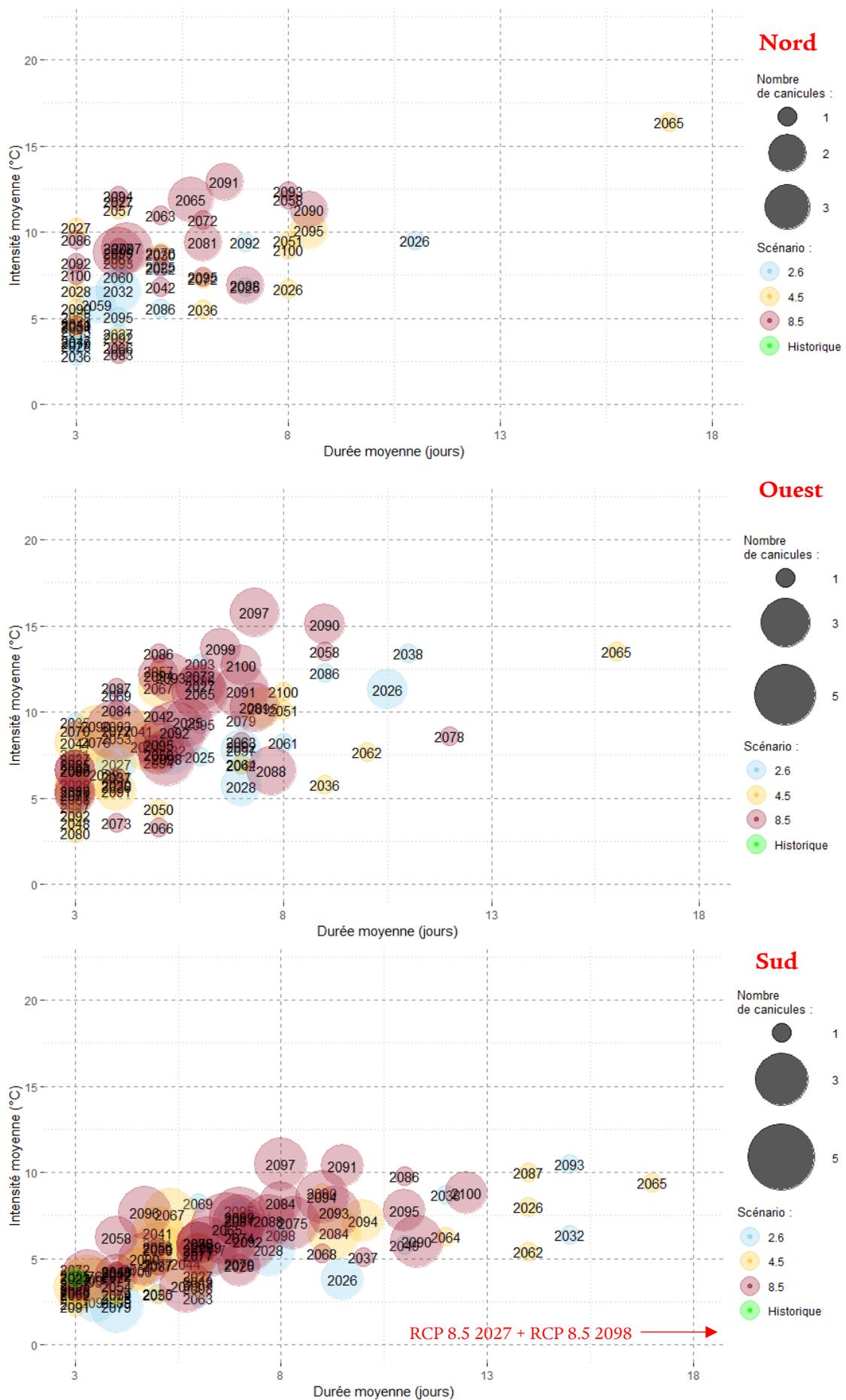


Figure I.3.5 : Projections des canicules à horizon 2100 selon trois scénarios RCP du GIEC

Ces projections à horizon 2100 montrent clairement le risque de multiplication, de rallongement et d'intensification des canicules sur tout le territoire métropolitain. En Île-de-France, l'évolution des canicules serait particulièrement marquée par leur forte intensité exacerbée par les îlots de chaleur, certaines étant susceptibles de dépasser les 15°C d'écart aux seuils et même les 20°C pour une canicule projetée en 2090 dans le cadre du scénario RCP 8.5. À l'instar du Sud, l'Île-de-France connaîtrait également, en moyenne, des canicules globales pouvant durer parfois plus d'une semaine. Enfin, les régions de Bretagne, de Normandie et des Hauts-de-France seraient touchées plus régulièrement par ce phénomène encore exceptionnel aujourd'hui, bien qu'en moindre proportion.

Il est à noter que le scénario pessimiste RCP 8.5 est principalement à l'origine des plus fortes canicules projetées dans la deuxième moitié du siècle. Il met ainsi en valeur le risque réel de répercussions qu'impliquerait une continuité des activités à fort rejet de gaz à effet de serre sans l'adoption d'une politique climatique vers des énergies renouvelables. Le scénario *business as usual* RCP 4.5, qui estime un réchauffement avoisinant les 3°C en 2100, prévoit également des canicules non négligeables. Le RCP 2.6 qui résulterait de la mise en œuvre d'une politique climatique permettant de maintenir le réchauffement en deçà des 2°C, est la seule trajectoire qui anticipe une maîtrise du nombre de canicules et de leur sévérité sur le siècle. Toutefois, avant 2050, ses projections sont plutôt agressives et se démarquent parfois de celles des autres scénarios. En effet, comme il fut montré avec la figure I.1.2, la divergence des trajectoires climatiques, à travers le réchauffement estimé, se manifeste surtout à compter de la deuxième moitié du siècle du fait du moment d'inertie propre au système climatique (les répercussions de ce qui est émis aujourd'hui sont constatées plusieurs décennies plus tard). En termes de multiplication des canicules, ce décrochage est visible avec le graphique suivant qui segmente le nombre de canicules sur des périodes de 25 et 26 ans pour l'Île-de-France :

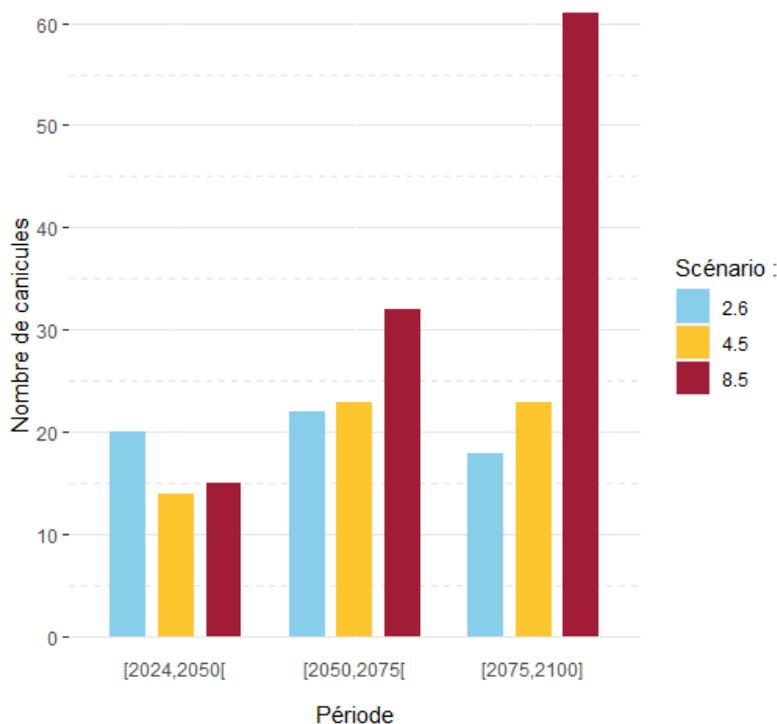


Figure I.3.6 : Nombre de canicules à horizon 2100 (Île-de-France)

Ainsi, selon le scénario pessimiste, le nombre de canicules pourrait tripler en 50 ans en Île-de-France dans le dernier quart de siècle.

3.4. Conclusion et limites de l'étude prospective

L'étude prospective s'est voulue complémentaire et dans la continuité de l'analyse descriptive du chapitre I.2. Avec les données des simulations climatiques mises à disposition par le portail du DRIAS, elle a permis de mettre en lumière le réchauffement attendu, et ce, pour cinq grandes zones géographiques du territoire métropolitain (Est, Nord, Ouest, Sud et Île-de-France), dans le cadre de trois scénarios types du GIEC. Il est notamment retenu que les projections climatiques diffèrent peu avant 2050 entre les trois trajectoires. Le scénario RCP 2.6 peut même parfois apparaître comme le plus pessimiste. Toutefois, à compter de 2050, le scénario RCP 8.5 projette un réchauffement croissant, atteignant les 5°C à horizon 2100. Le RCP 4.5 se maintient à un niveau inférieur à 3°C et le RCP 2.6 à 2°C. Un tel réchauffement induit, dans tous les cas, une hausse du risque de fréquence, de rallongement et d'intensité des phénomènes caniculaires sur tout le territoire. Il est ainsi projeté des canicules plus longues et plus étendues dans tout le pays, pouvant parfois durer plusieurs semaines. Par ailleurs, ce phénomène se normaliserait dans des régions qui n'en ont que très rarement connu, comme celles du nord de la France métropolitaine. En particulier, le scénario RCP 8.5 prévoit environ trois fois plus de canicules encore plus longues et intenses que les scénarios *business as usual* et optimiste. Cela montre la conséquence non négligeable d'une éventuelle inaction climatique sur la décennie à venir.

Néanmoins, les résultats présentés doivent être nuancés. En effet, bien qu'ils reflètent clairement une évolution à la hausse du réchauffement, ils sont basés sur une sélection de points de la grille SAFRAN situés sur quelques villes principales et leurs alentours un peu plus ruraux. Par conséquent, l'attribution de ces températures (moyennées) à tout un territoire reste une approximation.

Enfin, les projections sont issues des scénarios RCP du cinquième rapport d'évaluation du GIEC, faute de source fiable pour exploiter les données des nouveaux scénarios SSP. Cependant, les RCP utilisés ont tout de même un équivalent SSP.

Partie II - Vulnérabilité à la chaleur

Chapitre 1 : Observations générales sur la vulnérabilité à la chaleur

1.1. Mécanismes physiologiques

1.1.1. Fonctionnement

L'être humain est en interaction permanente avec l'environnement qui l'entoure. En fonction de la température extérieure, son corps dispose d'une capacité d'adaptation grâce à des mécanismes de régulation qui lui sont propres :

- si la température environnante est plus basse que sa température corporelle, il tentera de réduire la déperdition de chaleur grâce à des mécanismes tels que la vasoconstriction cutanée ou le réflexe pilo-moteur, tout en augmentant sa production (frissons, métabolisme) ;
- si la température environnante est plus élevée que sa température corporelle, il essaiera d'évacuer la chaleur principalement à travers la transpiration et la vasodilatation.

Ces mécanismes sont nécessaires pour maintenir la température corporelle moyenne à l'équilibre (37°C). En effet, le second principe de thermodynamique affirme que la transmission de chaleur se fait toujours du milieu « chaud » vers le milieu « froid ». L'environnement et le corps humain constituent deux milieux en interaction. En cas de fortes chaleurs, ce dernier doit pouvoir être en mesure de lutter contre une transmission constante de chaleur par l'environnement extérieur. Cette transmission est d'autant plus importante que l'écart de température entre les deux milieux est élevé.

1.1.2. Régulation thermique corporelle insuffisante

Il arrive que le corps humain ne soit plus capable de réguler efficacement sa température. Dans le cas d'un environnement extérieur chaud, il peut alors entrer en phase d'hyperthermie, plus communément appelée « coup de chaleur ». À la différence de la fièvre, qui résulte de facteurs endogènes, l'hyperthermie peut se produire si l'individu reste exposé trop longtemps à une forte chaleur. D'autres conséquences d'une exposition prolongée peuvent survenir telles qu'une déshydratation ou une hyponatrémie (carence en sodium dans le sang).

Ces symptômes peuvent conduire à une hospitalisation, voire au décès, s'ils ne sont pas anticipés.

1.2. Vulnérabilité à la chaleur

Les individus ne sont pas tous égaux face à la chaleur. À partir de la littérature, cette partie cherche à identifier et référencer de façon qualitative les caractéristiques qui peuvent augmenter le risque de passage aux urgences et d'hospitalisation.

1.2.1. Définitions

Les termes de « vulnérabilité » et de « résilience » diffèrent selon le contexte dans lequel ils sont employés. Par exemple, en psychologie, la résilience peut s'entendre comme le processus d'adaptation positive face à un événement difficile [Sisto et al., 2019]. Par extension et par analogie, la vulnérabilité à la chaleur peut être définie comme l'ensemble des caractéristiques, aussi bien propres à l'individu qu'exogènes, qui vont influencer négativement ses capacités de réaction immédiate et d'adaptation. En conséquence, la vulnérabilité à la chaleur peut provoquer une surexposition à des risques d'hospitalisation ou de décès. Ainsi, la notion clé est la modification de la relation entre chaleur et morbidité. Cette modification est la résultante de facteurs de vulnérabilité.

1.2.2. Facteurs de vulnérabilité

De nombreuses études ont cherché à mettre en exergue les facteurs de vulnérabilité dans le cadre d'une étude de la relation chaleur-mortalité [Basu et Samet, 2002 ; Fouillet et al., 2008 ; Vandentorren et al., 2006]. Cependant, peu de documents ont été relevés concernant l'identification des facteurs de vulnérabilité pour le risque de passage aux urgences et d'hospitalisation. L'hypothèse assez intuitive est alors de considérer que les facteurs de vulnérabilité associés au risque de mortalité sont aussi ceux associés au risque d'hospitalisation.

Les facteurs de vulnérabilité peuvent être regroupés selon qu'ils sont individuels ou propres à l'environnement. En outre, les facteurs individuels peuvent relever d'une nature purement physiologique ou sociétale. Les principaux sont succinctement évoqués ci-dessous.

Âge

Le premier facteur identifiable est l'âge. En effet, les nourrissons ont un mécanisme de régulation thermique encore insuffisant et les jeunes enfants sont sujets à une déshydratation supérieure à celle d'un adulte du fait d'un faible équilibre masse/surface corporelle [Santé publique France, 2014]. Par ailleurs, les personnes âgées voient une perte d'efficacité de leur régulation de température mais également une baisse de la sensation de soif, qui est un signal d'alerte du corps humain, et donc un risque de déshydratation accru.

Sexe

Les femmes seraient plus sensibles à la chaleur [Fouillet et al., 2008]. En particulier, les femmes enceintes exposées aux fortes chaleurs ont un risque plus élevé de donner naissance prématurément [Auger et al., 2014] et d'avoir un enfant exposé à des problèmes médicaux [Van Zutphen et al., 2012].

Maladies et médicaments

Les épisodes caniculaires peuvent engendrer des difficultés respiratoires, notamment chez les personnes âgées ou asthmatiques [Anderson et al., 2013]. Ils sont aussi responsables de l'aggravation de maladies cardiovasculaires, cardiaques et respiratoires. Enfin, certaines comorbidités comme le diabète ou l'obésité peuvent accroître la vulnérabilité à la chaleur [Vandentorren et al., 2006].

De surcroît, certains traitements médicamenteux peuvent avoir des effets secondaires indésirables, exacerbés en période de canicule. Il s'agit notamment des médicaments avec un effet diurétique comme ceux permettant de traiter l'hypertension artérielle.

Dépendance

À un âge avancé, il arrive qu'une personne ne soit plus apte à vivre sans aide à domicile. En 2003, 95,9% de la population de plus de 60 ans vivaient à domicile [Joël, 2003]. Pourtant, 9,1% étaient dépendants (y compris la dépendance pouvant aller jusqu'au confinement au lit) et requéraient une aide. Cette dépendance peut nuire à la capacité d'adaptation en cas de fortes chaleurs [Vandentorren et al., 2006]. En effet, les personnes dépendantes peuvent ne pas être en état de s'hydrater seules ou de rafraîchir une pièce.

Profession

Des professions sont plus exposées que d'autres aux canicules. Il s'agit notamment des métiers nécessitant des travaux manuels à l'extérieur comme ceux que font les ouvriers et les agriculteurs. Pendant la période de veille saisonnière, Santé publique France relève des accidents du travail mortels en lien possible avec la chaleur. La plupart ont lieu à l'extérieur lors d'épisodes caniculaires [Santé publique France, 2020 et 2022].

Lieu de résidence

En raison d'une pollution accrue et de la quantité importante de bâtiments en béton qui accumulent la chaleur en journée pour la rejeter la nuit, les grandes métropoles sont des lieux propices à la formation d'îlots de chaleur qui exacerbent les canicules en été. Lors de la canicule de 2003, les personnes âgées ont été soumises à un risque de mortalité plus important en présence d'un îlot de chaleur [Vandentorren et al., 2006].

Logement

Le logement constitue un facteur de vulnérabilité qui est d'autant plus important que la personne y reste confinée (personnes âgées dépendantes, personnes handicapées, nourrissons). Certains logements ont une isolation thermique insuffisante ou sont situés sous un toit. Ces caractéristiques représentent un risque d'exposition accru à la chaleur. En effet, la régulation de la température des pièces est, dans ces cas-là, limitée.

D'autres facteurs de vulnérabilité à la chaleur existent comme l'isolement, le niveau de vie, les habitudes de vie (pratiques sportives) et la santé mentale. Il est à noter que ces facteurs ne sont pas indépendants les uns des autres. Au contraire, ils doivent être considérés comme un ensemble qui façonne l'individu et son cadre : une personne âgée vivant à Paris dans un logement sans climatisation et présentant des comorbidités sera plus vulnérable à la chaleur qu'un jeune cadre dans une résidence de campagne et en bonne santé.

1.2.3. Facteurs climatiques aggravants

Dans ce mémoire, seule l'étude de la relation entre la température et le risque de passages aux urgences et d'hospitalisation est considérée. Toutefois, en parallèle des facteurs de vulnérabilité, il existe des facteurs climatiques qui peuvent exacerber ces derniers et ils méritent d'être succinctement mentionnés.

Le premier phénomène aggravant est la nuit tropicale. Elle peut se produire lors d'une canicule ou indépendamment. La nuit tropicale correspond à une nuit durant laquelle la température minimale reste supérieure à 20°C [Météo France, 2020]. Celle-ci est particulièrement fréquente sur le littoral, car la chaleur emmagasinée par les océans et mers est libérée la nuit, maintenant, en conséquence, la température ambiante à un niveau important. Avec le réchauffement climatique et les prévisions par le GIEC d'un réchauffement des masses d'eau salée, ce phénomène est susceptible d'être de plus en plus

récurrent et plus long comme l'atteste cet historique des nuits tropicales pour la station de Nice :

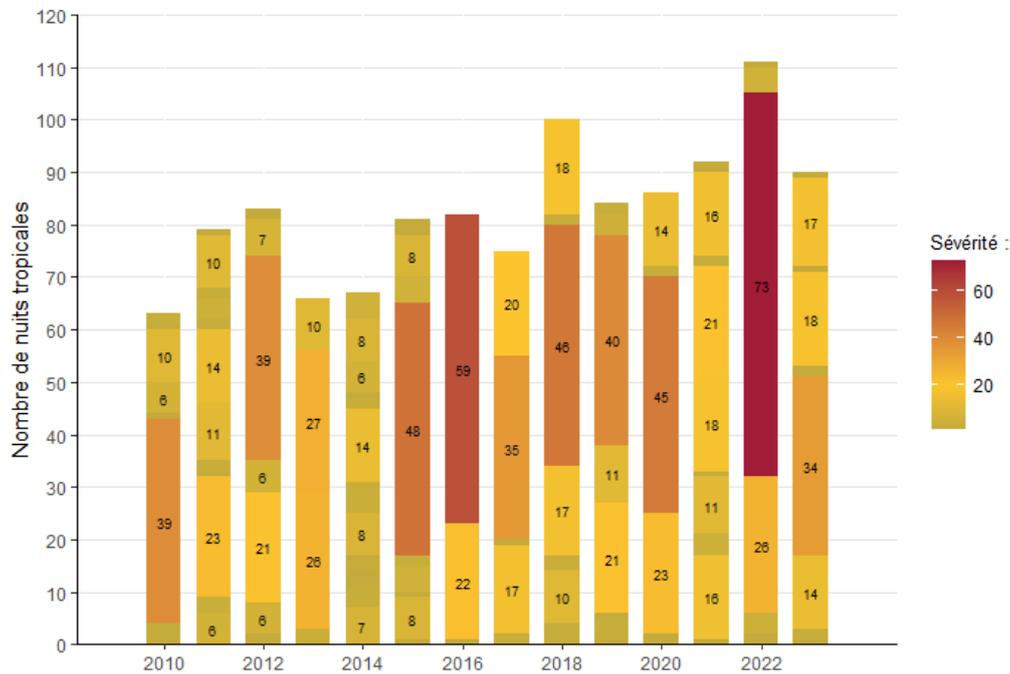


Figure II.1.1 : Évolution du nombre de nuits tropicales pour la station de Nice et périodes de nuits tropicales consécutives (sévérité)

La nuit est une période importante, tant pour le sommeil réparateur que pour la chute de température corporelle et de l'habitat. Un épisode prolongé de nuits tropicales peut avoir des conséquences néfastes sur la santé physique (fatigue, déshydratation) comme mentale (nervosité), notamment chez les personnes fragiles.

Le second facteur est l'humidité de l'air. Elle correspond à la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air. Plus l'air est chaud, plus la quantité de vapeur d'eau pouvant être retenue est grande. Ainsi, en cas de forte chaleur couplée à une humidité importante, l'air peut se trouver saturé en vapeur d'eau, et le processus d'évapotranspiration des corps humains se retrouve alors compromis. Cette situation est la moins souhaitable et peut provoquer très rapidement l'hyperthermie d'une personne qui ne dispose pas de moyens de faire face.

Ainsi, supposer la température comme seul indicateur météorologique influençant le risque sur la santé serait une erreur. Néanmoins, ce mémoire s'intéresse spécifiquement, à travers l'indicateur biométéorologique, à ce lien et ne cherche donc pas à intégrer d'autres composantes, comme la vitesse du vent ou l'humidité, qui demanderaient des ressources supplémentaires telles que la création d'un indicateur météorologique objectif. Il convient alors de garder en mémoire que ces autres facteurs jouent un rôle également.

Il peut tout de même être noté que le couple température-humidité permet de représenter plus fidèlement l'inconfort ressenti. Outre-Atlantique, des indicateurs ont été créés sur cette base tels que l'humidex ou l'indice de chaleur, respectivement utilisés au Canada et aux États-Unis. Des échelles de confort ont été déduites, bien qu'elles ne soient pas absolues, le

confort étant une valeur subjective qui dépend de la résilience (ou de la vulnérabilité) de l'individu.

Un bref aperçu de l'évolution du 95^{ème} quantile de l'humidex en France métropolitaine permet de constater que les événements météorologiques exceptionnels des dernières années sont plus physiologiquement désagréables qu'il y a une décennie. Par exemple, des humidex maximaux égaux à 39-40 ont été relevés en Corse et dans les Alpes-Maritimes en 2022, ce qui correspond à un inconfort très prononcé, à la limite d'un danger de coup de chaleur. Ces régions historiquement chaudes s'humidifient de plus en plus avec le réchauffement de la mer Méditerranée (l'air refroidit donc peu la nuit et la vapeur d'eau ne peut se condenser), et sont susceptibles, à l'avenir, d'avoir un climat qui se rapproche le plus d'un climat tropical.

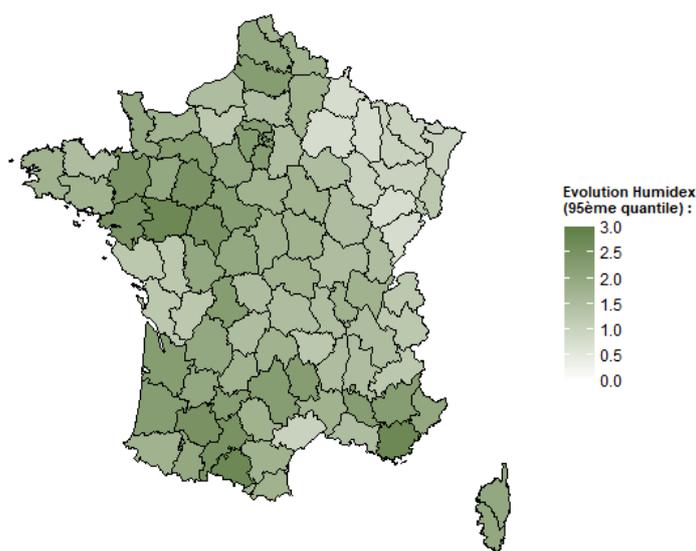


Figure II.1.2 : Évolution moyenne du 95^{ème} quantile de l'indice humidex (comparaison des périodes 2010-2016 et 2017-2023)

1.3. Observations relevées par Santé publique France dans le cadre du Plan National Canicule

Chaque année, des bulletins faisant état des différents épisodes de chaleur survenus sur le territoire métropolitain sont publiés par Santé publique France et ont pour objectif de résumer l'impact sanitaire constaté. Ces bulletins sont possibles grâce au réseau de surveillance SurSaUD[®] qui permet la récupération d'une importante proportion des données liées aux passages aux urgences (dispositif OSCOUR[®]), aux consultations SOS Médecins et aux décès (INSEE). En effet, entre 80% et 90% de l'activité sanitaire quotidienne sont recensés à l'échelle nationale.

Dans son devoir de veille sanitaire, Santé publique France a la possibilité de distinguer les passages aux urgences et hospitalisations en lien avec la chaleur du reste. L'indicateur « Pathologies en lien avec la chaleur » (PLC) regroupe les pathologies qui surviennent suite à une exposition à la chaleur, à savoir l'hyperthermie, la déshydratation et l'hyponatrémie. Le nombre de passages aux urgences et d'hospitalisations pour PLC est communiqué quotidiennement durant la période de veille saisonnière. Les plus grands pics de fréquence se manifestent généralement durant les périodes de vigilance annoncées par Météo France.

Les indicateurs biométéorologiques apparaissent donc comme une référence fiable pour capter l'effet des fortes chaleurs sur le risque d'hospitalisation. De plus, il est à noter que l'effet peut être visible sans nécessairement franchir les seuils d'alerte départementaux (cas des pics et épisodes persistants de chaleur assimilés à une vigilance jaune). L'effet reste néanmoins le plus marqué en période de canicule.

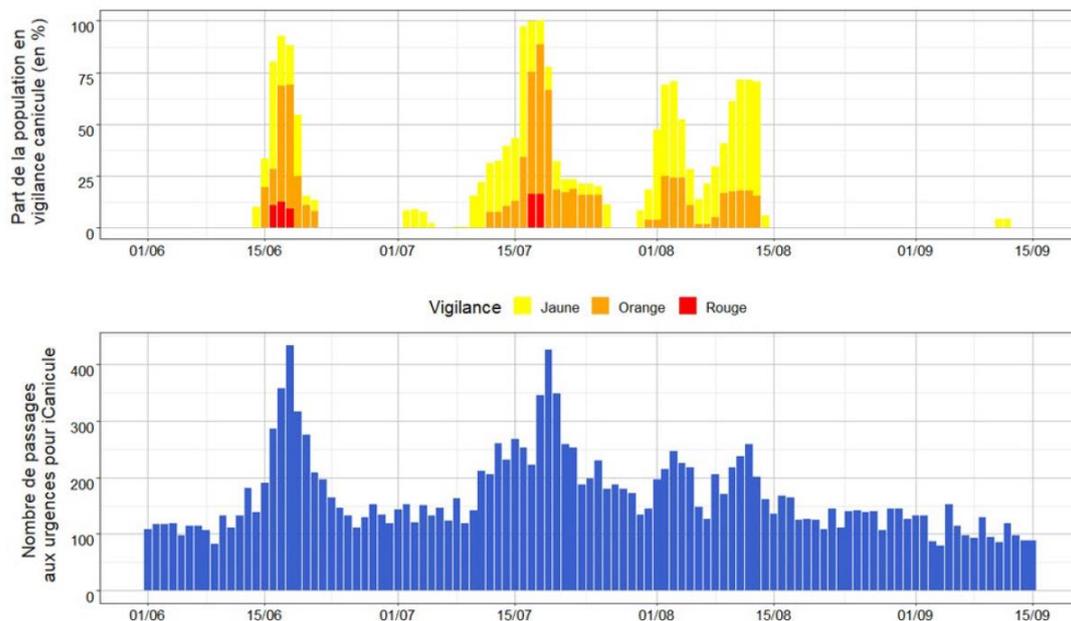


Figure II.1.3 : Population exposée aux vagues de chaleur et passages aux urgences pour l'été 2022 (source : Santé publique France)

L'impact des vagues de chaleur sur le risque d'hospitalisation varie selon leur période de survenance, leur intensité et leur durée. Par exemple, pour les épisodes de chaleur précoces qui surviennent en juin, comme ce fut le cas en 2016 et 2022, il fut observé que les populations jeunes sont particulièrement touchées [Santé publique France, 2017]. Cela peut être attribué au fait que la période scolaire n'était pas terminée, renforçant ainsi le degré d'exposition (sorties scolaires, activités sportives). Par ailleurs, le changement drastique de température a pu être perçu brutalement et dépasser la capacité d'adaptation physiologique. En effet, lors de la canicule de juin 2017, les hyperthermies étaient la principale PLC, tandis que la déshydratation était la PLC dominante lors des canicules suivantes. Cela montre qu'une politique de prévention, aussi bien nationale (messages gouvernementaux de prévention télévisés) que locale (supports de communication par les mairies), peut être utile pour sensibiliser les populations et ainsi minimiser l'exposition.

Enfin, les bulletins de santé publique permettent de donner un ordre de grandeur du nombre de passages aux urgences et d'hospitalisations liés aux PLC mais également la proportion des passages aux urgences qui ont été suivis d'une hospitalisation. Une décomposition de la sinistralité selon plusieurs catégories d'âge est aussi précisée.

La mise en parallèle de l'impact de récentes canicules sur la santé permet d'observer une certaine stabilité dans le taux de passages aux urgences pour PLC entraînant une hospitalisation (en moyenne entre 50% et 60%). Par ailleurs, la proportion des personnes de plus de 75 ans dans les passages aux urgences est évaluée entre 40% et 50%. En outre, le taux d'hospitalisations associé à cette population est largement supérieur à la moyenne et peu

variable (entre 74% et 80%) : il montre que les personnes âgées présentent une fragilité supplémentaire et nécessitent souvent des soins plus importants.

| Episodes de chaleur | Départ. touchés | PaU* pour PLC | Dont suivis d'une hospitalisation | PaU pour PLC (75 ans +) | Dont suivis d'une hospitalisation |
|---------------------|-----------------|---------------|-----------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| Eté 2016 (+0,6°C) | | | | | |
| 17/07-20/07 | 12 | 1 313 | 54% | 43% | 78% |
| 23/08-28/08 | 48 | 1 357 | 63% | 53% | 78% |
| Eté 2017 (+1,5°C) | | | | | |
| 17/06-24/06 | 90 | 2 901 | 51% | 44% | 77% |
| 31/07-07/08 | Sud et Sud-Est | 1 567 | 66% | 51% | 89% |
| Eté 2018 (+2°C) | | | | | |
| 24/07-08/08 | 88 | 5 676 | 58% | 51% | 77% |
| Eté 2019 (+1,7°C) | | | | | |
| 24/06-07/07 | 58 | 10 378 | 49% | 42% | 74% |
| 21/07-27/07 | 74 | | | | |
| Eté 2020 (+1,1°C) | | | | | |
| 26/07-03/08 | 22 | 2 157 | 58% | . | . |
| 07/08-13/08 | 64 | | | | |
| 19/08-21/08 | 5 | | | | |

* passages aux urgences

Table II.1.1 : Résumé de l'impact de plusieurs épisodes caniculaires sur le risque de passage aux urgences et d'hospitalisation (données recueillies dans les bulletins de santé publique)

1.4. Perception de la chaleur par les populations

Outre les enjeux des fortes chaleurs sur le corps humain, d'autres sont davantage en lien avec la perception et l'acceptation de la chaleur par les populations. Ces défis revêtent une grande importance, car la politique de prévention menée par les pouvoirs publics peut venir se heurter aux consciences réticentes à l'idée d'être vulnérables aux phénomènes extrêmes et à la nécessité d'adapter leur mode de vie. Cela peut être notamment vrai pour les populations jeunes souvent exposées mais également pour les personnes âgées. En effet, une étude publiée en 2008 et menée sur 73 personnes âgées entre 72 et 94 ans résidant dans Londres ou Norwich s'est intéressée à leur perception de la chaleur [Abrahamson et al., 2008]. Bien que les températures soient généralement plus clémentes au Royaume-Uni qu'en France, le phénomène de canicules peut tout à fait survenir l'été, tout comme l'îlot de chaleur londonien. Parmi les interrogés, peu ont répondu que les fortes chaleurs représentaient une complication dans leurs habitudes de vie, tout en reconnaissant en parallèle un inconfort grandissant avec l'âge. De plus, peu étaient conscients que leur santé était vulnérable à la chaleur ou que la prescription de certains médicaments pouvait aggraver cette vulnérabilité. Enfin, il a été souvent relevé que ces personnes admettaient que la chaleur pouvait poser des problèmes aux personnes dépendantes avec des comorbidités, sans pour autant s'inclure alors même qu'elles vérifiaient ces caractéristiques.

Cette étude datant de 2008, et s'étant intéressée à un échantillon restreint, il est probable que les consciences aient globalement évolué en raison des phénomènes extrêmes récents. Néanmoins, dans les régions du nord de la France encore mal habituées, il est possible que ce type de perception de la chaleur demeure, ce qui impliquerait des comportements à risque plus fréquents par exemple.

Ces considérations climatiques et sociétales amènent à s'intéresser aux répercussions de la chaleur sur la santé des assurés et sur plusieurs portefeuilles de Swiss Life Prévoyance et Santé.

Chapitre 2 : Fonctionnement de l'assurance santé en France

Ce chapitre présente succinctement le mécanisme général de l'assurance santé avant de s'intéresser plus particulièrement aux frais engagés lors de l'utilisation des services des urgences et hospitaliers. Il a comme objectif d'apporter une compréhension du système de santé et de celui de l'assurance, en particulier pour le périmètre hospitalier, afin de mieux appréhender la suite du mémoire et les notions qu'elle implique.

2.1. La Sécurité sociale et l'Assurance Maladie

Après la chute du régime de Vichy et la fin de l'occupation allemande, la population française, meurtrie par la guerre, est dépourvue, pour la plus grande partie, de ressources. La création de la Sécurité sociale par les ordonnances du 4 et 19 octobre 1945 est le fruit d'une volonté de solidarité pour répondre aux besoins urgents de protection sociale, c'est-à-dire une protection contre les risques de la vie.

Le système de répartition en retraite et la mutualisation en santé traduisent cet élan de solidarité : les cotisations sociales des uns permettent de protéger les autres de la survenance d'événements qui peuvent affecter le coût de la vie.

En 2023, le régime général de la Sécurité sociale, qui couvre 88% de la population (salariés du secteur privé et indépendants), est décomposé selon six branches parmi lesquelles se trouve la branche Maladie. La branche Maladie est gérée par la Caisse nationale de l'Assurance Maladie (CNAM) et son large réseau de caisses régionales. Les frais de santé réellement engagés par l'assuré peuvent être pris en charge partiellement ou en totalité par cet organisme.

2.2. Principe de la prise en charge des frais médicaux

2.2.1. Prise en charge du régime obligatoire

Le principe du remboursement des frais de santé par l'Assurance Maladie obéit à une codification et à des conditions précises. En effet, chaque acte médical est codifié et possède son propre montant de base appelé base de remboursement. Le montant remboursé par l'Assurance Maladie correspond à cette base à laquelle est appliqué un taux de remboursement. Ce taux est identique pour tous les assurés du régime général mais peut varier de celui des autres régimes, comme le régime d'Alsace-Moselle ou le régime agricole.

Finalement, le remboursement par l'Assurance Maladie peut s'exprimer comme suit :

$$Rbt\ SS = Taux\ de\ rbt * Base\ de\ rbt - Franchise$$

Sur certaines prestations telles que les consultations de médecin généraliste, une franchise, qui correspond à une participation forfaitaire de l'assuré, peut exister. En l'occurrence, pour une consultation auprès d'un médecin généraliste, elle est de 1€.

La part de la base de remboursement qui n'est pas remboursée constitue le ticket modérateur :

$$\text{Ticket modérateur} = (1 - \text{Taux de rbt}) * \text{Base de rbt}$$

Enfin, la part des frais réels qui dépasse la base de remboursement est le dépassement. Tout ce qui n'est pas remboursé par l'Assurance Maladie est le reste à charge pour l'assuré.

À titre d'illustration, depuis l'automne 2023, le tarif d'une consultation chez un médecin généraliste de secteur 1 est de 26,5€ contre 25€ précédemment [Assurance Maladie, 2023]. Dans ce cas précis, la base de remboursement équivaut au tarif. Le taux de remboursement par la Sécurité sociale étant de 70%, un affilié se verra donc rembourser 18,55€ auxquels il est retranché 1€ de participation forfaitaire, soit 17,55€. Le ticket modérateur vaut 7,95€ et le dépassement est nul.

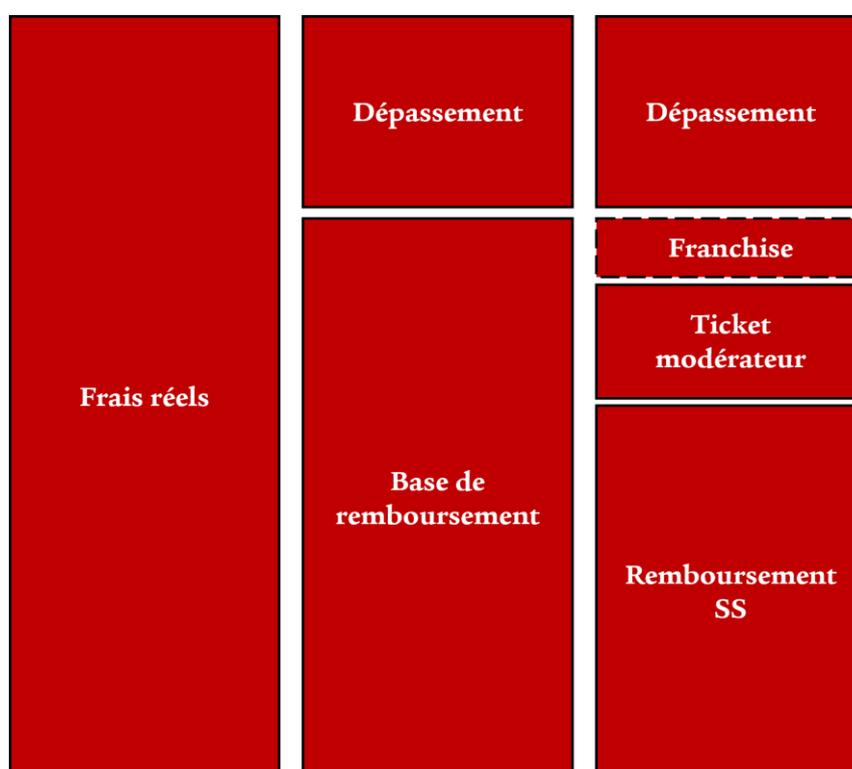


Figure II.2.1 : Décomposition du principe de remboursement par l'Assurance Maladie

Par ailleurs, hormis plusieurs cas particuliers, certaines prestations ne sont pas remboursées par le régime obligatoire telles que certains traitements médicamenteux ou la médecine dite douce ou alternative. L'adhésion à une complémentaire santé permet de se faire rembourser une partie, voire la totalité du reste à charge pour l'affilié.

2.3.2. Intervention de la complémentaire santé

En France, il existe trois types d'assureur pouvant légalement intervenir en tant que complémentaire santé :

- les mutuelles, régies par le code de la mutualité, sont à but non lucratif et les assurés sont aussi sociétaires ;

- les institutions de prévoyance, également à but non lucratif, relèvent du code de la sécurité sociale. Elles interviennent peu sur le marché de l'assurance santé et sont plus tournées vers la couverture des risques associés à la prévoyance ;
- les compagnies d'assurance sont à but lucratif, possèdent des actionnaires et sont soumises au code des assurances.

Pour un produit d'assurance donné, l'assureur propose une grille des garanties pour chaque poste principal en santé (hospitalisation, médecine courante, optique, dentaire, audiologie, etc.). En général, ces garanties s'expriment en pourcentage de la base de remboursement, des frais réels ou encore du plafond mensuel de la Sécurité sociale. Dans leur expression, elles peuvent inclure le montant remboursé par la Sécurité sociale ou aller au-delà de ce dernier.

Un produit se décompose souvent en formules qui proposent une couverture plus ou moins renforcée en y ajoutant éventuellement des options. Cela permet de cibler certaines garanties selon les besoins des assurés. Ainsi, un assuré présentant des comorbidités et se faisant régulièrement hospitaliser pourrait chercher un renfort de garanties en hospitalisation.

2.3. Remboursement des frais hospitaliers

2.3.1. Urgences

Avant 2022, une personne sollicitant les urgences devait systématiquement s'acquitter du règlement d'une participation variable. Depuis le 1^{er} janvier 2022, suite à la loi n° 2021-1754 du 23 décembre 2021 de financement de la sécurité sociale pour 2022, cette participation appelée « forfait patient urgences » (FPU) n'est demandée qu'aux personnes ne se faisant pas hospitalier par la suite [Assurance Maladie, 2022]. L'arrêté du 17 décembre 2021 relatif aux montants du forfait patient urgences prévu à l'article L.160-13 du code de la sécurité sociale précise que le montant est fixé à 19,61€. Un forfait minoré de 8,49€ peut s'appliquer pour les personnes en affection longue durée (ALD) ou en arrêt de travail selon certains critères. Enfin, certaines personnes peuvent ne pas devoir payer le FPU, comme les femmes enceintes ou les nourrissons de moins d'un mois.

2.3.2. Hospitalisation

Les prestations hospitalières peuvent être réalisées dans trois types d'établissement distincts :

- un hôpital public ;
- un établissement privé conventionné ;
- un établissement privé non conventionné.

Pour une hospitalisation dans un hôpital public ou un établissement privé conventionné, la prise en charge des frais liés à l'hospitalisation est de 80% du tarif conventionnel. Toutefois, elle peut être de 100% pour les personnes en ALD ou hospitalisées depuis plus de trente jours consécutifs.

En outre, comme pour les consultations auprès de médecins, une participation forfaitaire appelée forfait hospitalier (ou forfait journalier) est demandée à l'assuré pour chaque jour d'hospitalisation, et son montant s'établit à 20€. Ici également, des cas précis d'exonération existent.

Enfin, des frais qui peuvent être associés à un confort supplémentaire, comme la chambre particulière, la télévision ou le lit d'accompagnant peuvent être facturés.

Généralement, la complémentaire santé intervient dans le remboursement du ticket modérateur pour les frais liés à l'hospitalisation, et du forfait journalier. Pour un contrat ayant des garanties suffisamment importantes, elle peut également prendre en totalité la charge des suppléments liés au confort de l'assuré.

Chapitre 3 : Étude de la vulnérabilité à la chaleur des assurés SwissLife pour les risques de passage aux urgences et d'hospitalisation

Les données recueillies dans les bulletins de santé publique sont construites sur la base d'une exposition aux vagues de chaleur de toute la population nationale et ne sauraient *a priori* refléter la sinistralité des portefeuilles de SwissLife qui regroupent, parfois, des populations cibles avec une répartition hétérogène sur le territoire. Il est alors intéressant de mener, dans un premier temps, une étude de la vulnérabilité à la chaleur sur ces assurés au global.

L'objectif est, à partir des données internes de SLPS mises en relation avec les données météorologiques, d'identifier et quantifier un potentiel effet causé par les vagues de chaleur sur la sinistralité pour les passages aux urgences et hospitalisations. Par la suite, le risque de passage aux urgences et d'hospitalisation sera nommé **risque PaU-H**.

3.1. Cadre de l'étude

3.1.1. Sélection du portefeuille

SLPS dispose de trois portefeuilles principaux :

- le portefeuille Standard est géré exclusivement en interne. La force commerciale est composée des agents commerciaux de SwissLife et de courtiers. Les données de ce portefeuille sont accessibles via le datamart de l'entreprise. En individuel, les assurés sont principalement des salariés, des travailleurs non-salariés (TNS) et des séniors. En collectif, il s'agit notamment de PME ;
- le portefeuille SMC (Sur Mesure Collectif) et DIPS (Direction Internationale Prévoyance Santé) est en gestion à la fois interne (par la Direction internationale) et déléguée (par plusieurs courtiers), bien que la part en gestion déléguée soit nettement plus importante. Il regroupe essentiellement des contrats collectifs conclus avec des grandes entreprises localisées en France pour le portefeuille SMC et dans le monde pour le portefeuille DIPS ;
- le portefeuille Partenariat est géré en totalité par des courtiers avec lesquels un accord commercial est passé. En échange de leur force de vente, leur moyen de rémunération principal est la commission de première année, dite précomptée, lorsqu'une affaire nouvelle est réalisée, puis la commission pour année suivante qui est généralement calculée sur un pourcentage des primes reçues par SLPS (commission linéaire). Une commission de gestion est également versée pour la gestion des contrats. Le portefeuille possède des contrats de santé et prévoyance, ainsi que d'autres réservés à l'assurance des animaux, dite « assurance chien et chat ».

La facilité d'accès via un serveur interne autorisant les requêtes SQL, le volume disponible ainsi que l'homogénéité des données orientent ainsi l'étude vers les données du portefeuille Standard. Dans la suite, plusieurs étapes dans la préparation des données furent nécessaires.

3.1.2. Définition du périmètre du portefeuille

L'étude se limite au périmètre de la santé individuelle qui est le plus conséquent pour le portefeuille Standard (61% du chiffre d'affaires 2023 en santé Standard). Il a également l'avantage d'avoir une population variée et de tous âges.

Dans un premier temps, afin de coïncider avec la période d'étude des données météorologiques à disposition, seuls les sinistres survenus entre 2010 et 2023, et de mai jusqu'à septembre sont conservés. Toutefois, le périmètre de la santé individuelle a été marqué à compter de 2014 par une baisse de volume au profit de la santé collective. Cela est dû à l'Accord National Interprofessionnel (ANI) de 2013 qui oblige tous les employeurs du secteur privé à proposer une mutuelle d'entreprise à leurs salariés et à la financer à hauteur d'au moins 50%. Une volonté de développer le périmètre de la santé collective s'est dès lors manifestée, ce qui a eu pour conséquence des variations sur le portefeuille individuel en termes de volume et de structure.

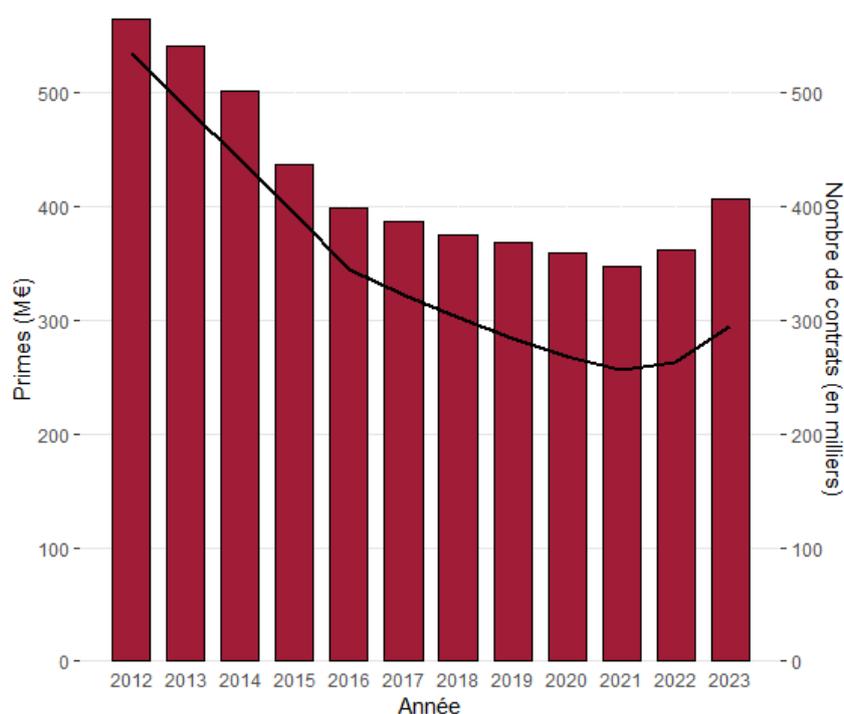


Figure II.3.1 : Évolution du volume de primes (**bâtonnets**) et du nombre de contrats (**courbe noire**) pour la santé individuelle en Standard

Il apparaît alors nécessaire de prendre en considération un effet de volume lié aux chutes du portefeuille. Plutôt que de drastiquement limiter le champ de l'étude aux années où la variation est faible (ce qui serait encore peu rigoureux), les sinistres seront rapportés au nombre d'assurés et bénéficiaires présents sur la période, et donc exposés au risque.

Enfin, afin de garantir un temps d'exposition identique pour chaque assuré, pour une année donnée, un bon compromis est d'imposer une condition de présence sur une période d'étude. En d'autres termes, pour une année donnée :

- la date d'adhésion et la date d'effet du contrat sont effectives avant le 1^{er} mai ;

- la date de sortie et la date de résiliation éventuelles surviennent après le 30 septembre.

La date d'effet pouvant parfois différer de celle de l'adhésion, la double condition est précisée.

Cela permet de s'affranchir des entrées et sorties survenant durant la période mais sans imposer de conditions trop sévères, au risque de ne conserver qu'un trop faible nombre d'assurés pour l'étude.

3.1.3. Préparation des données de l'étude

La création des bases annuelles a nécessité la récupération de plusieurs informations réparties dans différentes tables SAS, dont le cheminement et l'explication des tables sont résumés ci-dessous :

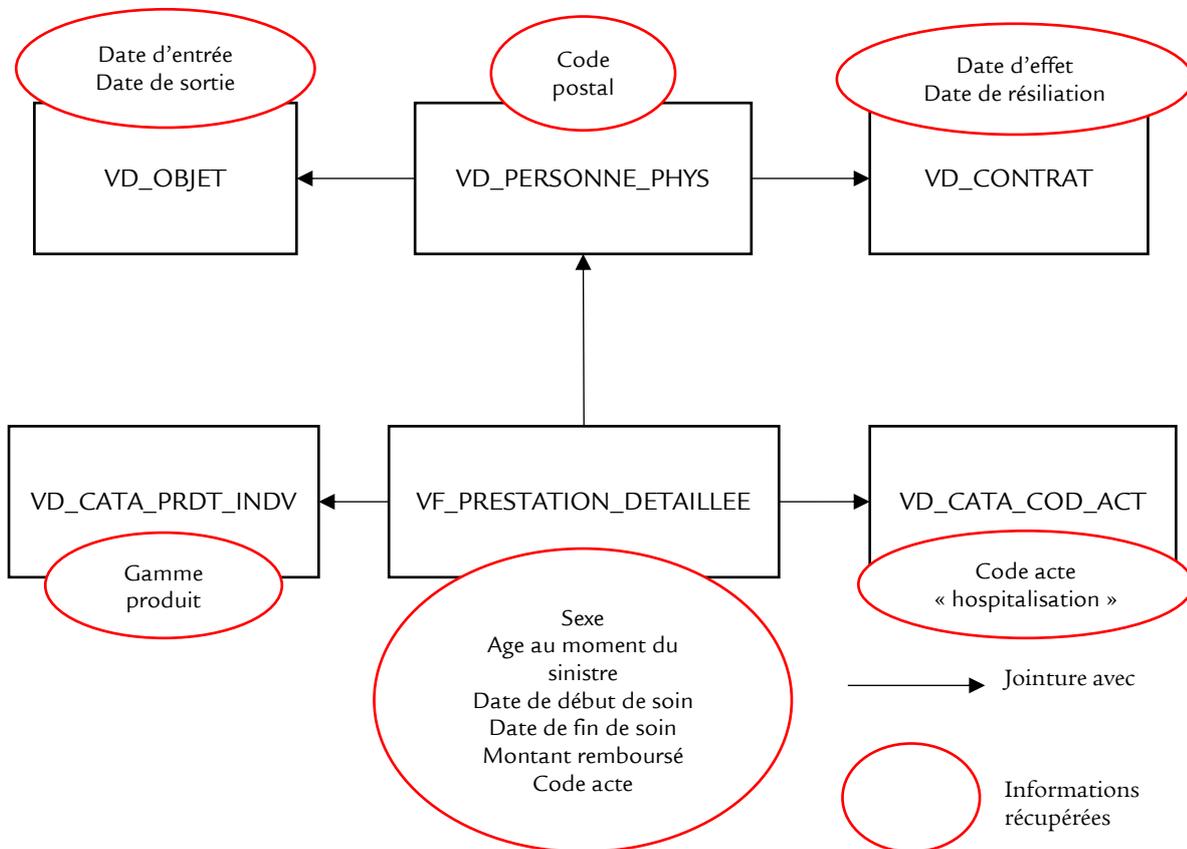


Figure II.3.2 : Schéma du processus de construction de la base de données

VF_PRESTATION_DETAILLEE : table SAS recensant les lignes de prestations en santé. Diverses informations plus ou moins complètes sont trouvées comme le numéro de contrat, le numéro de personne, le sexe, l'âge au moment du sinistre de l'assuré, la date de début et de fin de soin ou les montants déboursé et remboursé.

VD_PERSONNE_PHYS : table SAS pour les informations sur un assuré (géographie, date de naissance, sexe).

VD_CATA_PRDT_INDV: table SAS d'information pour les produits individuels, leur gamme et libellé.

VD_CATA_COD_ACT: table SAS d'information pour la signification des codes d'actes. Plusieurs regroupements par poste de soins sont proposés.

VD_CONTRAT: table SAS recensant tous les contrats et leurs caractéristiques telles que la date d'effet, le motif et la date de résiliation.

VD_OBJET: table SAS pivot faisant la jonction entre numéro de personne et numéro de contrat. Elle permet ainsi de retracer l'historique des contrats pour une même personne, avec les dates d'adhésion et de sortie.

Après application des conditions mentionnées en 3.1.2. et la vérification de la disponibilité des informations essentielles à l'étude, à savoir la **garantie**, les **dates de début** et **fin de soin**, l'**âge au moment du sinistre**, le **sexe** et le **code postal** de l'assuré, une base de prestations et une base des assurés ayant un contrat en cours dans chaque fenêtre d'étude annuelle sont constituées. Le tableau suivant résume les lignes de sinistres et les différentes populations récupérées :

| Année de survenance | Lignes de sinistres | Personnes sinistrées | Personnes présentes | Population sinistrée |
|---------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| 2010 | 195 774 | 60 892 | 861 609 | 7,07% |
| 2011 | 203 671 | 61 666 | 892 270 | 6,91% |
| 2012 | 202 087 | 60 151 | 895 401 | 6,72% |
| 2013 | 193 364 | 57 089 | 831 858 | 6,86% |
| 2014 | 176 104 | 51 369 | 751 955 | 6,83% |
| 2015 | 140 995 | 40 572 | 605 181 | 6,70% |
| 2016 | 178 218 | 55 753 | 617 772 | 9,02% |
| 2017 | 163 644 | 50 935 | 584 202 | 8,72% |
| 2018 | 157 277 | 48 330 | 554 099 | 8,72% |
| 2019 | 150 747 | 45 577 | 527 901 | 8,63% |
| 2020 | 122 908 | 37 563 | 502 919 | 7,47% |
| 2021 | 120 360 | 37 392 | 479 246 | 7,80% |
| 2022 | 118 454 | 38 274 | 483 178 | 7,92% |
| 2023 | 122 772 | 40 047 | 508 550 | 7,87% |

Table II.3.1 : Observations disponibles et personnes assurées en santé individuelle Standard par année de survenance

Avec un nombre de lignes de prestations et d'assurés presque divisé par deux entre 2010 et 2023, ce tableau vient corroborer la baisse de volume du portefeuille. Par ailleurs, entre 2015 et 2016, la population sinistrée varie significativement. Cette hausse n'a pu être expliquée en interne. Une hypothèse qui peut être donnée est la restructuration des gammes SwissLife survenue à la suite de l'importante réforme sur les contrats responsables de 2015. Bien que cette transition se soit faite en laissant les garanties inchangées, elle a probablement connu, en parallèle, des changements de processus ou une actualisation du système informatique. Ce saut doit être pris en compte dans la modélisation future.

3.1.4. Année de survenance 2020

En dehors des considérations internes, se pose la question de la conservation de l'année 2020. Tout d'abord, il peut être noté que la période d'étude coïncide avec celle de l'entre-deux-vagues de Covid-19. Bien qu'il y eût toujours des patients hospitalisés pour infection au virus, cette période fut la moins impactée en termes de nombre de séjours hospitaliers [DREES, 2021]. En effet, la fin de la saturation des services de réanimation a permis une reprise presque normale des services hospitaliers, en dehors des cas de contamination au Covid-19. Finalement, le nombre de séjours hospitaliers est resté approximativement similaire à celui de 2019 pour la même période, notamment pour les personnes âgées de plus de 45 ans. Enfin, suite à l'allocution du Premier Ministre Édouard Philippe le 14 mai, la fin des restrictions de déplacement sur le territoire national a permis aux personnes de partir en vacances après plusieurs mois de confinement.

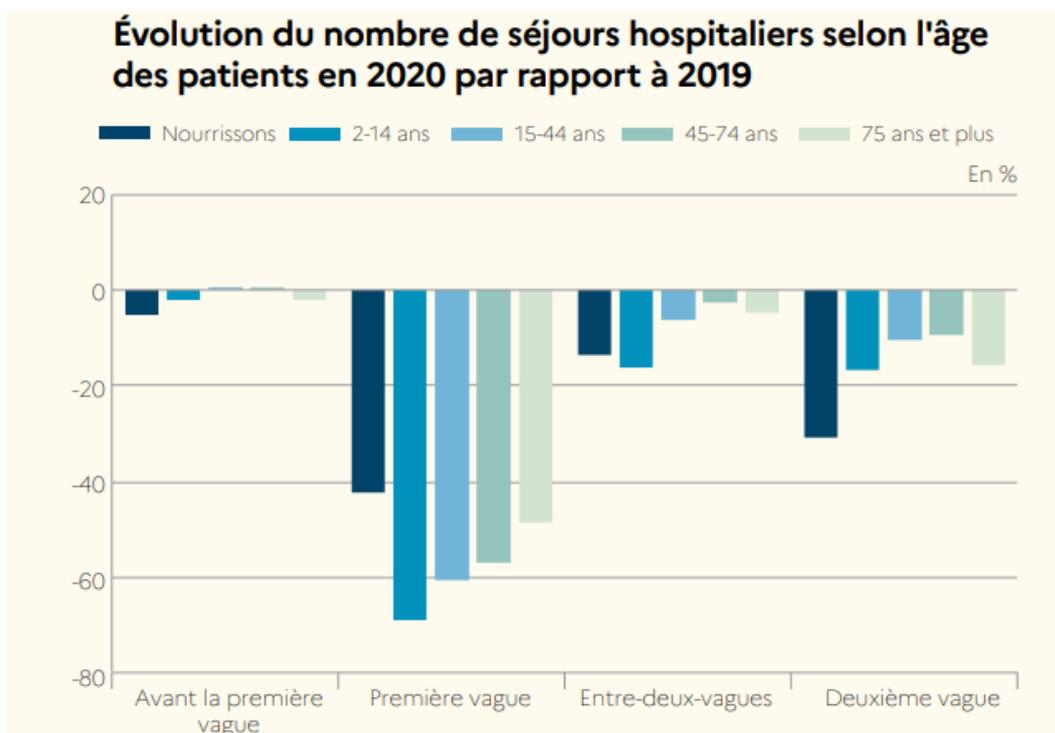


Figure II.3.3 : Comparaison 2019-2020 du nombre total de séjours hospitaliers (*source : DREES*)

Compte tenu de l'amélioration de la situation sanitaire, du faible effet sur la fréquence des séjours hospitaliers, de la normalisation des déplacements sur le territoire et de l'été relativement chaud, l'année 2020 a été conservée dans l'étude en supposant que les prestations liées aux fortes chaleurs sont indépendantes du reste. Intuitivement, il pourrait même être fait l'hypothèse que l'effet des fortes chaleurs sur le risque PaU-H a été plus important *ceteris paribus*, du fait d'une volonté manifeste de la part des ménages de changer d'environnement après plusieurs mois de confinement, ce qui aurait engendré une exposition accrue. De plus, en raison d'une appréhension renforcée de l'environnement extérieur suite à la forte mortalité engendrée par le virus, les personnes âgées pourraient avoir limité leurs déplacements : ceux ne disposant pas de moyens d'adaptation à la chaleur pourraient en avoir souffert dans leurs logements puisqu'ils étaient moins prompts à se rendre dans des bâtiments climatisés et peuplés tels que les supermarchés.

3.1.5. Variables internes explicatives non retenues

D'autres variables d'intérêt étaient également disponibles dans le datamart et pouvaient apporter un gain en précision dans l'étude. Il s'agit de la catégorie socioprofessionnelle (CSP) et du lieu de soin. Cependant, elles n'ont pas été retenues pour les raisons suivantes :

- la CSP est une variable qui n'est pas régulièrement mise à jour et ne représente donc pas une information complémentaire fiable. Par exemple, une personne aujourd'hui à la retraite peut toujours hériter d'une activité professionnelle. La CSP aurait été utile, la profession ayant été identifiée comme un facteur de vulnérabilité potentiel ;
- le lieu de soin est très rarement renseigné ou difficilement identifiable. En faisant l'hypothèse qu'un assuré se fait hospitaliser nécessairement dans le département où il a subi les effets d'une canicule, ce lieu de soin aurait pu être une bonne approximation.

3.1.4. Hypothèses et considérations préliminaires

L'indisponibilité quasi-systématique du lieu du passage aux urgences ou de l'hospitalisation implique de supposer que **l'assuré reçoit des soins dans son département**. En effet, le code postal à disposition est son lieu de résidence. Cette hypothèse se vérifie *a priori* pour les personnes très âgées qui réduisent leur mobilité mais est discutable pour les ménages avec enfants ou les jeunes retraités en période estivale. Elle est néanmoins nécessaire.

La seconde contrainte est celle concernant l'impossibilité de connaître, à partir du datamart, le motif d'un passage aux urgences ou d'une hospitalisation, et, *a fortiori*, d'identifier les sinistres liés à une hyperthermie, une déshydratation, etc. Ce problème de distinction n'est pas unique à l'étude et relève souvent d'une confidentialité des données de santé [Benmarhnia, 2017]. Par conséquent, dans la mesure où un lien chaleur-risque PaU-H est identifié pour le portefeuille, il n'est pas possible d'affirmer rigoureusement qu'il relève d'une causalité. **L'étude tentera donc de mettre en évidence une corrélation.**

Enfin, il est important de noter que la survenance d'un sinistre causé ou aggravé par les fortes chaleurs ne se manifeste pas nécessairement au moment d'un épisode caniculaire. Elle peut se produire plusieurs jours, mois, voire années, après l'événement météorologique. C'est notamment le cas pour les maladies cardiovasculaires, respiratoires et rénales. Sans plus d'informations accessibles (cf. paragraphe précédent) et parce que s'intéresser aux sinistres « tardifs » sortirait du cadre de l'étude, ce mémoire ne cherchera pas à évaluer l'effet de la chaleur sur la morbidité à un horizon postérieur à une période d'étude (mai-septembre). Autrement dit, si un effet doit être perçu, il sera probablement lié aux pathologies en lien avec la chaleur, car ces dernières se manifestent généralement dans un court laps de temps, notamment pendant un épisode de forte chaleur.

3.2. Analyse générale du portefeuille d'étude

L'analyse ci-dessous a pour vocation de représenter l'évolution de plusieurs caractéristiques propres aux assurés mais aussi des différentes garanties « hospitalisation ».

Elle permettra de mieux comprendre la transformation du portefeuille et d'anticiper l'approche à retenir dans la modélisation afin d'éviter au mieux l'introduction de biais.

3.2.1. Profil des assurés

Les assurés sont caractérisés par leur âge et leur sexe. Ces deux variables ont leur importance, non seulement en tant que facteurs de vulnérabilité, mais aussi en termes de risque PaU-H pour toutes causes confondues. Dans un contrat santé, les garanties d'hospitalisation sont utilisées en majorité par les seniors, qui ont des besoins progressifs avec l'âge. Par ailleurs, les hommes de 65 ans ou plus semblent recourir plus souvent aux soins hospitaliers que les femmes, même si l'écart reste faible [INSEE, 2022]. Cela peut s'expliquer aussi par une meilleure considération des femmes quant à leur état de santé et donc une prévention comportementale accrue (habitudes de vie, consultations). En effet, selon la même source, les femmes de moins 65 ans consultent plus fréquemment un médecin généraliste ou spécialiste.

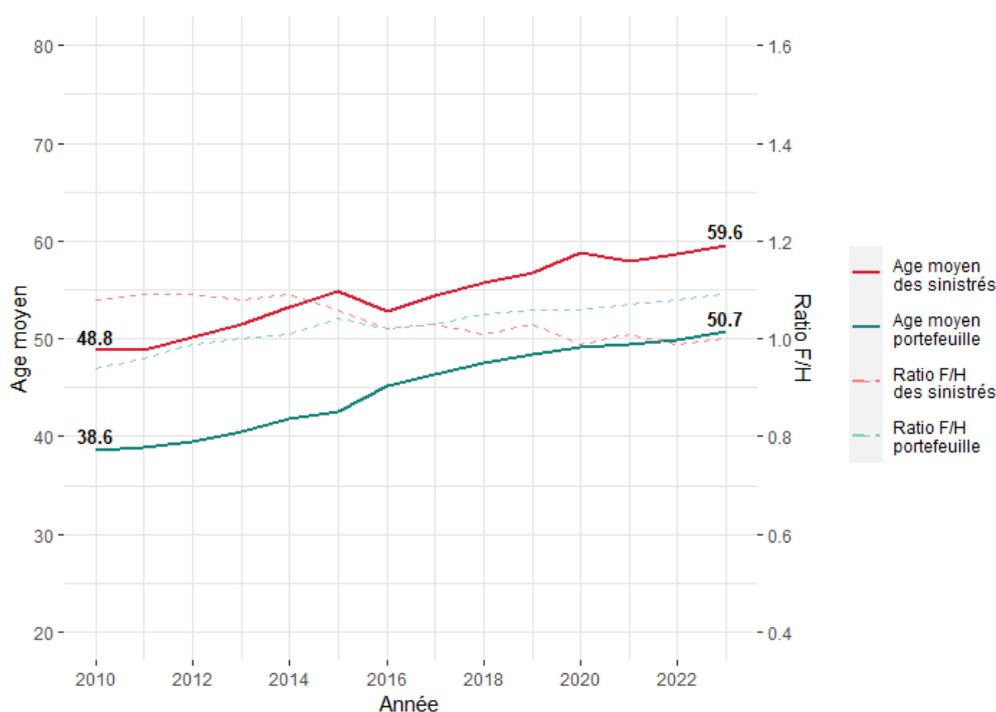


Figure II.3.4 : Évolution de l'âge et du rapport F/H du portefeuille

L'évolution de l'âge moyen du portefeuille est notable. Comme évoqué en 3.1.2., le vieillissement du portefeuille s'explique par le développement du collectif suite à l'ANI de 2013. La population en individuel est constituée de plus en plus majoritairement de seniors, les actifs se tournant vers une complémentaire santé collective.

Par ailleurs, la tendance de l'âge moyen des sinistrés suit l'évolution globale du portefeuille. L'âge moyen des sinistrés est, en moyenne, supérieur de dix ans à celui du portefeuille et s'explique par le fait que les principaux besoins en garanties d'hospitalisation apparaissent essentiellement au cours d'un âge avancé (apparition de comorbidités). Une cassure est visible entre 2015 et 2016 et peut être en lien avec les évolutions du datamart préalablement observées durant cette période.

En outre, le rapport du nombre de femmes à celui des hommes, corrigé des effectifs pour chaque genre en ce qui concerne les assurés sinistrés, voit deux tendances. Le portefeuille,

initialement majoritaire en hommes, voit la proportion de femmes augmenter sur la période, ces dernières passant en supériorité numérique dès 2014. Au contraire, les femmes sont au départ plus nombreuses à recevoir des soins, mais le ratio F/H corrigé tend vers 1 avec le temps. Cela peut s'expliquer en concomitance avec l'évolution de l'âge et des observations évoquées précédemment : avec le vieillissement du portefeuille, les hommes ont plus recours aux soins hospitaliers à un âge avancé à cause de l'apparition de comorbidités peut-être moins bien anticipées que par les femmes.

3.2.2. Garanties

Le datamart de SLPS classe les prestations selon la codification propre à la nomenclature générale des actes médicaux (NGAP). Dans ce mémoire, dans un souci de simplification, les prestations hospitalières, décrites par une trentaine de libellés, ont été regroupées selon plusieurs catégories :

- le forfait journalier ;
- le frais de séjour ;
- l'hospitalisation ;
- la chambre particulière, le lit d'accompagnant et les frais de télévision ;
- la participation assuré ;
- le forfait urgence ;
- le transport ;
- les autres prestations (actes chirurgicaux, actes techniques médicaux) qui représentent une très faible proportion des sinistres récupérés.

La catégorie « participation assuré » regroupe notamment les actes dont le ticket modérateur est devenu une participation forfaitaire de 24€.

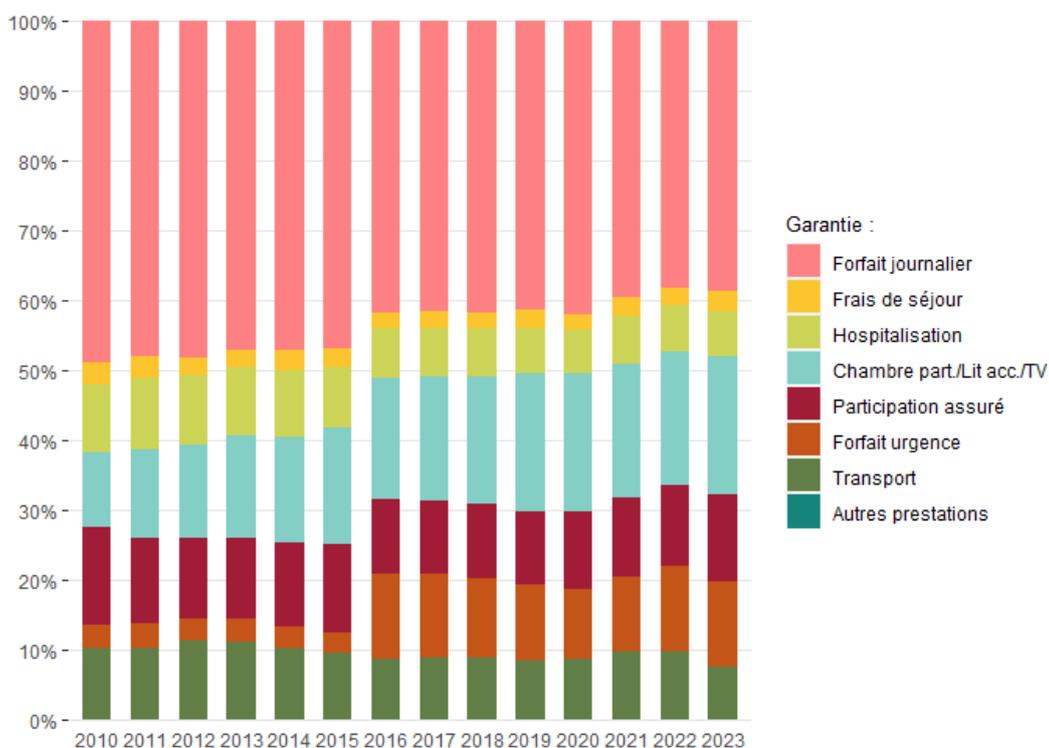


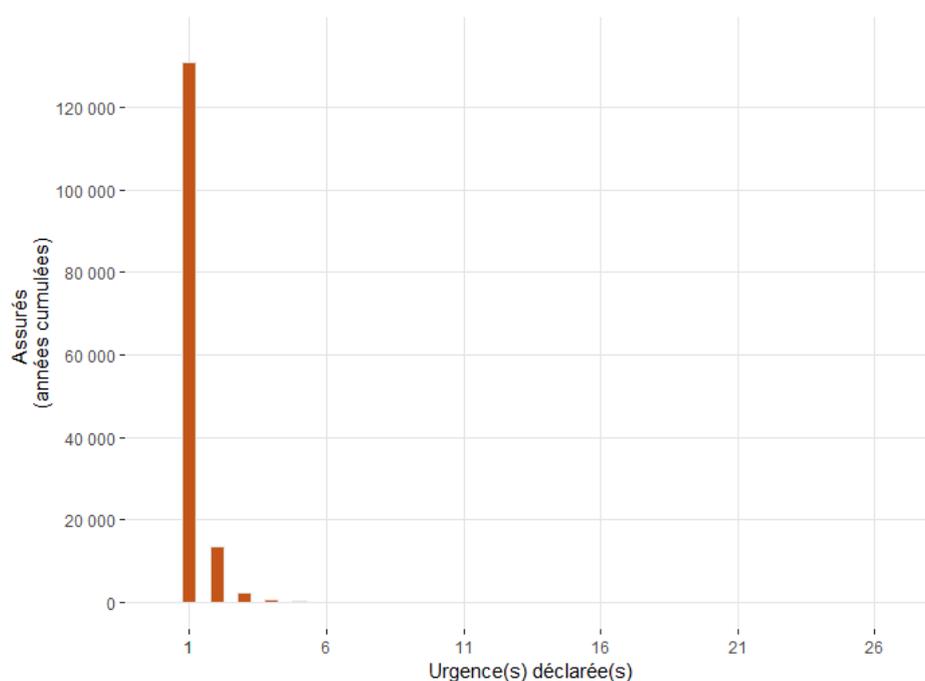
Figure II.3.5 : Répartition du nombre d'actes par garantie

Ce graphique empilé à 100% de ces différentes catégories permet d’observer la part de chacune dans le nombre d’actes intervenant et aussi d’identifier un éventuel changement. Le forfait journalier est la principale garantie remboursée par SLPS et compte pour presque 50% du nombre d’actes sur la période étudiée. De plus, il est intéressant de remarquer la part toujours croissante des garanties pour les éléments additionnels de confort (chambre particulière, télévision). Ce constat peut être mis en relation avec la hausse de l’âge moyen. En effet, les personnes âgées ont des hospitalisations souvent plus lourdes que les jeunes actifs, et chercheront généralement le confort si la complémentaire santé le leur permet.

Un autre élément est la part des forfaits urgences qui connaît un saut à compter de 2016. En lien avec les observations faites précédemment, cette évolution survient en même temps que les évolutions constatées dans le datamart, probablement du fait d’une actualisation du système.

3.2.3. Sinistralité observée

Dans un premier temps, il peut être constaté que la plupart des assurés déclarent moins de deux passages aux urgences ou hospitalisations par an. Il est possible que les assurés qui connaissent plusieurs périodes d’hospitalisation soient des assurés qui ont des antécédents qui requièrent des passages réguliers tels que la mise sous dialyse. Quant aux urgences, dont l’aléa prend une part plus importante, rares sont les assurés ayant eu plus de deux passages aux urgences sur un an (environ 2%). Par conséquent, à l’instar d’une étude sur la mortalité ou des études statistiques menées par Santé publique France, l’analyse fréquentielle s’intéressera au nombre cumulé d’assurés sinistrés sur une période donnée, et non au nombre de sinistres par assuré. Les histogrammes suivants cumulent les années de survenance et les assurés peuvent donc apparaître plusieurs fois. Par exemple, un assuré ayant eu un passage en 2021, un deuxième en 2022 et deux en 2023, comptera deux fois parmi les assurés avec une urgence déclarée et une fois parmi les assurés avec deux urgences déclarées.



(a)

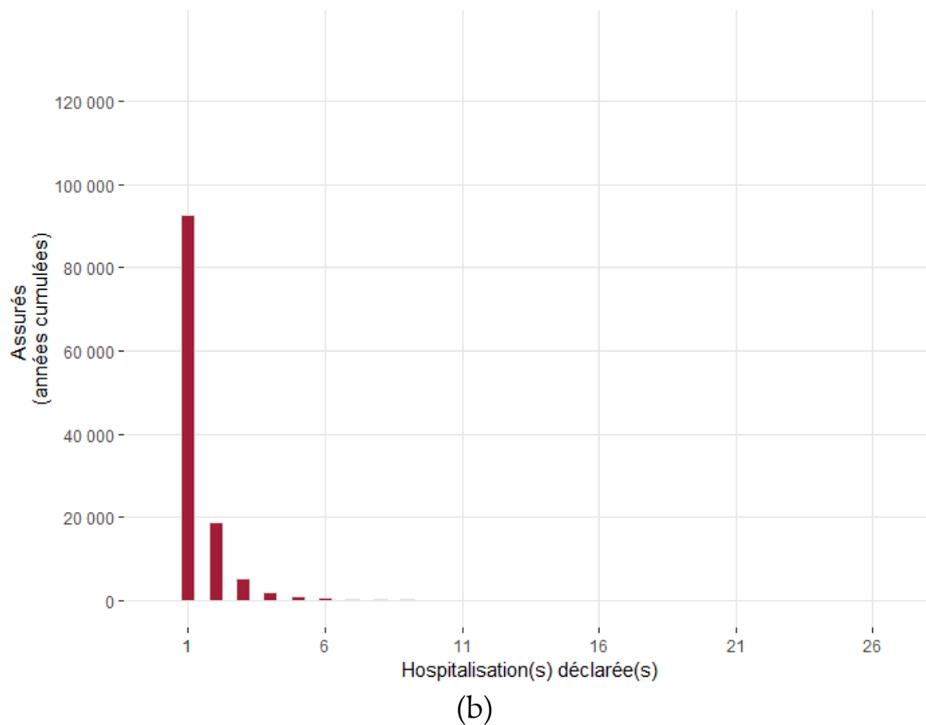


Figure II.3.6 : Histogrammes des déclarations pour :
 (a) : urgences ; (b) : hospitalisations

Comme évoqué précédemment, certains assurés ont connu un nombre important d'hospitalisations et de passages aux urgences distincts à eux seuls. Etant donné qu'il n'est pas possible de connaître explicitement le motif du sinistre, ils sont d'abord conservés dans la modélisation, dans le doute.

Avant de chercher à modéliser le lien chaleur-risque PaU-H, il est possible de voir, explicitement et assez globalement, une tendance du nombre hebdomadaire d'assurés sinistrés aux urgences qui suit celle de la série de l'IBM de sévérité. Bien entendu, comme il n'est pas possible de distinguer les urgences pour PLC des autres motifs, d'autres facteurs entrent en compte. Néanmoins, des pics sont souvent relevés en période estivale lorsque l'indicateur biométéorologique est à son plus haut, comme l'atteste ce graphique pour la région Île-de-France :

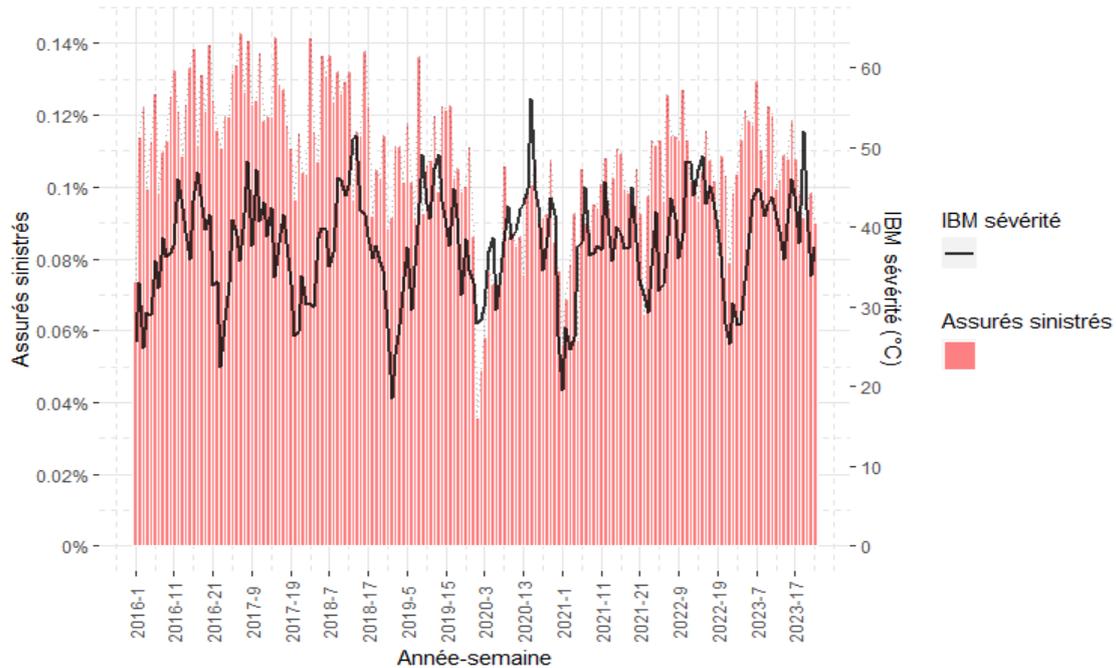


Figure II.3.7 : Proportion d'assurés sinistrés par semaine sur la période d'étude (Île-de-France)

Le nombre de sinistrés a été rapporté à la population exposée. Le creux observable la première semaine de mai 2020 est probablement en lien avec le déconfinement annoncé uniquement pour le 11 mai. La proportion plus faible de sinistralité en 2022 et 2023 est certainement une conséquence de l'application du nouveau forfait patient urgence (FPU) qui ne comptabilise pas le passage aux urgences en cas d'hospitalisation.

3.3. Modélisation fréquentielle du lien chaleur-risque PaU-H

3.3.1. Approche retenue

L'objectif est d'évaluer la contribution de la chaleur sur le risque PaU-H, toutes choses étant égales par ailleurs. Dans un premier temps, compte tenu du nombre d'assurés sinistrés (en moyenne 50 000 par an), il est difficile de réaliser une étude à la maille départementale, et ce sur cinq mois, sans obtenir un nombre important de jours sans sinistre. Par ailleurs, pour rester en cohérence avec l'étude climatique menée en Partie I, le choix portera sur le regroupement en cinq zones géographiques précédemment utilisé.

En fonction de leur département de résidence, les assurés sont associés à la zone géographique dont ils relèvent. Par ailleurs, les séries temporelles des indicateurs biométéorologiques de chaque département IBM_{min} et IBM_{max} sont moyennées pour former de nouvelles séries sur chaque zone géographique.

Ce choix reste *a priori* cohérent, étant donné que les fortes chaleurs sont très rarement localisées sur un département en particulier.

De surcroît, compte tenu de l'important changement survenu dans le datamart entre 2015 et 2016 et de ses conséquences au niveau des prestations, la période d'étude est ramenée à

2016 jusqu'à 2023. Malgré le risque de perte d'information, ce choix permet d'éviter d'introduire un biais.

La modélisation s'appuiera sur les modèles linéaires généralisés (MLG). En effet, ils permettront d'évaluer la significativité d'un lien entre une variable explicative et la réponse, ce qui est le but du chapitre. Un modèle sera appliqué pour le nombre d'assurés sollicitant les urgences et un second pour les hospitalisations.

3.3.2. Modèles linéaires généralisés

Les modèles linéaires généralisés sont une extension du modèle de régression linéaire et ont pour but d'apporter une solution aux limites posées par ce dernier, telles que les hypothèses contraignantes de normalité des résidus et d'homoscédasticité. Ils sont utilisés pour identifier un lien entre une variable à expliquer, dite « réponse » et des variables explicatives.

Pour cela, ils présentent trois composantes :

- une partie aléatoire composée d'un vecteur $(Y_1, \dots, Y_n)^T$ de variables aléatoires à expliquer, dont les lois appartiennent à la famille exponentielle, *i.e.*, ayant une densité de la forme :

$$f(y, \theta, \phi) = \exp\left(\frac{y\theta - b(\theta)}{a(\phi)} + c(y, \phi)\right)$$

avec :

- $y \in \mathbb{S} \subset \{\mathbb{N}, \mathbb{R}\}$;
 - θ le paramètre canonique ;
 - ϕ le paramètre de dispersion ;
 - $a : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction monotone et positive ;
 - $b : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} \in \mathcal{C}^2(\mathbb{R}, \mathbb{R})$;
 - $c : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$.
- une partie déterministe constituée des vecteurs explicatifs (X_1, \dots, X_p) avec :
 $\forall j \in \llbracket 1, p \rrbracket, X_j = (X_{1j}, \dots, X_{nj})^T$ le vecteur de la j -ème variable explicative pour les réponses $(Y_i)_{1 \leq i \leq n}$.
 - une fonction de lien $g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ strictement monotone et déterministe qui représente la relation entre les parties aléatoire et déterministe :

$$g_n(E(Y)) = \beta_0 + \sum_{j=1}^p \beta_j X_j$$

avec :

- $g_n : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n, \forall x \in \mathbb{R}^n, g_n(x) = (g(x_1), \dots, g(x_n))$;
- β_0, \dots, β_p les coefficients de régression qui doivent être estimés.

L'estimation des coefficients se fait souvent par la méthode du maximum de vraisemblance.

Une des limites des MLG est qu'ils supposent une relation linéaire entre la variable à expliquer et les variables explicatives. Il est alors fait l'hypothèse, qui peut paraître intuitive, que chaque effet est additif. Une autre possibilité intéressante est l'utilisation des modèles additifs généralisés qui peuvent apporter un ajustement supplémentaire avec des fonctions paramétrables.

3.3.3. Description des variables intégrées dans le modèle

Comme évoqué précédemment, la récupération de plusieurs variables d'intérêt a pu être faite et ces dernières serviront de variables explicatives du modèle :

- le genre (variable binaire) ;
- l'âge au moment du sinistre (variable catégorielle à quatre modalités, dont une représente la population des seniors et une autre la population des nourrissons et jeunes enfants) ;
- la zone géographique de résidence (variable catégorielle à cinq modalités) ;
- l'année de survenance ;
- une variable continue $IBM_{sévérité} = IBM_{min} + IBM_{max}$ représentant la « sévérité » de l'indicateur biométéorologique.

Intégrer le genre et l'âge permet d'inclure des modalités reflétant des facteurs de vulnérabilité. En outre, la variable IBM_{sev} est la composante de température retenue. Plusieurs autres façons de représenter la composante « chaleur » ont été testées mais n'obtenaient pas un résultat satisfaisant ou perdaient trop d'information. Les deux principales alternatives sont données ci-après :

- considérer séparément IBM_{min} et IBM_{max} . Toutefois, les deux variables sont structurellement et fortement corrélées, ce qui ne paraissait pas pertinent. De plus, les considérer indépendamment ne permettait pas de traiter le cas où un IBM est stable tandis que l'autre est anormalement élevé (une nuit tropicale par exemple) ;
- créer une variable indicatrice évaluant les jours caniculaires selon la définition d'une canicule. Cependant, comme mentionné précédemment, le risque sanitaire ne se manifeste pas seulement à partir du dépassement des seuils d'alerte canicule. Garder une telle variable implique un risque de perte d'information, ce qui n'est pas souhaitable.

La somme des deux indicateurs biométéorologiques est intéressante et, par ailleurs, utilisée par Météo France pour classifier les canicules. En effet, lorsque la température diurne est très élevée mais la température nocturne proche des normales, seul l' IBM_{max} contribue réellement à l'anomalie de température. Au contraire, lorsque la température diurne est proche des normales mais la température nocturne élevée (le cas par exemple d'un littoral en période de canicule), c'est l' IBM_{min} qui est majoritairement contributeur. Enfin, lors d'une canicule, les deux effets sont cumulés.

Ces variables serviront à expliquer le **nombre hebdomadaire d'assurés sinistrés** N_{heb} . Le choix d'une vision hebdomadaire est *a priori* pertinent pour deux raisons :

- l'activité hospitalière programmée connaît une très forte baisse en fin de semaine et cette baisse pourrait venir compenser l'effet lié aux aléas des fortes chaleurs. L'étude à la maille journalière, outre un manque de puissance statistique avérée, n'est donc pas retenue ;
- comme montré en première partie, les épisodes de forte chaleur durent généralement plusieurs jours (à l'exception des pics de chaleur).

En résumé, le modèle linéaire généralisé (modèle complexe) retenu est le suivant :

$$g_n \left(\frac{E(N_{heh})}{N_{assures}} \right) = \beta_0 \mathbb{I}_n + \beta_{genre} X_{genre} + \beta_{age} X_{age} + \beta_{zone} X_{zone} + \beta_{annee} X_{annee} + \beta_{IBM_{sev_{heh}}} X_{IBM_{sev_{heh}}}$$

La variable $N_{assures}$ est la variable *offset* du modèle et tient compte des évolutions de la population assurée exposée pour un groupe d'individus donné.

3.3.4. Indépendance des variables explicatives

La représentation de l'indépendance entre variables qualitatives dans la base servant à la modélisation peut se faire à partir de la table de contingence :

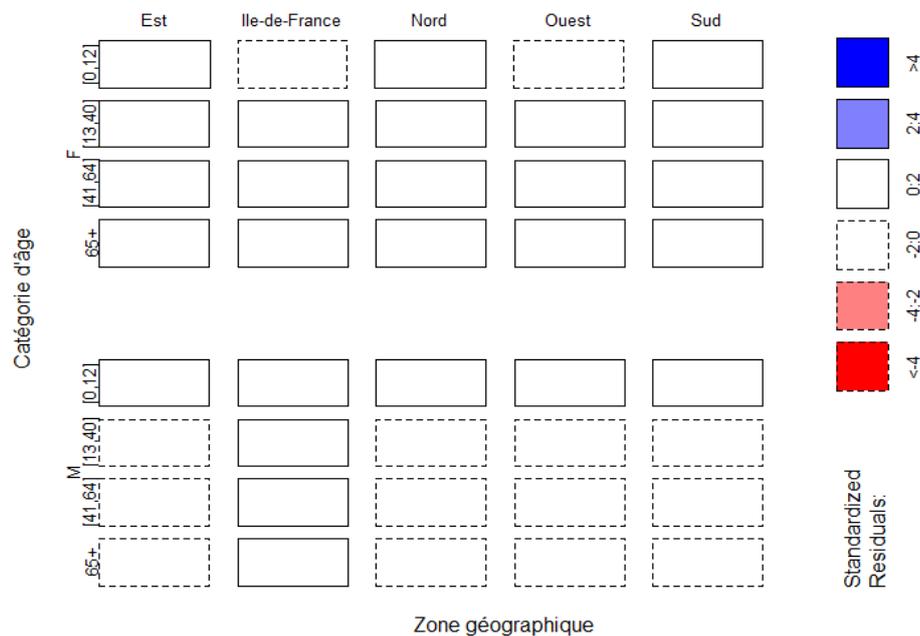


Figure II.3.8 : Résidus standardisés pour les variables *Age*, *Zone géographique* et *Genre*

Le coefficient de Cramer permet également une quantification de la relation entre variables qualitatives. Il découle du khi-deux de contingence et varie entre 0 et 1, 0 étant une relation d'indépendance et 1 une situation de corrélation parfaites :

$$C = \sqrt{\frac{\chi^2}{n * \min(m_1 - 1, m_2 - 1)}}$$

avec :

- χ^2 le khi-deux de contingence mesurant l'écart à la situation d'indépendance ;
- m_1 et m_2 le nombre de modalités respectif de la première et deuxième variables ;
- n le nombre d'observations.

| | Genre | Catégorie d'âge | Zone géographique | Année de survenance |
|---------------------|--------------|-----------------|-------------------|---------------------|
| Genre | 1 | | | |
| Catégorie d'âge | 0,0009858003 | 1 | | |
| Zone géographique | 0,0008295982 | 0,0008300705 | 1 | |
| Année de survenance | 0,0008047881 | 0,0008052463 | 0,0008944196 | 1 |

Table II.3.2 : Coefficients de Cramer pour les variables qualitatives du modèle

Ces résultats sont normaux et volontaires, car la base a été construite de telle sorte qu'une ligne d'observation corresponde au nombre hebdomadaire d'assurés sinistrés selon les caractéristiques données. Sinon, des situations de forte corrélation se présenteraient, comme il a été vu, entre l'année de survenance et l'âge.

Quant à la relation entre variables qualitative et quantitative, le rapport de corrélation est employé. Il se définit comme le rapport des variances de la variable quantitative X_{quant} en fonction des groupes d'individus associés à une modalité de la variable qualitative X_{quali} et de la variance totale :

$$\eta^2 = \frac{\sum_k n_k (\bar{x}_k - \overline{X_{quant}})^2}{\sum (X_{quant} - \overline{X_{quant}})^2}$$

avec :

- n_k le nombre d'individus associés à la k-ème modalité de X_{quali} ;
- \bar{x}_k la moyenne de X_{quant} pour le groupe de la k-ème modalité de X_{quali} .

Les relations avec l'indicateur biométéorologique sont alors les suivantes :

| | IBM |
|---------------------|--------------|
| Genre | 1,784087e-06 |
| Catégorie d'âge | 4,55477e-06 |
| Zone géographique | 0,1411942 |
| Année de survenance | 0,03094874 |

Table II.3.3 : Rapports de corrélation des variables explicatives

Sans surprise, tout lien structurel avec le genre et l'âge est écarté. Cependant, une corrélation, quoique modeste, peut être notée entre la zone géographique et les IBM. En

effet, les séries des IBM découlent des températures enregistrées, et ces dernières, du climat associé.

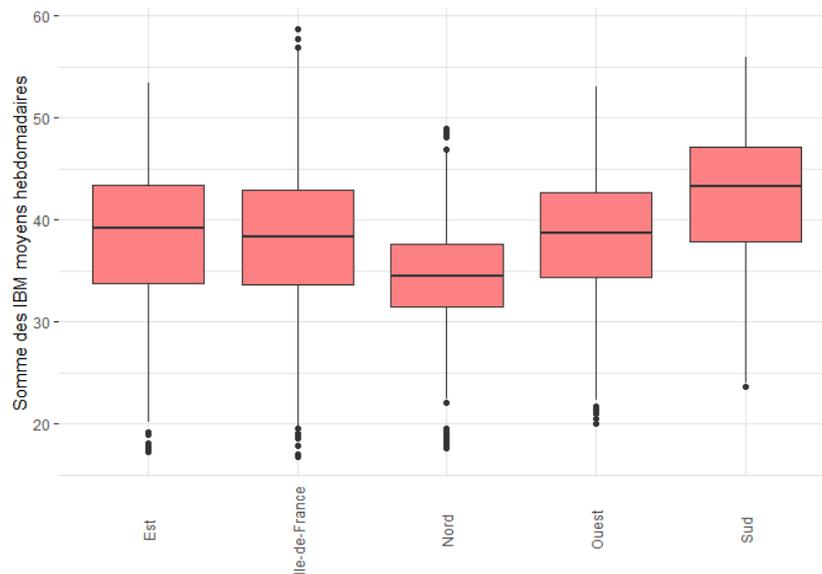


Figure II.3.9 : Boîtes à moustaches de $IBM_{\text{sévérité}}$ selon la zone géographique

Compte tenu de la faible corrélation et de l'importance des variables dans le modèle, les deux variables sont conservées.

3.3.5. Modélisation de la fréquence des passages aux urgences

Pour les passages aux urgences, les observations pour la garantie du forfait urgence sont utilisées. Il est à noter qu'un biais peut être introduit à compter de 2022, puisque les assurés se faisant hospitaliser suite à un passage aux urgences n'ont pas de FPU à régler. Toutefois, sur les années précédentes, la part des assurés déclarant une hospitalisation en même temps que le forfait urgence reste négligeable. Il est donc fait l'hypothèse que cela est le cas pour 2022 et 2023.

Tout d'abord, une hypothèse sur la loi du nombre hebdomadaire d'assurés sinistrés doit être faite. Intuitivement, il peut être envisagé une loi de Poisson ou, en cas de surdispersion, une loi binomiale négative.

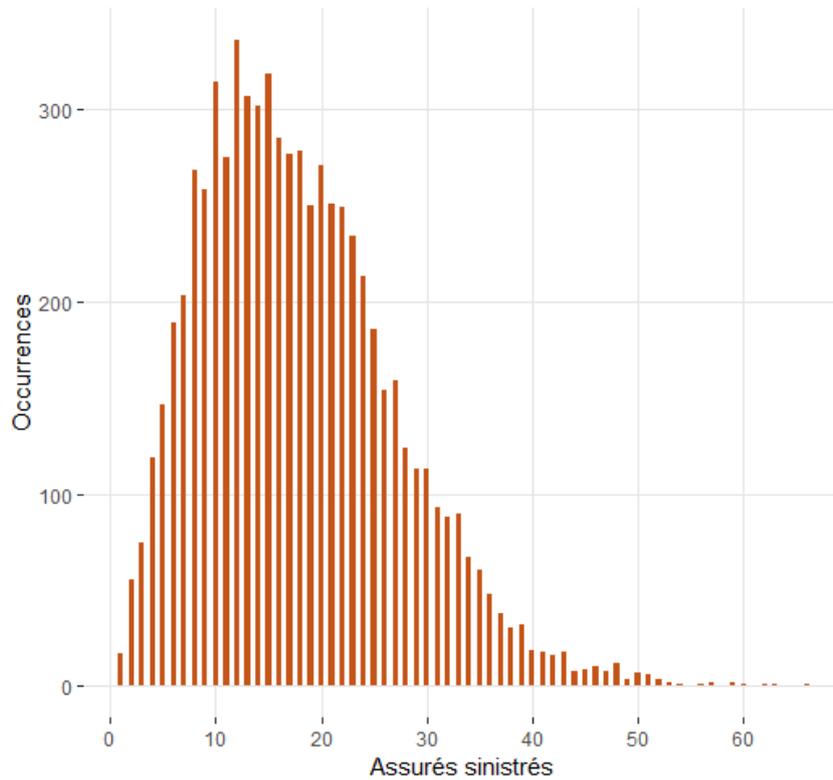


Figure II.3.10 : Histogramme du nombre d'assurés hebdomadaire déclarant un passage aux urgences

Une dispersion à droite peut être observée. La loi binomiale négative semble plus appropriée. En comparaison, un MLG faisant l'hypothèse que la réponse suit une loi de Poisson sera évalué également. Avec une fonction de lien logarithme, le modèle devient :

$$\forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket, \mu_i = n_i \exp \left(\beta_0 + \sum_j \beta_j x_j \right)$$

Les modèles complexes permettent d'obtenir les coefficients de régression suivants avec leur p-valeur :

| X | Poisson (modèle complet) | | | BN (modèle complet) $\theta = 34,9$ | | |
|---------------------------|--------------------------|----------|-------------------|--|----------|-------------------|
| | Coefficient | Valeur-p | IC (95%) | Coefficient | Valeur-p | IC (95%) |
| Intercept | -6,7718595 | < 2e-16 | [-6,80 ; -6,74] | -6,790037 | < 2e-16 | [-6,83 ; -6,75] |
| GenreF | 0,0399906 | 1,38e-12 | [0,031 ; 0,049] | 0,0367789 | 2,01e-07 | [0,025 ; 0,048] |
| Cat_age[0,12] | 0,5756391 | < 2e-16 | [0,56 ; 0,59] | 0,5899461 | < 2e-16 | [0,57 ; 0,61] |
| Cat_age[41,64] | -0,2689377 | < 2e-16 | [-0,28 ; -0,26] | -0,2570536 | < 2e-16 | [-0,27 ; -0,24] |
| Cat_age65+ | -0,1315498 | < 2e-16 | [-0,14 ; -0,12] | -0,1171856 | < 2e-16 | [-0,13 ; -0,10] |
| GroupeRegionIle-de-France | -0,1161163 | < 2e-16 | [-0,13 ; -0,10] | -0,1123302 | < 2e-16 | [-0,13 ; -0,093] |
| GroupeRegionNord | 0,3404112 | < 2e-16 | [0,33 ; 0,35] | 0,3475543 | < 2e-16 | [0,33 ; 0,36] |
| GroupeRegionOuest | 0,1560713 | < 2e-16 | [0,14 ; 0,17] | 0,1565454 | < 2e-16 | [0,14 ; 0,17] |
| GroupeRegionSud | 0,1724243 | < 2e-16 | [0,16 ; 0,19] | 0,1767517 | < 2e-16 | [0,16 ; 0,19] |
| Annee2017 | -0,0597946 | 2,44e-09 | [-0,076 ; -0,043] | -0,0554234 | 2,12e-05 | [-0,077 ; -0,034] |
| Annee2018 | -0,0869538 | < 2e-16 | [-0,10 ; -0,070] | -0,0817474 | 7,16e-10 | [-0,10 ; -0,060] |
| Annee2019 | -0,1197293 | < 2e-16 | [-0,14 ; -0,10] | -0,1141521 | < 2e-16 | [-0,14 ; -0,092] |
| Annee2020 | -0,3400810 | < 2e-16 | [-0,36 ; -0,32] | -0,3406023 | < 2e-16 | [-0,36 ; -0,32] |
| Annee2021 | -0,2313140 | < 2e-16 | [-0,25 ; -0,21] | -0,2249664 | < 2e-16 | [-0,25 ; -0,20] |
| Annee2022 | -0,1425580 | < 2e-16 | [-0,16 ; -0,12] | -0,1377197 | < 2e-16 | [-0,16 ; -0,11] |
| Annee2023 | -0,1566865 | < 2e-16 | [-0,17 ; -0,14] | -0,1533321 | < 2e-16 | [-0,18 ; -0,13] |
| IBM_sev_semaine | 0,0051831 | < 2e-16 | [0,0044 ; 0,0059] | 0,0052559 | < 2e-16 | [0,0043 ; 0,0062] |

Table II.3.4 : Valeur, significativité et intervalle de confiance à 95% des coefficients (pour les MLG Poisson et BN)

En considérant un seuil usuel de 5%, les coefficients de régression sont tous significatifs. En particulier, le coefficient associé à la variable *IBM_sev_semaine* est positif et vient soutenir les observations qui ont pu être faites à l'aide de l'analyse descriptive précédente et celles par Santé publique France à l'échelle nationale : avec les éléments récupérés et dans le cadre de cette étude, il existe une corrélation entre le nombre hebdomadaire d'assurés passant aux urgences et la sévérité de l'IBM.

Comme la réponse est continue, la qualité d'ajustement du modèle peut être évaluée avec la déviance. Elle se définit comme deux fois le logarithme du rapport de vraisemblance entre le modèle saturé, *i.e.*, celui qui possède autant de paramètres que d'observations et donc ne résume pas la réalité, et le modèle de l'étude :

$$D = 2\ln(L_{sature}) - 2\ln(L)$$

Empiriquement, il est possible de regarder la déviance rapportée au nombre de degrés de liberté $\frac{D}{n-p-1}$. Les résultats de ce critère pour chaque modèle testé sont présentés ci-dessous avec l'*Akaike Information Criterion* (AIC) qui a pour expression :

$$AIC = 2p - 2\ln(\mathcal{L})$$

avec :

- p le nombre de paramètres ;
- \mathcal{L} le maximum de la fonction de vraisemblance du modèle.

L'AIC est une mesure qui pénalise avec le premier terme les modèles possédant un trop grand nombre de paramètres, et donc ne respectant pas le critère de parcimonie, ainsi que les modèles mal décrits avec le second, et donc avec une faible vraisemblance.

| Variables | Modèles (Poisson) | | Modèles (BN) | |
|--|-------------------------------|-----------|-------------------------------|-----------|
| | Critère empirique de déviance | AIC | Critère empirique de déviance | AIC |
| (Intercept) + Genre + Cat_age + GroupeRegion + Annee + IBM_sev_semaine | 1,55 | 43 153,37 | 1,04 | 42 444,86 |
| (Intercept) + Genre + Cat_age + GroupeRegion + IBM_sev_semaine | 1,72 | 44 312,41 | 1,04 | 43 147,39 |
| (Intercept) + Genre + Cat_age + IBM_sev_semaine | 2,12 | 47 137,89 | 1,05 | 44 663,14 |
| (Intercept) + Genre + IBM_sev_semaine | 3,32 | 55 613,94 | 1,12 | 48 767,72 |
| (Intercept) + IBM_sev_semaine | 3,33 | 55 642,68 | 1,12 | 48 766,41 |

Table II.3.5 : Critères d'ajustement et de performance des modèles fréquentiels testés (pour les urgences)

Le modèle retenu est celui qui minimise les critères empirique de déviance et AIC, c'est-à-dire le modèle complexe supposant une loi binomiale négative pour la réponse. En raison de son critère empirique de déviance proche de 1, le modèle a un ajustement convenable.

Les résidus de Pearson et de déviance du modèle retenu peuvent être représentés :

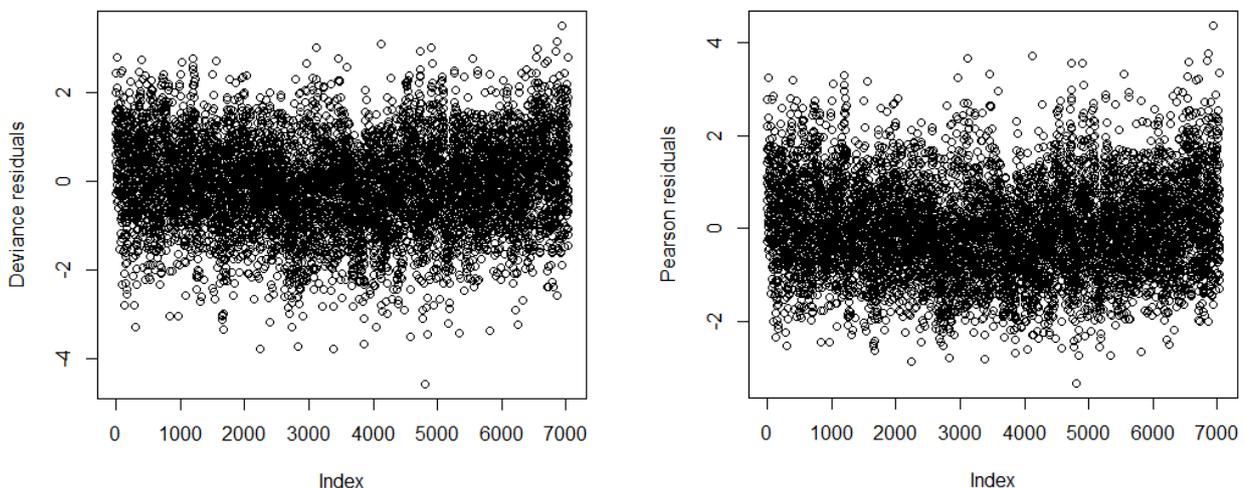


Figure II.3.11 : Résidus de déviance et de Pearson

La forme quasi-cylindrique des résidus permet d'accepter le modèle graphiquement. Les coefficients du modèle sont gardés par la suite.

3.3.6. Modélisation de la fréquence des hospitalisations

Pour sa capacité à résumer de manière quasi-exhaustive la sinistralité en hospitalisation, la garantie du forfait journalier est utilisée pour l'étude.

Un raisonnement similaire à celui utilisé pour les passages aux urgences peut être appliqué. Toutefois, compte tenu de l'aléa moins important du fait des hospitalisations qui peuvent être programmées, il est important d'essayer préalablement de s'affranchir au mieux des observations qui correspondraient à des assurés se faisant régulièrement hospitaliser pour des pathologies connues (insuffisance rénale nécessitant une dialyse, cancer). En effet, ces observations pourraient être influentes dans la modélisation.

La période annuelle d'étude est restreinte aux mois de juillet et août pour conserver les températures les plus chaudes, tout en limitant les hospitalisations ne résultant pas d'un aléa immédiat. En effet, l'activité hospitalière programmée est réduite, notamment en août. Par ailleurs, il est encore possible de regarder graphiquement le nombre de forfaits journaliers remboursés par assuré entre 2016-2023 pour cette période :

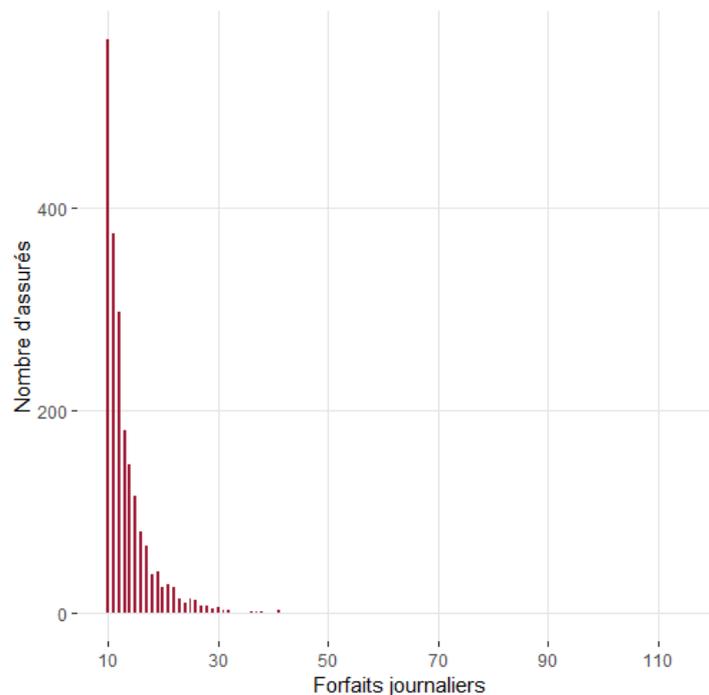


Figure II.3.12 : Nombre d'assurés en fonction du nombre de forfaits journaliers remboursés (FJ ≥ 10)

Un assuré a été hospitalisé plus de cent jours et une centaine a connu plus de vingt jours d'hospitalisation. Les quantiles à l'extrême droite peuvent être calculés et peuvent constituer un critère de sélection :

| 50% | 90% | 95% | 99% | 99,5% | 99,9% |
|-----|-----|-----|-----|-------|-------|
| 2 | 6 | 8 | 14 | 17 | 26 |

Table II.3.6 : Quantiles de la distribution du nombre de forfaits journaliers par assuré

En choisissant le 95^{ème} quantile de la répartition, les assurés ayant connu plus de 8 jours d'hospitalisation sont mis en retrait. Cela représente au total 2860 assurés, soit 4,6% des assurés ayant déclaré au moins un forfait journalier sur la période.

Comme son nom l'indique, le forfait journalier est enregistré pour chaque jour passé à l'hôpital. Par conséquent, un assuré ayant été hospitalisé durant une semaine ouvrée aura cinq lignes de prestations dans le datamart. Pour éviter d'introduire un tel biais sur la fréquence d'hospitalisation, il convient d'identifier au mieux les dates d'entrée et de sortie de chaque hospitalisation. Cet exercice n'est pas évident, car il peut apparaître des sauts réguliers de quelques jours sur une période donnée. Ces observations sont probablement liées à des assurés qui doivent se rendre régulièrement à l'hôpital pour recevoir un traitement (mise sous dialyse, IRM) et ne sont, par conséquent, pas conservées.

Finalement, 79,8% des assurés ont connu un seul séjour à l'hôpital, le maximum étant six périodes d'hospitalisation, ce qui semble convenable pour la suite.

La répartition du nombre hebdomadaire d'assurés hospitalisés connaît également une surdispersion à droite. La variance étant nettement supérieure à la moyenne des observations, l'hypothèse d'une loi binomiale négative pour la réponse peut être faite à nouveau.

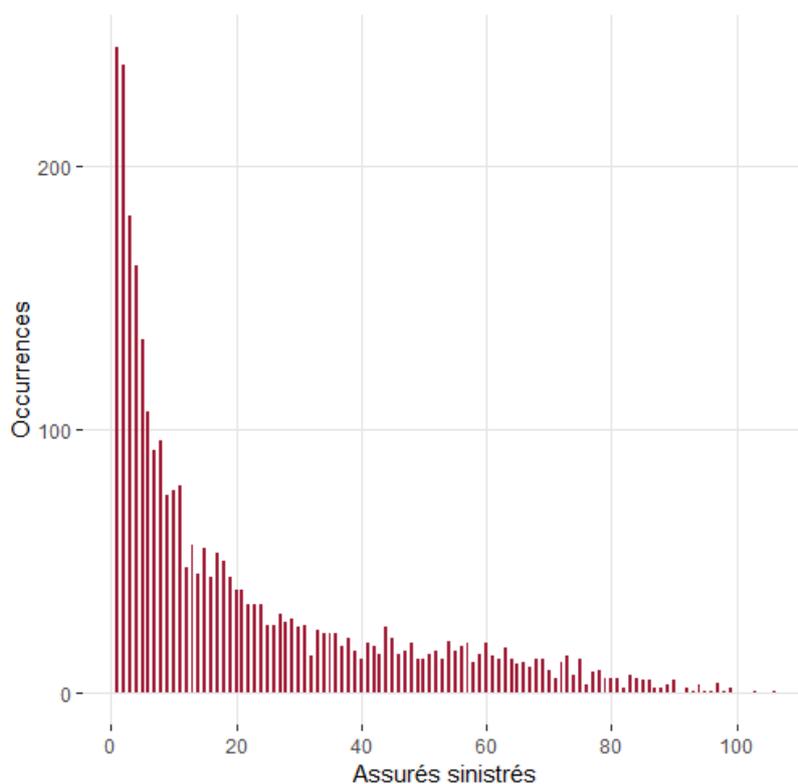


Figure II.3.13 : Histogramme du nombre d'assurés hebdomadaire déclarant une hospitalisation

En tenant compte des critères d'ajustement et de performance, le modèle retenu pour chaque loi est :

| X | Poisson (modèle complet) | | | BN (modèle complet) $\theta = 34,9$ | | |
|---------------------------|--------------------------|----------|--------------------|--|----------|---------------------|
| | Coefficient | Valeur-p | IC (95%) | Coefficient | Valeur-p | IC (95%) |
| Intercept | -7,315556 | < 2e-16 | [-7,40 ; -7,23] | -7,312113 | < 2e-16 | [-7,42 ; -7,21] |
| GenreF | -0,217266 | < 2e-16 | [-0,23 ; -0,20] | -0,198334 | < 2e-16 | [-0,21 ; -0,18] |
| Cat_age[0,12] | 0,009314 | 0,7447 | [-0,038 ; 0,056] | 0,014872 | 0,61416 | [-0,034 ; 0,063] |
| Cat_age[41,64] | 0,890095 | < 2e-16 | [0,86 ; 0,92] | 0,891592 | < 2e-16 | [0,86 ; 0,92] |
| Cat_age65+ | 1,906617 | < 2e-16 | [1,88 ; 1,93] | 1,908749 | < 2e-16 | [1,88 ; 1,93] |
| GroupeRegionIle-de-France | -0,020709 | 0,1359 | [-0,044 ; 0,0021] | -0,026555 | 0,10940 | [-0,054 ; 0,00070] |
| GroupeRegionNord | 0,246228 | < 2e-16 | [0,23 ; 0,27] | 0,238905 | < 2e-16 | [0,21 ; 0,27] |
| GroupeRegionOuest | 0,185035 | < 2e-16 | [0,17 ; 0,20] | 0,185252 | < 2e-16 | [0,16 ; 0,21] |
| GroupeRegionSud | 0,144000 | < 2e-16 | [0,12 ; 0,17] | 0,147081 | < 2e-16 | [0,12 ; 0,17] |
| Annee2017 | -0,079913 | 1,47e-08 | [-0,10 ; -0,06] | -0,077915 | 1,79e-05 | [-0,11 ; -0,048] |
| Annee2018 | -0,107306 | 2,19e-13 | [-0,13 ; -0,083] | -0,108203 | 8,59e-09 | [-0,14 ; -0,077] |
| Annee2019 | -0,143913 | < 2e-16 | [-0,17 ; -0,12] | -0,142977 | 6,41e-14 | [-0,17 ; -0,11] |
| Annee2020 | -0,229521 | < 2e-16 | [-0,25 ; -0,20] | -0,235169 | < 2e-16 | [-0,27 ; -0,20] |
| Annee2021 | -0,329724 | < 2e-16 | [-0,36 ; -0,30] | -0,328699 | < 2e-16 | [-0,36 ; -0,30] |
| Annee2022 | -0,378945 | < 2e-16 | [-0,41 ; -0,35] | -0,376646 | < 2e-16 | [-0,41 ; -0,34] |
| Annee2023 | -0,405347 | < 2e-16 | [-0,43 ; -0,38] | -0,409500 | < 2e-16 | [-0,44 ; -0,38] |
| IBM_sev_semaine | -0,003711 | 0,0012 | [-0,056 ; -0,0018] | -0,003988 | 0,00558 | [-0,0063 ; -0,0016] |

Table II.3.7 : Valeur, significativité et intervalle de confiance des coefficients (pour les MLG Poisson et BN)

| Variables | Modèles (Poisson) | | Modèles (BN) | |
|---|-------------------------------|-----------|-------------------------------|-----------|
| | Critère empirique de déviance | AIC | Critère empirique de déviance | AIC |
| (Intercept) + Genre + Cat_age + GroupeRegion + Annee + IBM_sum_week | 1,34 | 17 000,23 | 1,00 | 16 815,18 |
| (Intercept) + Genre + Cat_age + GroupeRegion + IBM_sev_semaine | 1,75 | 18 250,48 | 0,99 | 17 463,41 |
| (Intercept) + Genre + Cat_age + IBM_sev_semaine | 1,97 | 18 885,17 | 1,00 | 17 724,85 |
| (Intercept) + Genre + IBM_sev_semaine | 13,34 | 53 305,65 | 1,06 | 23 070,73 |
| (Intercept) + IBM_sev_semaine | 13,51 | 53 829,18 | 1,06 | 23 106,17 |

Table II.3.8 : Critères d'ajustement et de performance des modèles fréquentiels testés (pour les hospitalisations)

Plusieurs remarques peuvent être faites :

- selon les critères de déviance et d'AIC, le modèle le plus performant et avec un ajustement convenable est le modèle de régression binomiale négative complet ;
- le coefficient associé à la catégorie d'âge des 65 ans et plus est significatif et positif. Cela montre bien qu'en moyenne, les personnes âgées sont plus présentes parmi les personnes hospitalisées que les jeunes actifs ;

- le coefficient d'intérêt associé à l'indicateur biométéorologique est négatif et significatif. Cela peut paraître contre-intuitif et révèle quelques limites de l'étude notamment sur trois points :
 - malgré les restrictions préliminaires de l'étude sur la période et les assurés conservés, l'impossibilité de différencier les hospitalisations programmées des hospitalisations non programmées et, *a fortiori*, des hospitalisations liées par exemple aux PLC, demeure ; une hypothèse est qu'un effet probable de l'IBM sur les hospitalisations peut être largement compensé par les fluctuations récurrentes du nombre d'assurés sinistrés. En effet, la période des températures les plus élevées coïncidant avec une baisse de l'activité, il se peut que les deux effets se compensent ;
 - le modèle s'appuie sur une faible puissance statistique, ce qui permet difficilement de percevoir l'impact des fortes chaleurs. A titre de comparaison, les bulletins de santé publique France évaluent statistiquement une hausse des hospitalisations liées aux PLC à quelques centaines de personnes à l'échelle nationale ;
 - toutes les hospitalisations ont été considérées, et non uniquement celles qui suivent un passage aux urgences. Cela est voulu, car, tout d'abord, il est possible qu'un assuré se fasse directement hospitaliser (par exemple, suite à une mauvaise chute après un malaise lié à une PLC). Par ailleurs, le nombre d'observations correspondant à des hospitalisations faisant suite à un passage aux urgences est faible (plusieurs centaines sur toute la période) et ne permet donc pas d'isoler ces cas spécifiques.

3.7. Conclusion et limites de l'étude

La recherche et la quantification d'un lien entre la chaleur (identifié avec l'indicateur biométéorologique de sévérité) et le risque de passages aux urgences et d'hospitalisation sur un échantillon d'assurés de SwissLife, a mené à deux résultats distincts issus de l'application d'un modèle linéaire généralisé aux observations.

Une corrélation positive et significative entre le nombre hebdomadaire d'assurés passant aux urgences et la chaleur a été clairement identifiée pour les années de survenance 2016 à 2023. Toutefois, un résultat contraire a été relevé pour les hospitalisations avec l'obtention d'une corrélation négative.

L'étude présente des résultats qu'il convient de nuancer pour plusieurs raisons :

- le motif du sinistre n'est pas mentionné dans les bases de données internes de l'entreprise pour des raisons de confidentialité. Par conséquent, la corrélation est établie mais l'étude ne permet pas de conclure quant à la causalité ;
- la modélisation a été réalisée sur les huit dernières années et concerne un échantillon d'assurés ayant un contrat de santé individuelle. Bien que ces dernières années ont connu maintes vagues de chaleur, les coefficients de régression évalués peuvent sensiblement varier dans le scénario où les assurés seront soumis à des températures extrêmes encore méconnues.

Partie III – Étude de cas : Portefeuille SwissLife Santé Retraités

Chapitre 1 : Portefeuille SwissLife Santé Retraités

La recherche d'une corrélation entre l'indicateur biométéorologique et le risque PaU-H menée dans la partie précédente a mis en exergue les possibilités et limites de l'étude avec les données internes. Par ailleurs, elle s'est intéressée à l'intégralité du portefeuille Standard. Cette partie se concentre sur un produit phare du portefeuille, dans l'objectif final d'apporter une vision prospective de la sinistralité en intégrant un facteur de température.

1.1. Présentation générale du portefeuille

SwissLife Santé Retraités (SLSR) est un produit d'assurance complémentaire santé ciblant les particuliers retraités et les actifs ayant fait l'objet d'un contrat collectif SwissLife et liquidé leurs droits à la retraite. Par ailleurs, lors de la prise d'effet du contrat, les assurés et ayants droit rattachés au contrat doivent être âgés entre 55 et 85 ans.

Le produit répond au critère « responsable » et se décompose selon huit formules linéaires de garanties modulables avec une possibilité de rajouter un module de personnalisation pour des garanties spécifiques telles que la médecine douce ou la pharmacie non remboursée, sous condition d'un an d'ancienneté. Il est commercialisé depuis 2013 et fut mis à jour le 1^{er} juin 2018.

Chaque formule propose des garanties pour les principaux postes en santé, à savoir l'hospitalisation, le dentaire, l'optique, les soins courants, la pharmacie et l'audiologie. Un service assistance est également possible. Le produit est conforme à la réforme 100% santé. En hospitalisation, le forfait journalier est par exemple remboursé intégralement dans chaque formule, et ce, pour une durée illimitée. La garantie forfaitaire d'une chambre particulière n'est possible qu'à partir de la quatrième formule, celle pour les frais de télévision, dès la deuxième.

1.2. Zoom sur une population d'assurés SLSR

Afin de disposer d'un échantillon récent, les contrats toujours en cours au 1^{er} janvier 2024 et ayant pris effet avant le 1^{er} janvier 2023 sont conservés. La même condition de présence est appliquée aux assurés et ayants droit, certains étant sortis entretemps. Cela permet d'obtenir une base de 83 150 assurés répartis selon 64 338 contrats individuels. Les variables récupérées décrivant les assurés sont :

- le genre ;
- la date de naissance ;
- le département de résidence.

Ces données, identiques à celles récupérées en Partie II, serviront à comprendre la population récente du portefeuille ainsi que, dans un second temps, celle lors des projections.

Le tableau ci-dessous résume la règle de sélection des contrats SLSR :

| Ensemble | Contrats récupérés |
|--|--------------------|
| Contrats individuels avec une date d'effet antérieure au 1 ^{er} janvier 2023 et toujours en cours | 287 170 |
| pour le produit SLSR | 65 270 |
| avec une date d'adhésion des assurés antérieure au 1 ^{er} janvier 2023 | 65 253 |
| avec les assurés résidant sur le territoire métropolitain et disponibilité des caractéristiques (âge et genre) | 64 338 |

Table III.1.1 : Détail de la sélection des contrats SLSR

1.3. Analyse descriptive de l'échantillon d'assurés SLSR

Les contrats individuels du produit SLSR sont des contrats qui impliquent par leurs conditions de souscription (liquidation des droits à la retraite, âge) peu d'ayants droit. Par conséquent, un contrat inclut généralement son souscripteur et, éventuellement, un conjoint retraité.

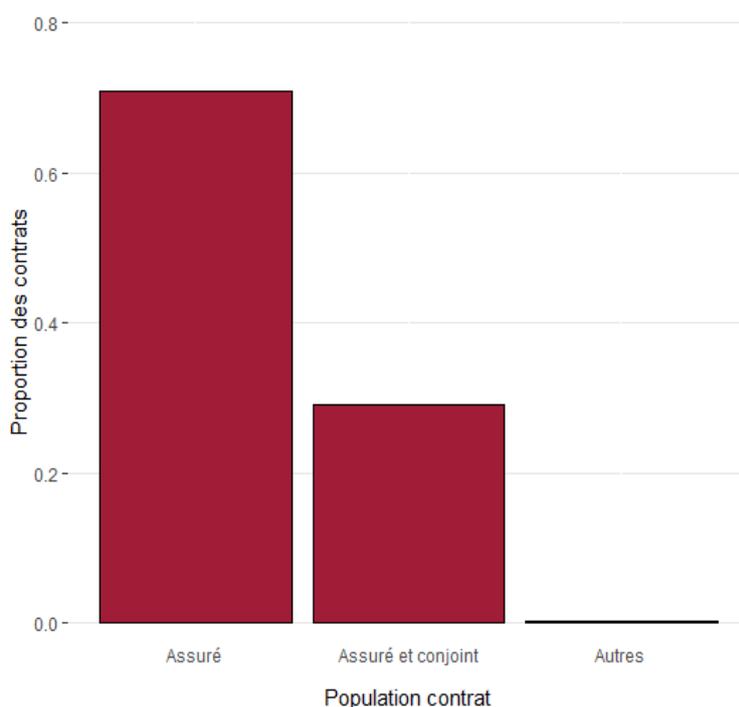


Figure III.1.1 : Population de l'échantillon de contrats SLSR

Ainsi, plus de 70% des contrats ne possèdent qu'un assuré.

En outre, la représentation de la répartition des femmes et des hommes permet de noter une prépondérance des femmes dans l'échantillon.

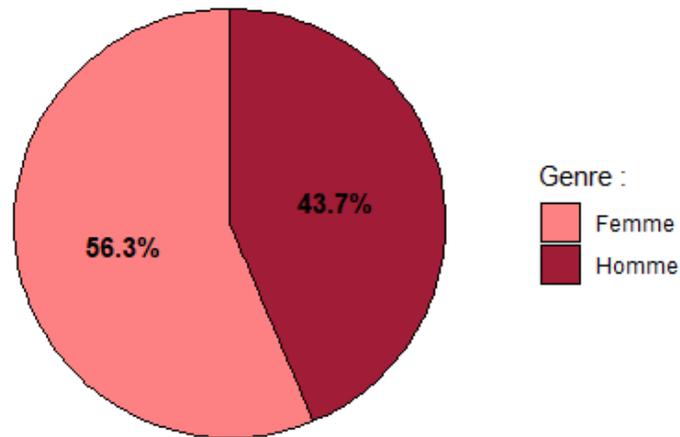


Figure III.1.2 : Répartition F/H dans l'échantillon

Cette hétérogénéité est importante à prendre en compte, car il avait été relevé dans la partie précédente, à la fois dans la littérature et dans la modélisation, un risque en moyenne plus important pour les hommes, notamment à un âge avancé, et probablement en raison de leurs habitudes de vie différentes de celles des femmes. Toutefois, les femmes seraient plus sensibles à la chaleur.

Les assurés étant des retraités, l'âge moyen est de 70,9 ans pour les femmes et 71,2 ans pour les hommes. La répartition des âges corrigés des effectifs pour chaque sexe est assez symétrique :

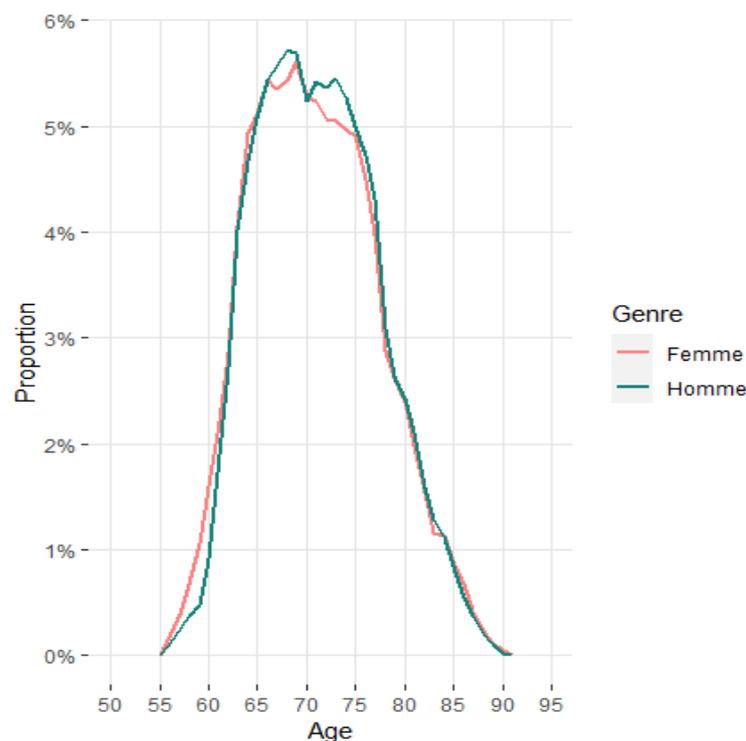


Figure III.1.3 : Répartition de l'âge par sexe dans l'échantillon

Les écarts de proportion les plus notables sont visibles dans les plus jeunes âges (entre 55 et 62 ans) et aux alentours de l'âge moyen. En s'intéressant aux contrats où l'assuré et le conjoint sont tous les deux présents, l'âge moyen des femmes est inférieur à celui des hommes. Une hypothèse possible est l'observation récurrente d'une différence d'âge dans les couples où la femme est plus jeune, bien que cela soit de moins en moins le cas [INSEE, 2016]. Au contraire, quand l'assuré est seul dans le contrat, l'âge moyen des femmes est supérieur à celui des hommes.

Les assurés présents sur le territoire métropolitain sont répartis de manière hétérogène avec une concentration importante dans les Hauts-de-France (13 825), en Auvergne-Rhône-Alpes (9 643) et en Provence-Alpes-Côte d'Azur (8 618). La présence importante d'assurés dans le nord de la France correspond à la tendance des activités de souscription menées par SwissLife, fortement implantée dans cette région.

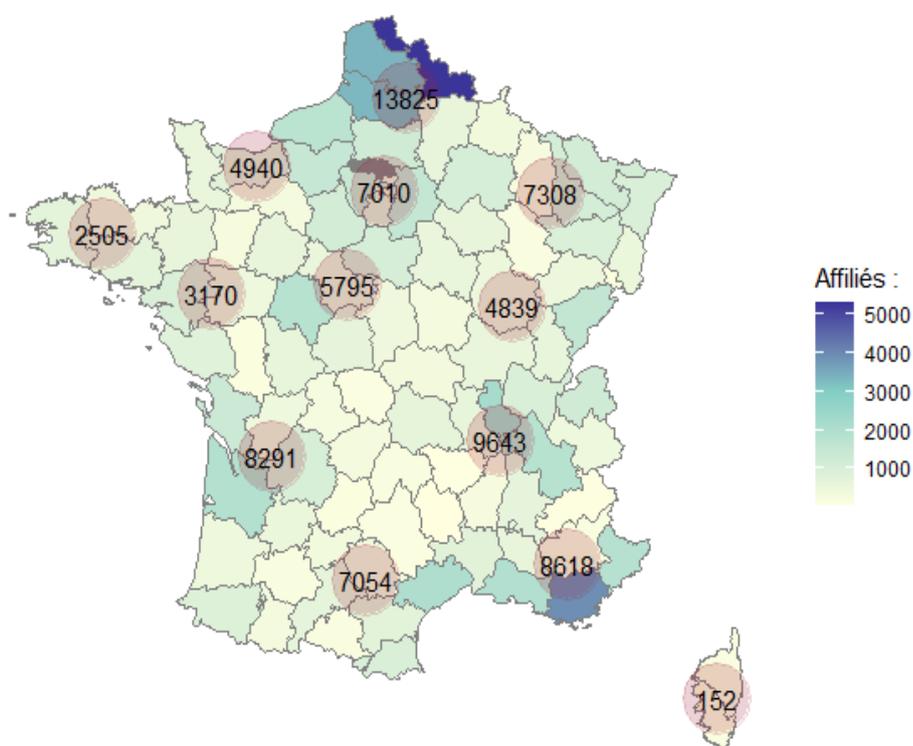


Figure III.1.4 : Répartition des assurés de l'échantillon sur le territoire métropolitain

Il peut être néanmoins noté que des assurés sont présents dans chaque département de France à l'exception du Val-d'Oise (95).

1.4. Analyse de la sinistralité de l'échantillon pour la survenance 2023

L'analyse suivante vise à apporter quelques éléments explicatifs sur la sinistralité de la survenance 2023 relevée pour l'échantillon. Par ailleurs, elle se veut complémentaire à la description de l'échantillon des assurés et permet de dégager quelques tendances de consommation. Dans le cadre du mémoire, l'étude se limite au poste de garanties en hospitalisation. Enfin, seules les lignes de prestation avec un remboursement strictement

positif par SLPS ont été conservées. Cela permet d'aboutir à 118 006 lignes de prestations sur l'année.

1.4.1. Population sinistrée

Sur l'échantillon, 25 508 assurés, soit 30,7% de la population, ont déclaré un sinistre dans l'année. Tout d'abord, la répartition des hommes et des femmes sinistrés sur l'année peut être représentée derechef :

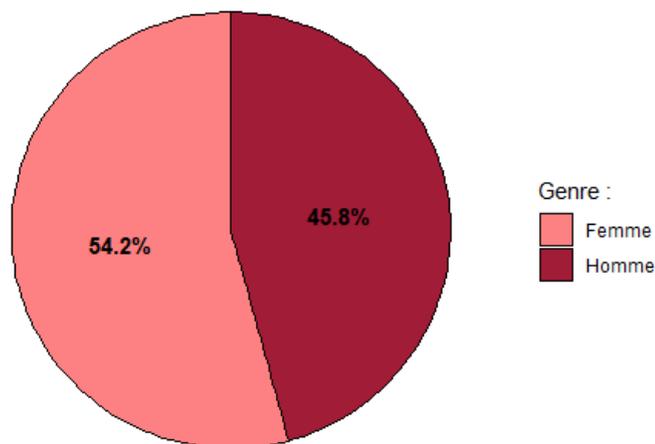


Figure III.1.5 : Répartition F/H des assurés sinistrés

Par rapport à la population assurée, il peut être observé une proportion plus importante (+2,1 points) d'hommes ayant bénéficié d'une garantie hospitalisation. Ceci est assez cohérent avec les constatations faites précédemment sur la tendance à la consommation, plus importante pour les hommes.

De surcroît, l'âge moyen des sinistrés est sensiblement différent de celui de la population assurée. En effet, il s'établit à 71,8 ans pour les femmes et 72 ans pour les hommes, soit environ 1 an supplémentaire. Une explication est la nécessité des prestations hospitalières toujours croissante avec l'âge, du fait de l'apparition progressive de problèmes de santé qui sont susceptibles de requérir des soins. Cet âge moyen est encore plus important (72,7 ans pour les hommes et femmes) en pondérant par le nombre de lignes de prestations. Enfin, les soins surviennent généralement plus tard dans la vie pour les femmes.

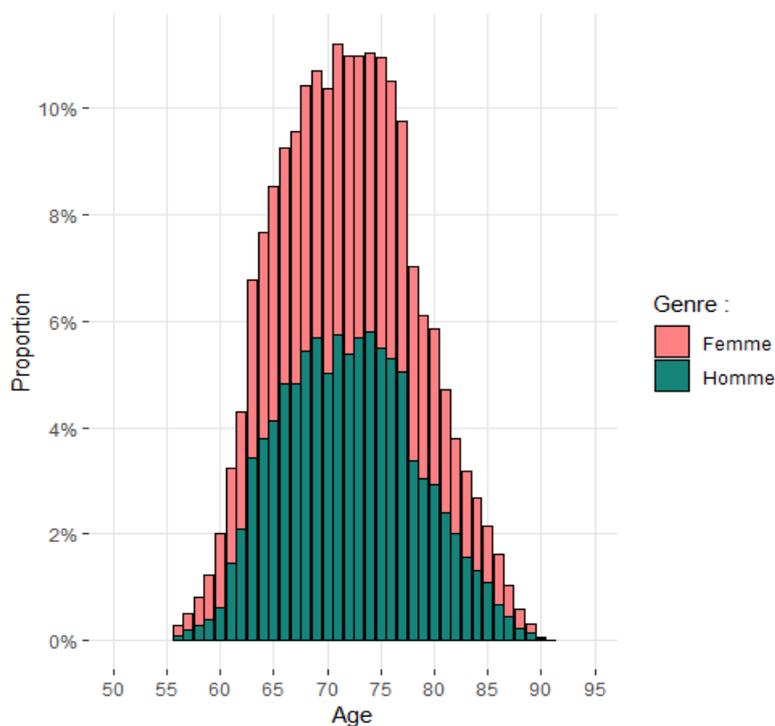


Figure III.1.6 : Répartition de l'âge par sexe pour les assurés ayant déclaré au moins une prestation

Sous l'angle géographique, les départements avec la proportion d'assurés sinistrés en 2023 la plus importante sont les Hautes-Alpes (44,2%), la Lozère (41%) et le Cantal (40,2%), et ceux avec la plus faible sont la Moselle (18,8%), le Haut-Rhin (17,2%) et le Bas-Rhin (16,9%), trois départements adjacents du Grand Est. Néanmoins, ces départements couvrent tous une faible population (de 50 à moins de 250 personnes) et sont donc sujets à une importante variabilité. En moyenne (pondérée par le nombre de personnes assurées), la proportion d'assurés sinistrés en 2023 s'établit à 31% par département.

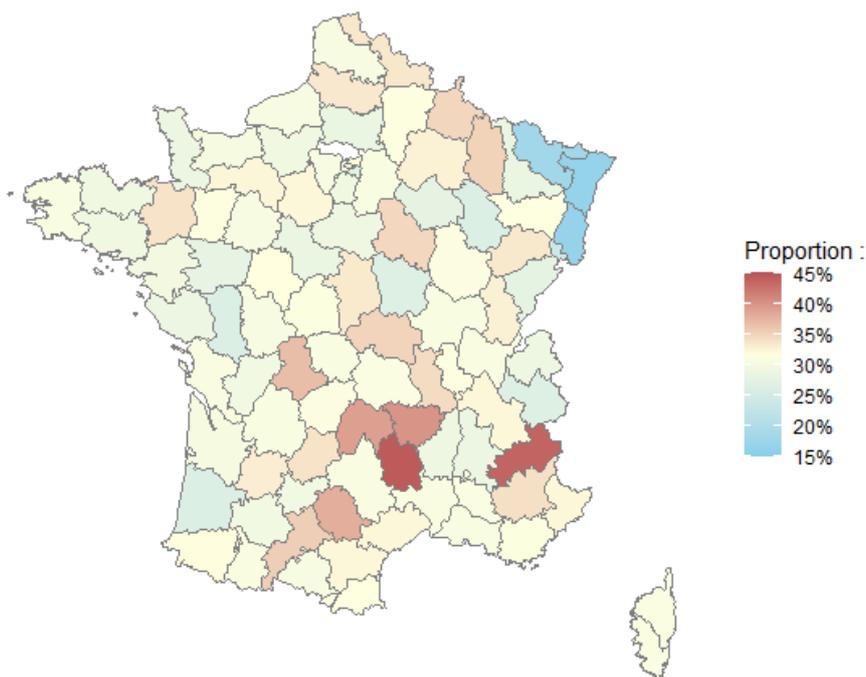


Figure III.1.7 : Proportion d'assurés sinistrés par département

Il est également intéressant de regarder la fréquence moyenne des actes, ainsi que le coût moyen engagé par les assurés dans chaque département.

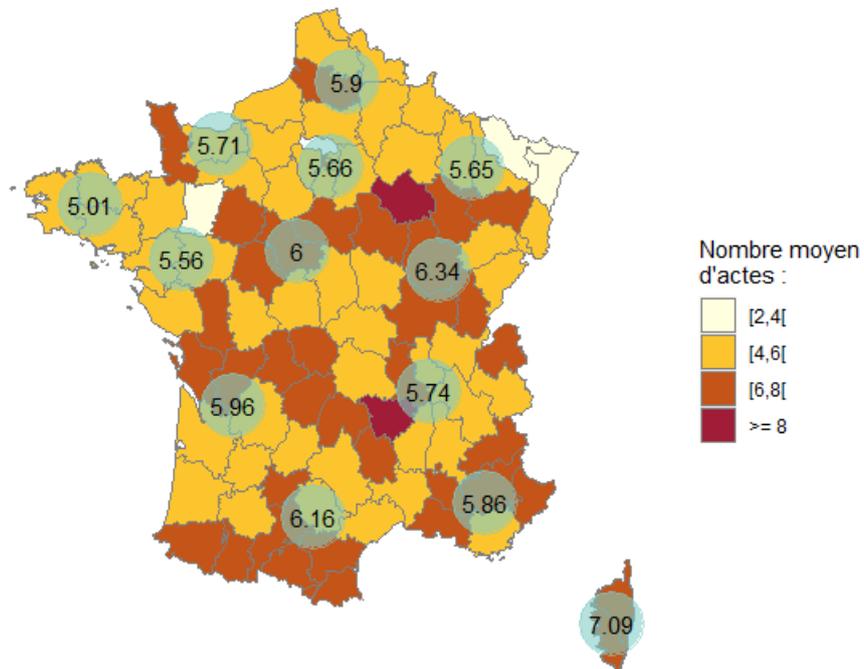


Figure III.1.8 : Fréquence moyenne des actes hospitaliers par département

Le nombre moyen d'actes par région est d'environ 6 et est assez stable, à l'exception de la Corse ou de la Bretagne. Il est important de noter que le forfait journalier est considéré comme un acte à part entière et peut être influent sur le nombre d'actes, sachant qu'il est à la charge de l'assuré pour chaque jour d'hospitalisation. Le transport joue aussi un rôle important dans la fréquence. En outre, 28 assurés totalisent chacun plus de cent actes sur 2023. Finalement, près de 20% des assurés n'ont déclaré qu'une seule prestation et 73,7% moins de 7 actes, comme peut l'attester la distribution ci-dessous :

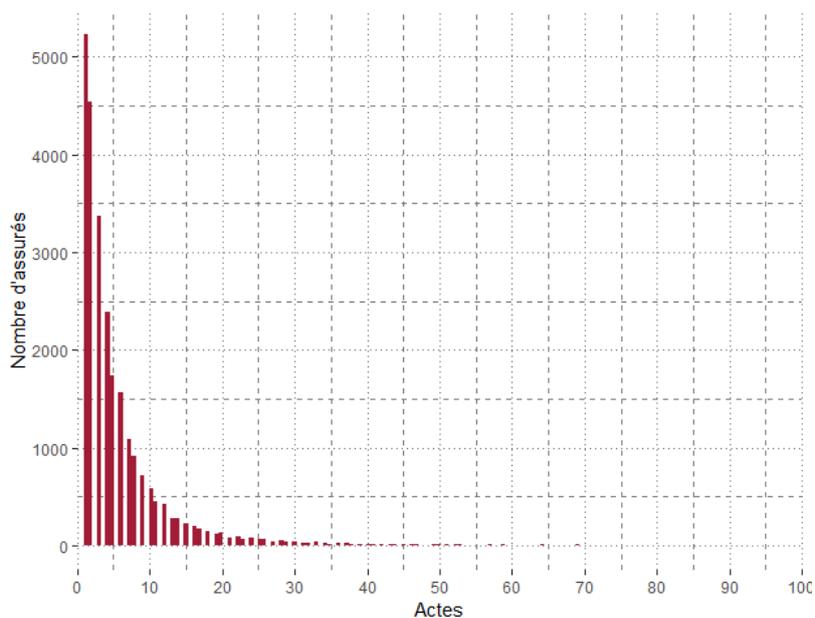


Figure III.1.9 : Distribution du nombre d'actes

Quant au coût moyen pour la survenance 2023, il est de 585,11€ par assuré. En revanche, la variabilité du coût par assuré est considérable (de quelques euros à plusieurs dizaines de milliers d'euros) et s'explique par une grande amplitude en besoins de soins. En effet, certaines personnes n'ont déclaré qu'un forfait patient urgences tandis que d'autres sont gravement hospitalisés sur la période et disposent de garanties sur la chambre particulière et les frais de télévision par exemple.

Au niveau départemental, ce coût moyen varie entre 250€ et 900€, à l'exception des départements des Hautes-Alpes (1150€) et de Lozère (2331€) qui accueillent peu d'assurés, et dont plusieurs ont reçu des remboursements conséquents.

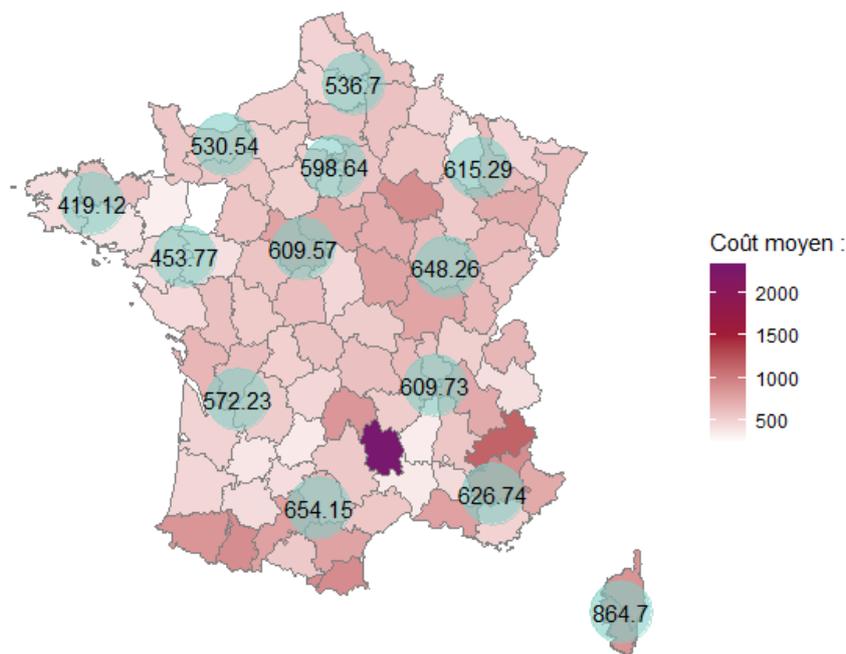


Figure III.1.10 : Coût moyen par département/région

1.4.2. Zoom sur les garanties

Les regroupements de garanties sont les mêmes qu'en Partie II.

Pour le forfait patient urgences, plusieurs pics de sinistralité sont constatés sur l'année, le premier se produisant en février, probablement suite à la recrudescence de l'épisode grippal de 2022-2023 à ce moment-là. Un plateau est constaté en juin et début juillet. Une explication possible est l'épisode persistant de chaleur que le nord du pays a notamment connu. En effet, juin 2023 fut le deuxième mois de juin le plus chaud depuis 1900, avec des écarts moyens à la normale de 2°C à 4°C. un autre pic est relevé fin août 2023 et peut être également en lien avec la canicule tardive qui a touché 48% de la population. Santé publique France a d'ailleurs relevé un pic de recours aux soins d'urgence le 23 août 2023 avec plus de 250 passages pour l'indicateur iCanicule contre environ moins de 100 hors canicule.

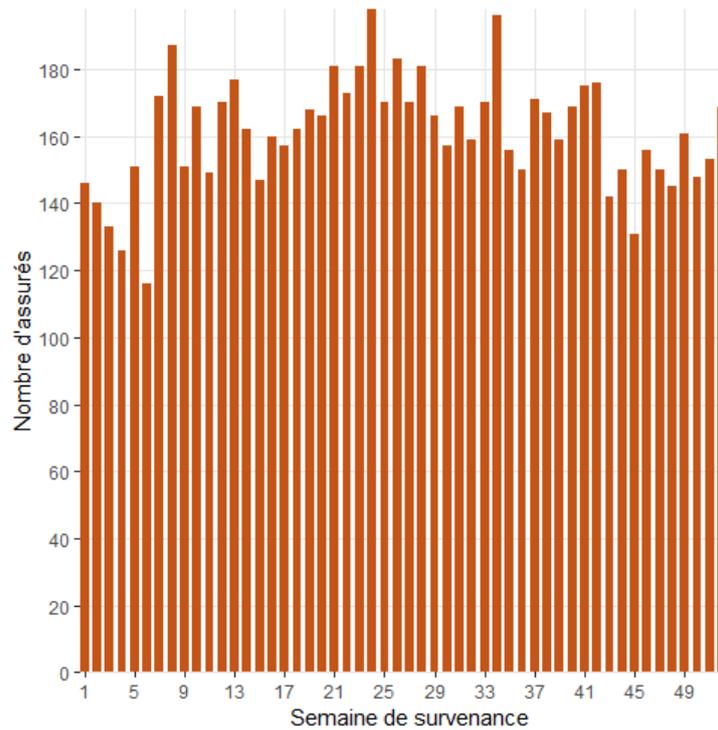


Figure III.1.11 : Assurés ayant eu un remboursement du FPU

Enfin, pour les autres garanties concernant notamment l'hospitalisation, la sinistralité sur l'année en nombre d'assurés se présente comme suit :

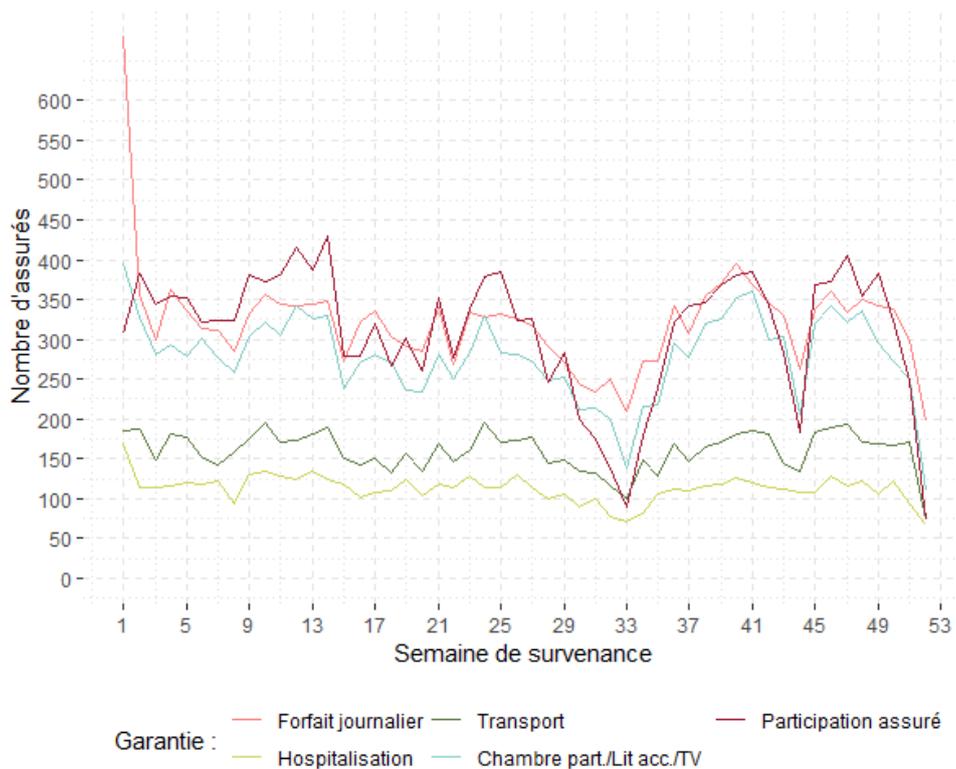


Figure III.1.12 : Remboursement de garanties en nombre d'assurés

La garantie sur le transport médical est stable sur l'année. Toutefois, il peut être noté pour ce dernier, ainsi que le forfait journalier et les garanties de confort (chambre particulière, frais de télévision), un saut conséquent la première semaine de janvier, certainement lié à la grippe saisonnière de 2022-2023 qui a connu un pic fin décembre 2022-début janvier 2023. Une hausse pour ces mêmes garanties est relevée en février lors du deuxième pic de l'épidémie de grippe saisonnière, moins importante cette fois. Il faut ensuite attendre le mois de juin pour observer une recrudescence du nombre d'assurés ayant bénéficié d'un remboursement de garanties d'hospitalisation. Un creux est particulièrement notable en août et peut être expliqué par la période de relâche des services hospitaliers.

La durée moyenne de l'utilisation de chaque garantie peut aussi être précisée. Pour simplifier, chaque durée correspond à l'utilisation consécutive de ces garanties, comme il fut réalisé lors de la recherche du lien entre la chaleur et le risque PaU-H. Ainsi, la durée moyenne de l'utilisation du forfait journalier est d'environ 11 jours, tandis que celle pour le transport est de 1,2 jours. Pour les hospitalisations, la variance est importante. En effet, elles peuvent s'étendre sur l'année complète comme ne durer qu'un jour. Le transport est généralement emprunté pour un, voire deux jours (aller et retour sur la journée ou le lendemain, par exemple). La durée moyenne pour les frais liés à l'hospitalisation est inférieure à celle du forfait hospitalier (6,6 jours). Cela peut s'expliquer par la possibilité de prise en charge intégrale de ces frais par l'Assurance maladie au bout du 31^{ème} jour consécutif d'hospitalisation, ce qui peut provoquer une censure à droite.

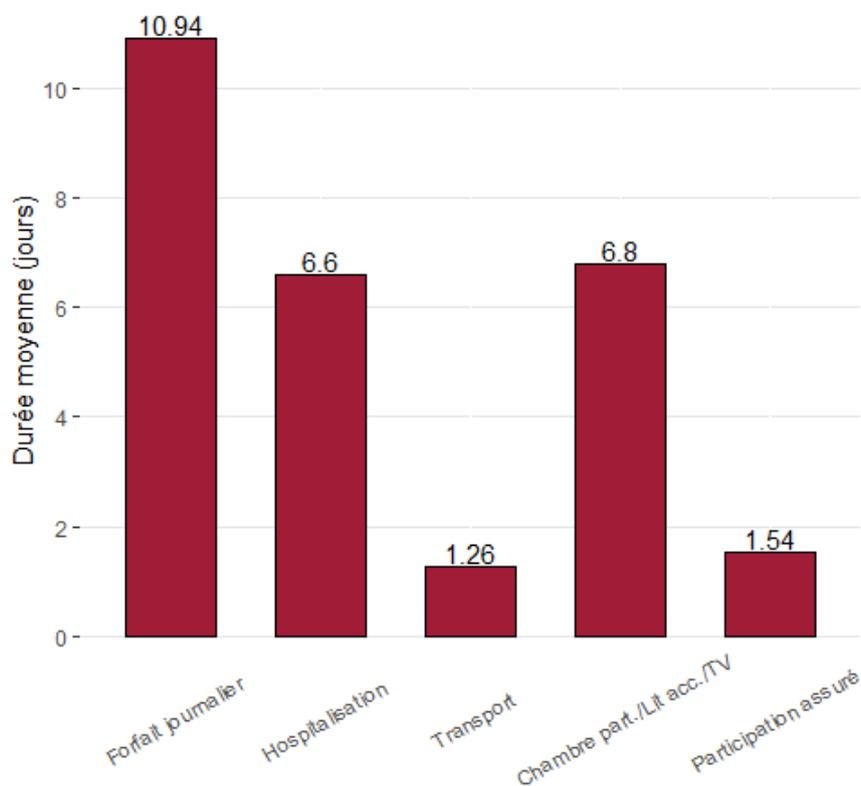


Figure III.1.13 : Durée moyenne d'utilisation des garanties (hors FPU)

Chapitre 2 : Quantification du lien entre la chaleur et le risque de passage aux urgences

Afin d'obtenir une relation la plus fidèle au comportement des assurés du produit, une seconde quantification est menée pour le risque de passage aux urgences.

2.1. Données de l'étude

Afin d'avoir suffisamment d'historique, les assurés SLSR et leurs prestations sont récupérés pour les survenances 2016 à 2023. Les mêmes conditions qu'en Partie II leur sont appliquées, à savoir une date d'adhésion et d'effet du contrat avant le 1^{er} mai et une date de sortie ou de résiliation après le 30 septembre pour une année donnée. Cela permet d'obtenir un nombre de lignes par survenance, toutes garanties confondues, entre mai et septembre, dont le récapitulatif se trouve ci-dessous :

| Année de survenance | Lignes de sinistres | Personnes sinistrées | Personnes présentes | Population sinistrée |
|---------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| 2016 | 12 659 | 3 655 | 27 809 | 13,14% |
| 2017 | 15 224 | 4 255 | 31 995 | 13,30% |
| 2018 | 18 706 | 4 905 | 36 159 | 13,57% |
| 2019 | 21 885 | 5 848 | 42 033 | 13,91% |
| 2020 | 23 266 | 6 402 | 48 417 | 13,22% |
| 2021 | 28 914 | 7 900 | 57 270 | 13,79% |
| 2022 | 37 627 | 10 543 | 70 422 | 14,97% |
| 2023 | 55 456 | 15 285 | 100 307 | 15,24% |

Table III.2.1 : Observations disponibles et personnes assurées pour le produit SLSR et par année de survenance

Ce tableau montre le développement notable du portefeuille ces dernières années. Par ailleurs, une remarque peut être faite sur les années 2022 et 2023 qui ont été celles avec la proportion d'assurés sinistrés la plus importante.

2.2. Modélisation du lien pour le risque de passage aux urgences

2.2.1. Modèle complet

Les assurés sont décrits par les variables présentées en Partie II. Pour rappel, il s'agit du genre, de la zone géographique de résidence et de l'âge. Comme le produit cible une population spécifique, à savoir des personnes retraitées, deux catégories d'âge ont été créées :

- les personnes âgées entre 55 et 74 ans ;
- les personnes âgées de plus de 75 ans.

La première catégorie constitue celle de référence. La seconde jouera le rôle d'un facteur de risque. Dans la littérature, le seuil de définition est parfois choisi à 65 ans [Santé publique France, 2014]. L'intérêt d'un seuil de 75 ans est de conserver des intervalles d'âge dans le

portefeuille avec une distance similaire (environ 20 ans). Par ailleurs, avec ce seuil, la catégorie de référence souhaitée possède une population plus importante.

Ainsi, pour le produit SLSR, il est intéressant de supposer une interaction supplémentaire entre l'âge et l'indicateur biométéorologique de sévérité. En effet, dans le cadre d'une vision prospective, il n'est pas impossible que les jeunes retraités conservent leur contrat après l'âge de 75 ans, basculant ainsi dans la catégorie traduisant un facteur de risque supplémentaire. En outre, cette interaction a été relevée dans le cadre des études sur la mortalité et peut donc être plausible en ce qui concerne les passages aux urgences.

En s'intéressant à nouveau au nombre hebdomadaire d'assurés ayant eu un passage aux urgences, et cette fois-ci issus du portefeuille SLSR, le modèle linéaire généralisé initial testé est le modèle complet dont l'expression explicite est la suivante pour une observation i :

$$g\left(\frac{\mu_i}{n_i}\right) = \beta_0 + \beta_{Femme}x_{Femme} + \beta_{75+}x_{75+} + \sum_{k \in Region \setminus \{Est\}} \beta_k x_k + \sum_{k \in \{2017, 2023\}} \beta_k x_k + \beta_{IBM_{sev_{heb}}} x_{IBM_{sev_{heb}}} + \beta_{75+*IBM_{sev_{heb}}} x_{75+*IBM_{sev_{heb}}}$$

avec des indicatrices pour les variables de genre, de catégorie d'âge, de région et d'année de survenance. n_i désigne le nombre de personnes exposées pour l'observation i .

2.2.2. Hypothèse sur la loi suivie par la variable réponse

La distribution de la variable réponse est la suivante :

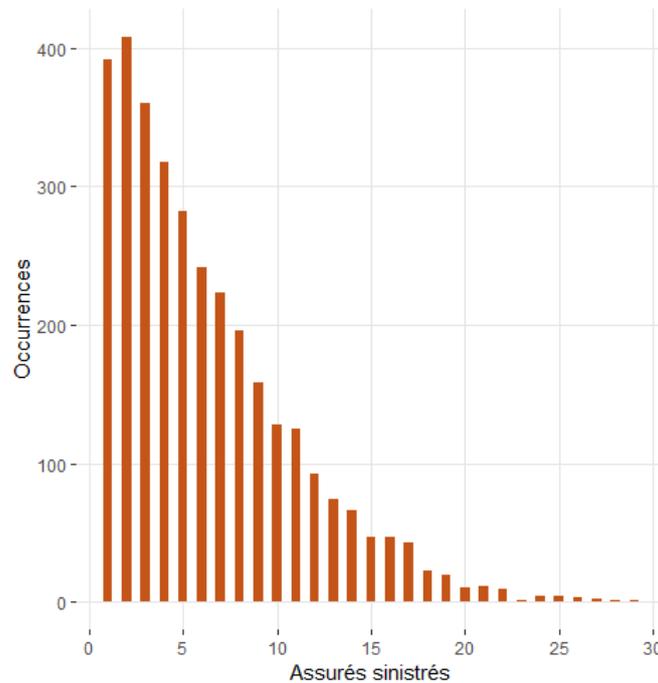


Figure III.2.1 : Histogramme du nombre d'assurés SLSR hebdomadaire déclarant un passage aux urgences

Bien que l'effet de surdispersion soit nettement plus faible qu'il fut constaté en Partie II, il reste néanmoins présent. Par conséquent, il est préférable et prudent de retenir un modèle avec une loi binomiale négative pour la réponse afin d'éviter d'obtenir des intervalles de confiance trop étroits, du fait d'une sous-estimation de la variance des estimateurs.

2.2.3. Validation du premier modèle complet

Avec un critère de déviance empirique égal à 0,94, le modèle est correctement ajusté. Une vérification supplémentaire peut être faite en regardant le quantile $\chi^2_{n-p-1;1-\alpha}$ et en le comparant à la déviance observée. Si cette dernière est supérieure au quantile, alors le modèle n'est pas convenable.

| D_{obs} | $\chi^2_{n-p-1;1-\alpha}$ |
|-----------|---------------------------|
| 3 093,943 | 3 411,289 |

Table III.2.3 : Déviance observée et quantile $\chi^2_{n-p-1;1-\alpha}$

Avec ces deux critères, le modèle est de bonne qualité.

Les résidus du modèle ont été représentés. Leur répartition semble graphiquement acceptable. Par conséquent, le modèle peut être retenu.

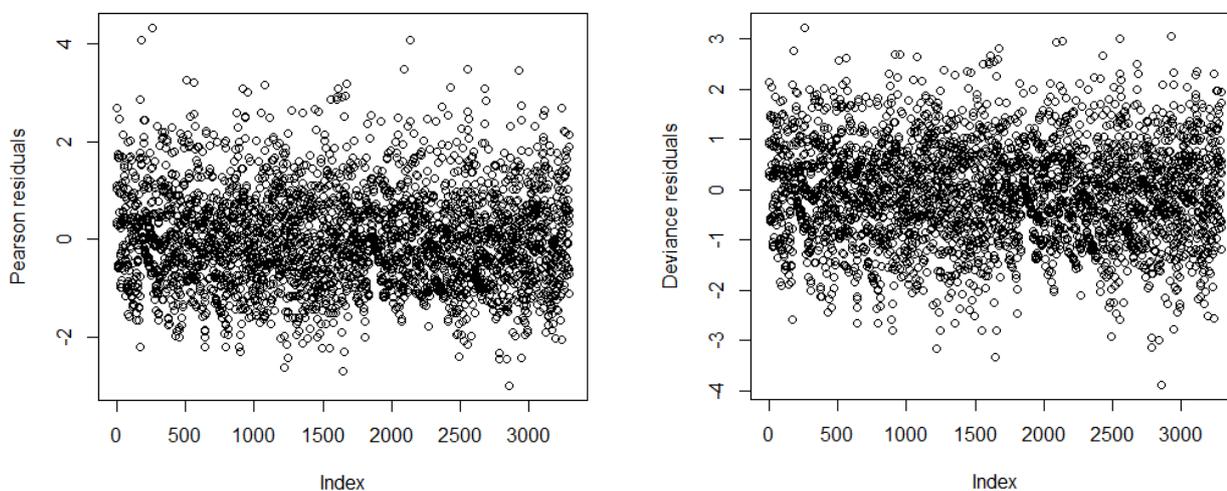


Figure III.2.2 : Résidus de déviance et de Pearson pour le modèle complet (SLSR)

Les résultats des estimations des coefficients de régression pour le modèle complet sont présentés ci-dessous. L'observation de référence est le groupe d'hommes âgés entre 55 et 74 ans, résidant dans la zone géographique Est et ayant été sinistré en 2016.

| | BN (modèle complet) | | |
|----------------------------|---------------------|----------|--------------------------|
| | $\theta = 498,6$ | | |
| X | Coefficient | Valeur-p | IC (95%) |
| Intercept | -6,616231 | < 2e-16 | [-6,7136 ; -6,5192] |
| GenreF | 0,080344 | 5,47e-09 | [0,057068 ; 0,103643] |
| GroupeRegionIle-de-France | 0,118529 | 1,59e-05 | [0,071869 ; 0,16485] |
| GroupeRegionNord | 0,121762 | 3,21e-10 | [0,089063 ; 0,15450] |
| GroupeRegionOuest | -0,033076 | 0,11269 | [-0,068436 ; 0,0022384] |
| GroupeRegionSud | -0,021709 | 0,31615 | [-0,058437 ; 0,014965] |
| Cat_age75+ | 0,145114 | 0,08925 | [0,00020460 ; 0,28967] |
| IBM_sev_semaine | 0,013191 | < 2e-16 | [0,010997 ; 0,015390] |
| Annee2017 | 0,134205 | 8,49e-05 | [0,076468 ; 0,19210] |
| Annee2018 | 0,168894 | 3,75e-07 | [0,11277 ; 0,22524] |
| Annee2019 | 0,212548 | 8,66e-11 | [0,15735 ; 0,26802] |
| Annee2020 | 0,182691 | 2,88e-08 | [0,12713 ; 0,23849] |
| Annee2021 | 0,273875 | < 2e-16 | [0,21872 ; 0,32928] |
| Annee2022 | 0,588271 | < 2e-16 | [0,53607 ; 0,64083] |
| Annee2023 | 0,803360 | < 2e-16 | [0,75272 ; 0,85441] |
| Cat_age75+*IBM_sev_semaine | -0,006342 | 0,00371 | [-0,010043 ; -0,0026377] |

Table III.2.2 : Valeur, significativité et intervalle de confiance des coefficients pour le modèle BN complet

En choisissant un seuil α de 5%, les coefficients associés à l'indicateur biométéorologique de sévérité ainsi qu'au croisement entre la catégorie d'âge et l'indicateur biométéorologique sont significatifs. En effet, ici encore, une corrélation positive est relevée entre l'IBM de sévérité et la réponse. Toutefois, il peut être noté le signe négatif du coefficient de la variable croisée. En d'autres termes, l'IBM contribuerait moins au nombre hebdomadaire d'assurés sinistrés pour la catégorie d'âge des 75 ans et plus. Une explication possible, basée sur les observations faites par Santé publique France, est que les assurés âgés de plus de 75 ans ont plus de chance de se faire hospitaliser directement en cas d'accident ou de pathologie. Par ailleurs, l'exonération du forfait patient urgences depuis 2022, en cas de passage aux urgences suivi d'une hospitalisation, permet également d'interpréter ce résultat au regard de l'hypothèse précédente.

Les coefficients associés aux zones géographiques de l'Ouest et du Sud ne sont pas significatifs devant la zone de référence (Est). Un regroupement de ces trois zones est fait par la suite pour tenter de diminuer la complexité du modèle et l'optimiser.

2.2.4. Validation du modèle avec regroupement

Tout d'abord, l'ajustement du second modèle reste convenable. Par ailleurs, afin de comparer la performance des deux modèles, le critère AIC est utilisé.

| Modèle | Déviance empirique | AIC |
|-------------------------------------|--------------------|-----------|
| Modèle sans regroupement (modèle 1) | 3 093,943 | 14 427,17 |
| Modèle avec regroupement (modèle 2) | 3 093,689 | 14 425,66 |

Table III.2.3 : Comparaison de la performance des modèles avec et sans regroupement

Du fait d'un nombre de paramètres plus faible, le second modèle est légèrement plus performant en se basant sur l'AIC, même si l'apport reste minime. Finalement, le modèle avec regroupement des zones géographiques Est, Ouest et Sud peut être conservé, étant plus parcimonieux. Les résultats sur les coefficients de régression, ainsi que leur intervalle de confiance à 95%, sont présentés ci-après :

| X | BN (modèle complet) | | |
|----------------------------|---------------------|----------|--------------------------|
| | $\theta = 467,1$ | | |
| | Coefficient | Valeur-p | IC (95%) |
| Intercept | -6,630304 | < 2e-16 | [-6,72604 ; -6,53493] |
| GenreF | 0,080354 | 1,41e-08 | [0,057066 ; 0,10367] |
| GroupeRegionIle-de-France | 0,135290 | 1,99e-07 | [0,092264 ; 0,17786] |
| GroupeRegionNord | 0,138206 | 2,47e-16 | [0,11044 ; 0,16592] |
| Cat_age75+ | 0,145642 | 0,097963 | [0,00065774 ; 0,29028] |
| IBM_sev_semaine | 0,013117 | < 2e-16 | [0,010966 ; 0,015272] |
| Annee2017 | 0,134390 | 0,000132 | [0,076629 ; 0,19231] |
| Annee2018 | 0,169134 | 7,56e-07 | [0,11299 ; 0,22550] |
| Annee2019 | 0,212660 | 2,64e-10 | [0,15742 ; 0,26815] |
| Annee2020 | 0,182875 | 6,61e-08 | [0,12729 ; 0,23869] |
| Annee2021 | 0,273951 | 3,67e-16 | [0,21878 ; 0,32938] |
| Annee2022 | 0,588662 | < 2e-16 | [0,53645 ; 0,64123] |
| Annee2023 | 0,803698 | < 2e-16 | [0,75305 ; 0,85476] |
| Cat_age75+*IBM_sev_semaine | -0,0063361 | 0,004725 | [-0,010064 ; -0,0026552] |

Table III.2.4 : Valeur, significativité et intervalle de confiance des coefficients pour le second modèle BN complet

En ce qui concerne l'interaction avec l'indicateur biométéorologique de sévérité, les mêmes interprétations peuvent être tirées que pour le premier modèle. De plus, les zones d'Île-de-France et du Nord connaissent une proportion d'assurés ayant eu un passage aux urgences significativement plus élevée que la zone Sud-Est-Ouest, toutes choses étant égales par ailleurs. Pour l'Île-de-France, la majorité des assurés réside à Paris et dans sa couronne. Ainsi, outre les considérations sur l'îlot de chaleur de Paris, cela pourrait être expliqué par un environnement urbain densément peuplé, qui est plus propice à la réalisation d'accidents divers ou l'aggravation de pathologies portées par les assurés (transport, pollution de l'air).

Chapitre 3 : Étude prospective de la sinistralité pour les passages aux urgences

L'impact sanitaire notable des épisodes de chaleur sur la population française peut laisser craindre une dégradation de la sinistralité associée à cet effet dans le futur et représenter alors un coût supplémentaire pour Swiss Life Prévoyance et Santé. À partir de l'étude précédente et des projections de température basées sur plusieurs scénarios du GIEC, ce chapitre tente de projeter l'impact fréquentiel pour le risque de passage aux urgences et pour le produit SLSR. Cependant, des hypothèses furent nécessaires. Par conséquent, il est important de préciser que cette vision prospective serait valable, entre autres, uniquement dans le cas où ces dernières sont vérifiées.

3.1. Hypothèses et considérations préliminaires

Cette étude prospective se base sur les résultats précédemment obtenus et à l'aide des informations à disposition. En particulier, la corrélation systématiquement identifiée entre l'IBM de sévérité et les passages aux urgences sera réutilisée. Toutefois, étant donné qu'il ne fut pas possible d'obtenir le motif des passages aux urgences et des hospitalisations avec les bases de données internes à l'entreprise, il n'est pas possible d'affirmer avec certitude que cette corrélation est intégralement due aux fortes chaleurs, corrélation n'étant pas causalité. Par conséquent, la vision prospective pour les passages aux urgences donnée par la suite, relèverait d'une hypothèse très forte qui est la suivante :

Les pathologies et accidents liés à la chaleur seraient la principale cause de l'effet observé sur le nombre hebdomadaire d'assurés sinistrés en période estivale.

Dans ce chapitre, les coefficients de régression afférents aux assurés et aux IBM de sévérité, établis avec le second modèle (modèle avec regroupement des zones géographiques), sont utilisés pour le risque de passage aux urgences.

Le cadre étant ainsi posé, des projections de la sinistralité SLSR, d'un point de vue fréquentiel et à horizon 2100, sont présentées. Le choix de l'horizon est lié à la possibilité d'utiliser les estimations de température par le portail du DRIAS. Toutefois, ces projections de sinistralité s'intéressent exclusivement à la relation chaleur-risque de passages aux urgences précédemment établies. Il n'est ici pas question d'imaginer la structure du portefeuille jusqu'à la fin du siècle, ce qui sortirait du cadre principal du mémoire. L'échantillon servant de base de projection est celui décrit en première section, c'est-à-dire les assurés présents entre le 1^{er} janvier 2023 et le 1^{er} janvier 2024.

3.2. Projections à horizon 2100

Le profil des assurés est considéré comme inchangé sur la période de projection. En d'autres termes, la répartition entre hommes et femmes, la répartition de l'âge et le lieu de résidence sont jugés identiques à la base de projections. L'objectif est de quantifier l'impact du changement climatique sur la fréquence des passages aux urgences dans le cas d'un tel portefeuille dans le futur. Cet impact est évalué sur la base des projections de température

du DRIAS, et ce, pour les trois scénarios du GIEC, afin de comparer l'effet des différentes trajectoires climatiques entre elles.

3.2.1. Méthode de simulation

Le nombre hebdomadaire d'assurés déclarant un passage aux urgences est simulé à l'aide d'une loi binomiale négative $BN(\mu, \theta)$. En effet, il fut constaté que cette loi représente assez bien la distribution des passages aux urgences hebdomadaires pour ce produit. Par conséquent, une moyenne empirique est calculée pour chaque sous-population d'individus à l'aide des coefficients de régression établis dans le chapitre précédent. Avec une fonction lien logarithme, l'expression de la moyenne empirique est la suivante :

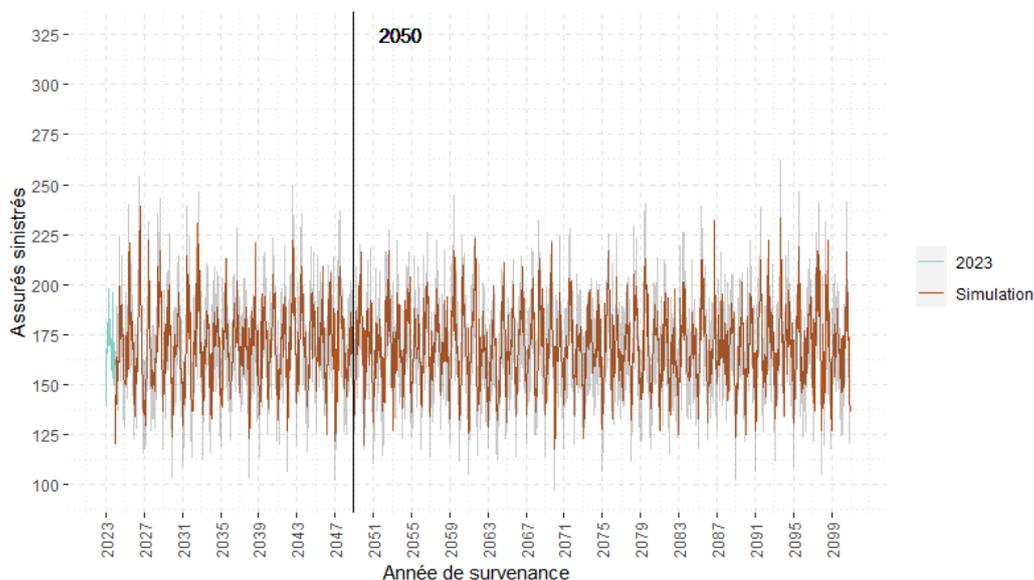
$$\hat{\mu} = n_i \exp \left(\beta_0 + \beta_{Femme} x_{Femme} + \beta_{75+} x_{75+} + \sum_{k \in Region \setminus \{Est-Ouest-Sud\}} \beta_k x_k + \beta_{IBM_{sev_{heb}}} x_{IBM_{sev_{heb}}} + \beta_{75+ * IBM_{sev_{heb}}} x_{75+ * IBM_{sev_{heb}}} \right)$$

avec n_i le nombre d'assurés exposés appartenant au sous-groupe i .

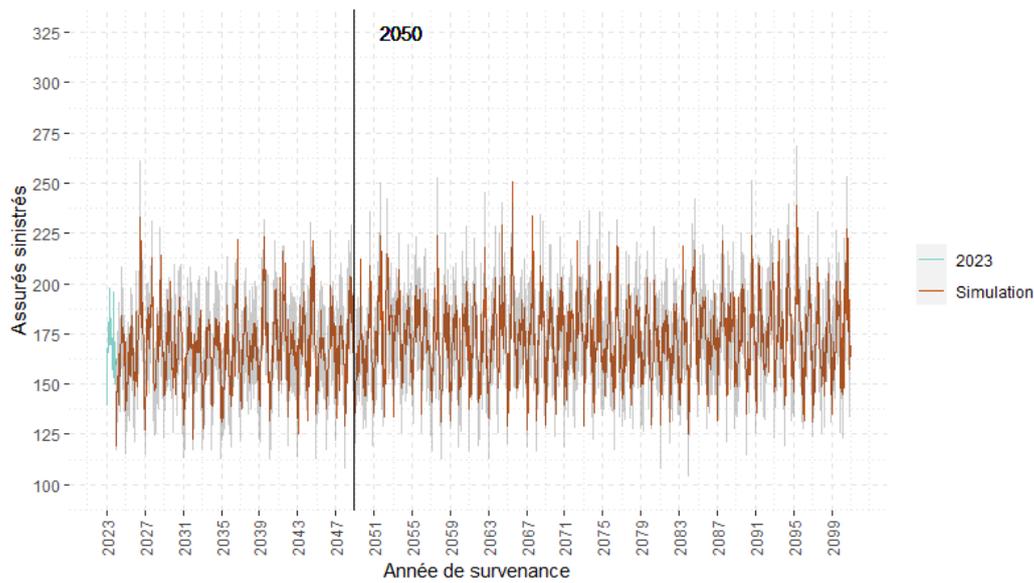
Par ailleurs, $\hat{\theta}$ est celui du modèle complet. Finalement, 1000 simulations ont été réalisées pour chacun des trois scénarios du GIEC.

3.2.2. Impact prospectif de la composante de chaleur sur la fréquence

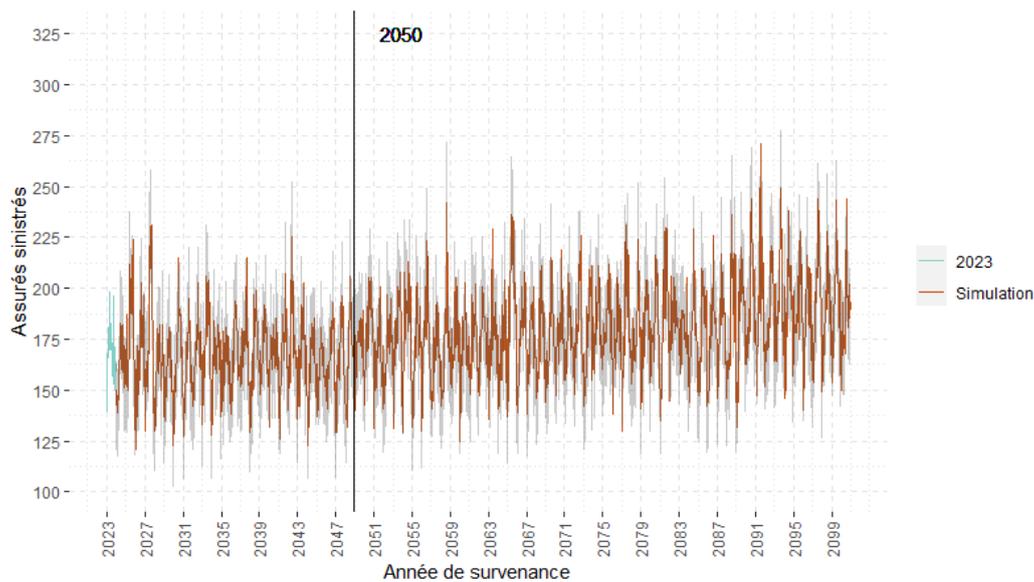
La composante de chaleur est toujours représentée par la somme des indicateurs biométéorologiques IBM_{min} et IBM_{max} . Dans un premier temps, le nombre total hebdomadaire d'assurés qui pourraient déclarer un forfait urgence entre le 1^{er} mai et le 30 septembre de chaque année a été représenté pour les trois scénarios.



(a)



(b)



(c)

Figure III.3.1 : Simulation du nombre hebdomadaire de passages aux urgences
 (a) : RCP 2.6 ; (b) : RCP 4.5 ; (c) : RCP 8.5

Pour le scénario optimiste, l'évolution resterait globalement stable et similaire à ce qui a été constaté en 2023, avec une variabilité plus ou moins importante selon qu'une canicule est prédite par les modèles climatiques ou non. Toutefois, dans le cadre des scénarios central et pessimiste, la sinistralité moyenne augmenterait progressivement, notamment à compter de 2050, concomitamment avec le réchauffement prédit. Avec le scénario RCP 8.5, pour les semaines caniculaires les plus importantes, le nombre d'assurés sinistrés pourrait être de 30% à 40% plus important à la fin du siècle que ce qui a été relevé en 2023.

La vision annuelle permet une meilleure représentation et comparaison entre les différentes trajectoires climatiques :

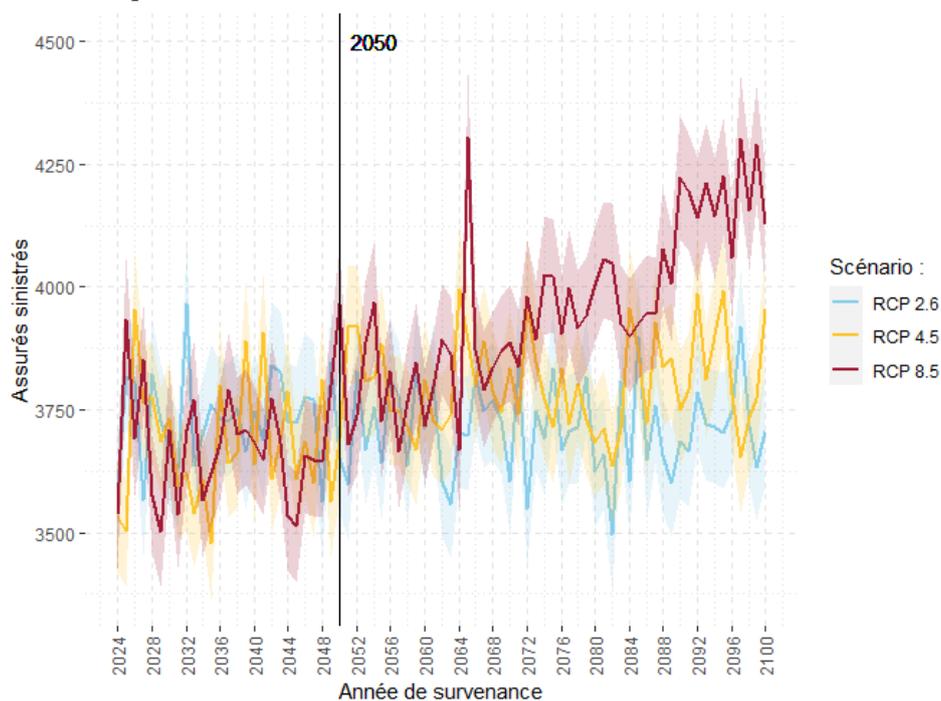


Figure III.3.2 : Simulation du nombre annuel de passages aux urgences

Il peut être noté la forte similarité avec l'évolution du réchauffement annuel, du fait du choix initial de la méthode qui se base sur un MLG, et dont seule la composante de température varie dans cette partie. Par conséquent, les pics de sinistralité correspondent aux années de canicules importantes comme celles modélisées en 2065.

En comparant la sinistralité projetée de chaque trajectoire du GIEC, le scénario pessimiste pourrait impliquer une variation de -6% à +6% de la sinistralité par rapport au RCP 4.5 (hormis l'année 2025), avant de projeter un excès de passages aux urgences presque systématique. Pour le produit SLSR, avec les assurés présents sur la survenance 2023, cela représenterait jusqu'à plusieurs centaines d'assurés supplémentaires en cas d'abandon de la trajectoire climatique actuelle et d'une recrudescence de l'utilisation des énergies fossiles.

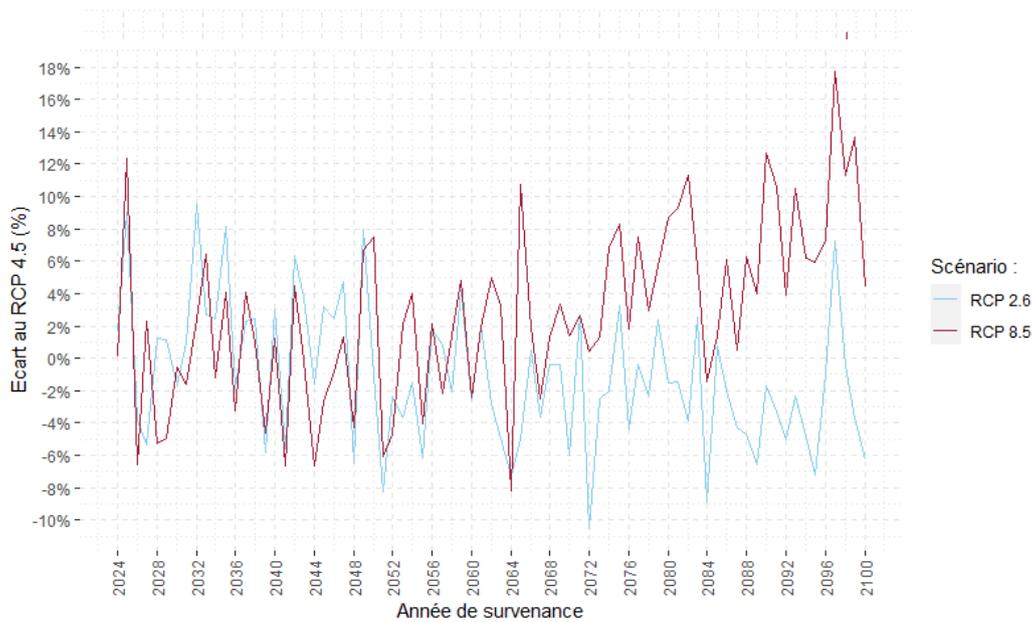
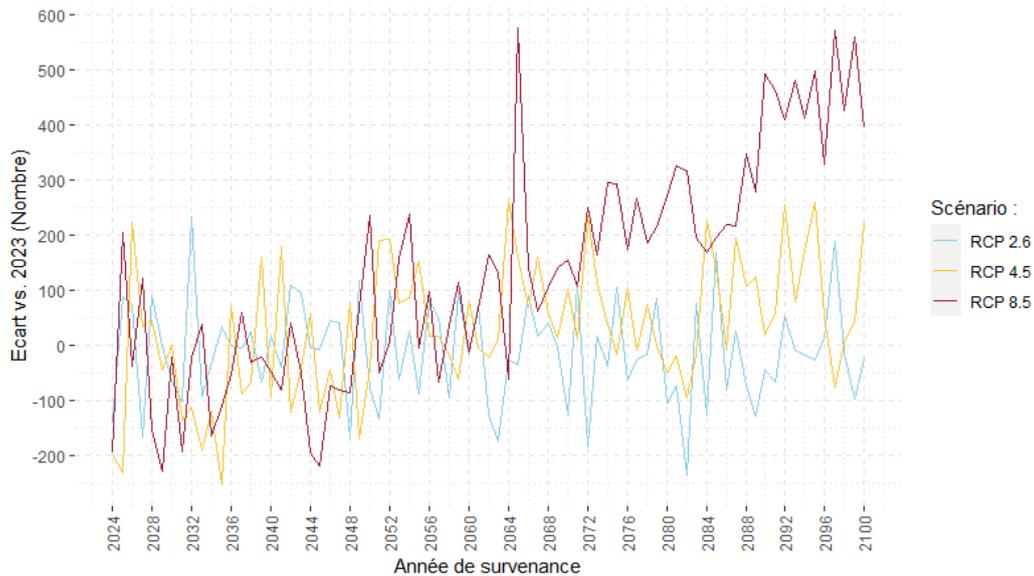


Figure III.3.3 : Écart de sinistralité avec le RCP 4.5 (en nombre et en %)

Enfin, en comparaison avec la survie 2023 qui a connu 3 730 passages aux urgences, pour les scénarios central et pessimiste, la sinistralité serait, *a minima*, équivalente avec une variabilité de -6% à 6% jusqu'en 2050, puis une hausse globale serait observée, notamment pour le scénario RCP 8.5 qui verrait le nombre hebdomadaire d'assurés aux urgences augmenter significativement (jusqu'à +15%) à la fin du siècle.



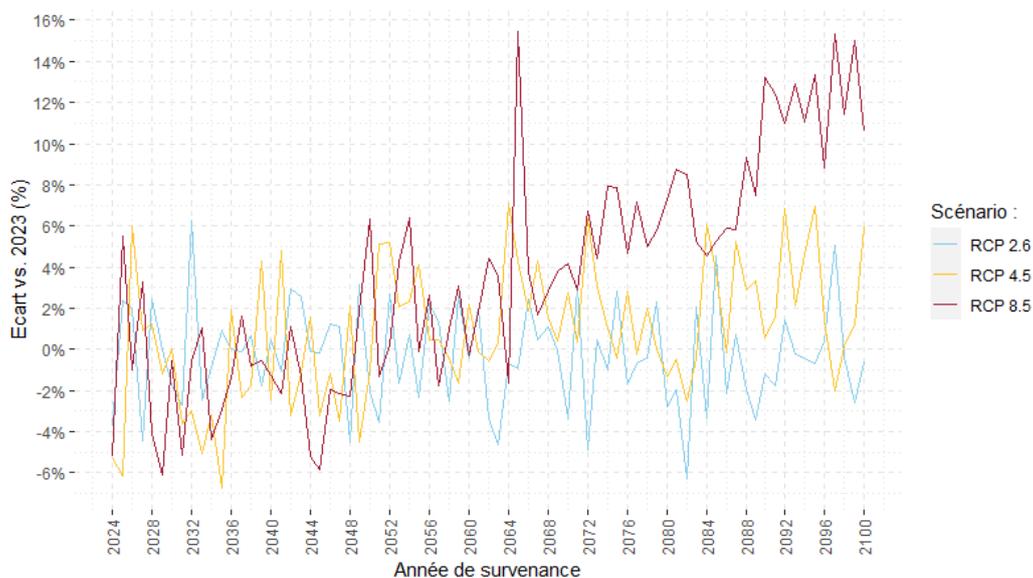


Figure III.3.4 : Écart de sinistralité avec la survenance 2023 (en nombre et en %)

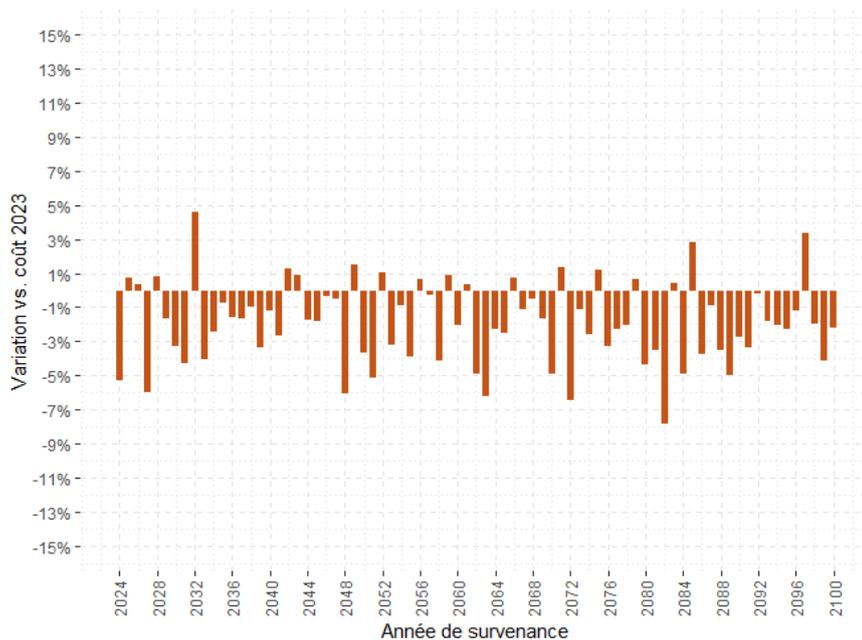
3.2.3. Coût supplémentaire pour les passages aux urgences

L'impact futur qu'aurait le réchauffement climatique sur les passages aux urgences pourrait alors impliquer un coût supplémentaire pour SwissLife. Il convient de préciser que ce coût est évalué en fonction de la législation actuelle et peut donc être amené à différer dans le temps. Par ailleurs, l'évolution de l'inflation n'est pas traitée dans ce mémoire, mais il est important de la prendre en compte dans une étude principalement dédiée aux coûts. Pour rappel, la loi française prévoit depuis le 1^{er} janvier 2022, une participation forfaitaire de l'individu sollicitant les urgences à hauteur de 19,61€. Ce forfait patient urgences peut être minoré à hauteur de 8,49€ dans le cas où la personne est en affection de longue durée ou sollicite les urgences suite à un accident du travail ou une maladie professionnelle ayant engendré une incapacité inférieure à deux tiers. L'exonération est également possible dans certaines conditions.

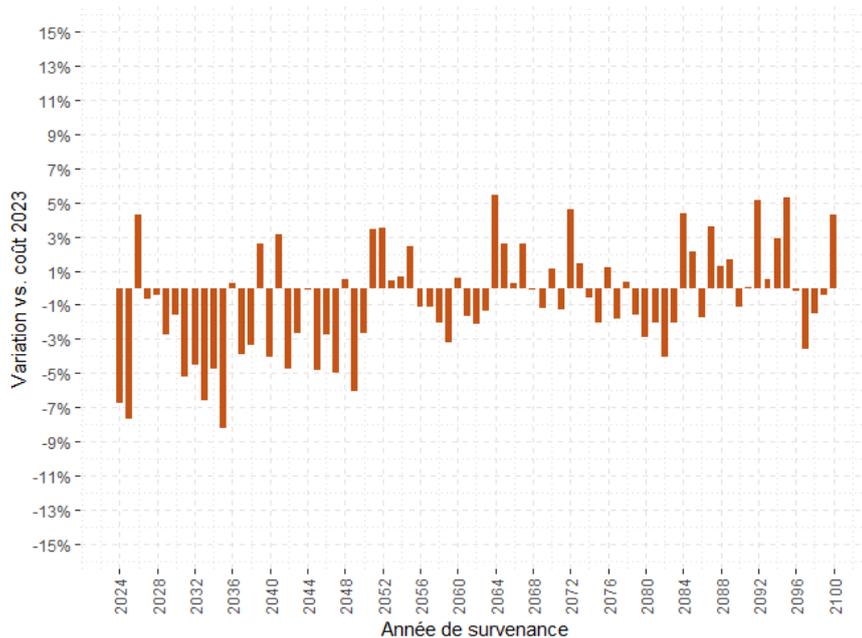
En 2023, 49,7% des FPU remboursés étaient minorés pour cet échantillon d'assurés. Ce taux important peut être expliqué par la population âgée qui est plus propice à avoir des pathologies graves. Par la suite, cette hypothèse de proportion est faite pour évaluer l'ordre de grandeur du coût supplémentaire que pourrait impliquer l'intensification des vagues de chaleur.

Sur la période d'étude, les FPU ont coûté au total 52 632,88€ à SLPS. En rapportant ce coût au nombre d'assurés exposés, c'est-à-dire présents sur la période, ce coût est le deuxième plus important après l'année 2022 (-13,52% vs. 2022). Toutefois, il convient de préciser qu'il est difficile de comparer ce coût avec les années antérieures à 2022 suite à l'évolution réglementaire. Avant 2022, il peut être retenu, tout de même, que 2021 fut l'année avec le rapport coût/assurés présents le plus faible ; les années 2018 et 2019 étant celles avec le rapport le plus élevé (respectivement +35,9% et +26,3%). Un parallèle peut être fait avec

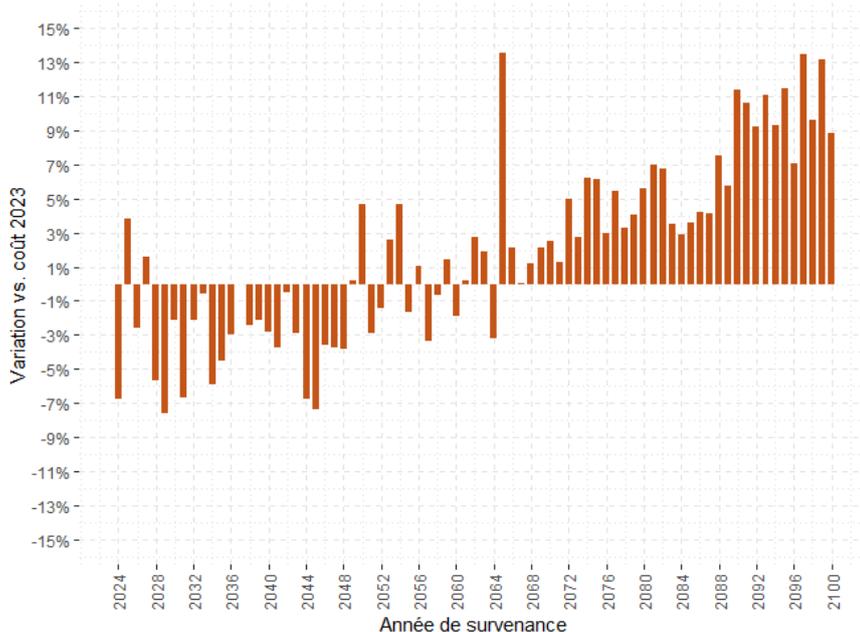
l'année 2021, dont les températures furent globalement clémentes en période estivale, tandis que 2018 et 2019 ont connu un nombre conséquent de canicules. Les représentations de la variation du coût annuel par rapport à l'année 2023 sont présentées pour chaque scénario ci-dessous.



RCP 2.6



RCP 4.5



RCP 8.5

Figure III.3.5 : Variation du coût moyen annuel vs. 2023 (en %)

La hausse graduelle du coût serait significativement visible dans le cadre du scénario pessimiste. Quant au RCP 4.5, le coût moyen serait globalement similaire à celui de 2023. Enfin, sous le RCP 2.6, le coût resterait fréquemment en deçà (jusqu'à -7%) sur tout le siècle.

3.2.4. Conséquences sur les hospitalisations

Pour Swiss Life Prévoyance et Santé, dans l'hypothèse d'un cadre réglementaire identique à celui tel qu'il est connu actuellement, le risque d'augmentation du coût moyen des passages aux urgences resterait maîtrisable. Toutefois, l'augmentation du nombre d'assurés sollicitant les urgences pourrait impliquer une augmentation des hospitalisations pour pathologie et accidents en lien avec la chaleur. En conséquence, des sinistres de pointe se produiraient plus fréquemment et représenteraient un coût significatif pouvant engendrer une dérive pour ce poste santé. Cette étude prospective des hospitalisations n'a pas été réalisée, du fait d'une difficulté d'interprétabilité des résultats du MLG établi en Partie II. En effet, les hospitalisations programmées (en ambulatoire, par exemple) viennent se confondre avec les éventuelles hospitalisations en lien avec la chaleur.

3.3. Conclusion de l'étude prospective

Suite à l'identification du lien entre l'indicateur biométéorologique et le risque de passages aux urgences, cette étude a essayé, en supposant un portefeuille identique dans le futur, de représenter l'impact sur le nombre hebdomadaire d'assurés passant aux urgences et le coût que cela pourrait impliquer. Avec le risque d'intensification des canicules, il est possible que la tendance reste de plus en plus souvent similaire à celle constatée en 2023 et pourrait être amenée à se dégrader par la suite dans la deuxième moitié du siècle si les efforts pour la transition vers des énergies renouvelables restaient au niveau actuel, voire se dégradèrent.

Néanmoins, les résultats présentés sont à nuancer pour plusieurs raisons :

- les résultats ne peuvent être interprétés qu'à la seule condition que l'hypothèse de causalité évoquée en début de chapitre est vérifiée. En supposant la causalité, ce chapitre a cherché à mettre en exergue, d'un point de vue informationnel, l'impact réel que le réchauffement climatique pourrait impliquer sur la sinistralité des urgences du portefeuille ;
- le choix de projection sur la base d'un MLG construit sur les survenances 2016 à 2023 est une proposition de méthode avec ses propres limites. Tout d'abord, les coefficients de régression déterminés peuvent légèrement différer pour l'échantillon d'assurés ayant servi aux projections. Cette simplification était toutefois nécessaire en raison d'une quantité de données trop modeste pour une seule survenance. Par ailleurs, il est encore difficile d'identifier la structure réelle de la relation entre les températures et le risque de passages aux urgences. L'utilisation du coefficient de régression associé à l'IBM de sévérité comme dynamique s'inscrit dans une démarche d'ouverture. Enfin, il est fort probable, dans le cas où les vagues de chaleur s'intensifieraient, que ce coefficient soit obsolète et sous-estimé ;
- ces résultats sont propres au produit SLSR et ne sauraient *a priori* être généralisables à un autre portefeuille ayant d'autres types de populations assurées et donc de spécificités.

Conclusion générale

Dans un premier temps, afin d'introduire les enjeux climatiques, ce mémoire a montré une tendance haussière des températures estivales sur tout le territoire métropolitain depuis 2010. Une conséquence notable, et d'ores et déjà visible, est un rallongement et une intensification des vagues de chaleur, et en particulier des canicules, ces dernières années. Par ailleurs, les régions du nord de la France, historiquement peu touchées, assistent à une normalisation de ces phénomènes extrêmes. Cette étude fut possible grâce à l'extraction de données météorologiques recueillies et mises à disposition par Météo France.

Dans la continuité de l'étude des températures historiques, sur la base des projections climatiques à horizon 2100 proposées par le portail du DRIAS, l'étude a également montré que la fréquence et la sévérité des épisodes caniculaires pourraient graduellement s'amplifier tout au long du siècle. Néanmoins, cette évolution dépendrait de la trajectoire climatique retenue. Trois scénarios RCP (2.6, 4.5 et 8.5) du GIEC, représentant respectivement des chemins optimiste, *business-as-usual* et pessimiste, ont été comparés. Il a été constaté que la dérive entre les trois trajectoires devrait se concrétiser à partir de la seconde moitié du siècle, les conséquences des émissions de gaz à effet de serre d'aujourd'hui se matérialisant avec un effet de retard lié au moment d'inertie du système climatique. Dans le pire scénario (RCP 8.5), la France métropolitaine pourrait connaître un triplement du nombre de canicules durant la période estivale dans le dernier quart de siècle.

La conséquence observable des fortes chaleurs sur la fréquence des passages aux urgences pour motif de pathologies résultant de la chaleur, telles que l'hyperthermie et la déshydratation, dans les communications de santé publique, a motivé la recherche d'un lien dans le cadre des activités en santé de Swiss Life Prévoyance et Santé. Cette étude a mené à l'identification d'une corrélation significative et positive entre le nombre hebdomadaire d'assurés déclarant un passage aux urgences et la température, représentée par la somme des indicateurs biométéorologiques minimum et maximum, pour un portefeuille individuel en gestion interne. Pour ce faire, plusieurs modèles linéaires généralisés de Poisson et binomiale négative ont été testés et comparés. Les critères d'ajustement et de performance utilisés sont la déviance et l'AIC. La significativité des coefficients a été vérifiée avec la p-valeur. Cette étude sur la fréquence a également été menée sur les hospitalisations. Elle a conduit à un résultat contre-intuitif avec un nombre hebdomadaire d'assurés hospitalisés corrélé négativement à la composante de chaleur. Cela montre les limites de l'étude sans les motifs des sinistres, notamment concernant les hospitalisations pour lesquelles la possibilité qu'elles soient programmées vient amoindrir l'aléa et rend difficile l'interprétabilité. Cette étude a ainsi pu montrer une difficulté en interne à laquelle peuvent être confrontées les personnes cherchant à comprendre l'impact du changement climatique sur les portefeuilles d'assurés en santé.

Enfin, une étude de cas sur un produit spécifique de SLPS, Swiss Life Santé Retraités, a été conduite. En effet, du fait de leur âge, les personnes retraitées peuvent représenter une population à risque face à l'intensification des phénomènes de chaleur extrême. Une corrélation significative et positive entre le nombre hebdomadaire d'assurés ayant eu un passage aux urgences et la sévérité de l'indicateur biométéorologique a également été relevée à l'aide d'un MLG. Sur la base de ce dernier, avec les projections de température d'un couple de modèles climatiques, plusieurs simulations du nombre d'assurés passant aux urgences

chaque semaine ont été réalisées. Dans le cas d'une réalisation du scénario central ou pessimiste, il est probable que le coût des passages aux urgences se stabilise à hauteur de celui de 2022 et 2023, voire augmente mécaniquement avec le nombre d'assurés sinistrés dans la deuxième moitié du siècle. Cela pourrait engendrer une augmentation des hospitalisations directement (hyperthermie, déshydratation, hyponatrémie, accidents) ou indirectement (aggravation de maladies cardiaques et rénales) liées à la chaleur, et donc des sinistres graves qui impliquent un coût important.

En s'inscrivant dans une démarche d'ouverture, ce mémoire a rencontré plusieurs limites diverses qu'il est nécessaire de mentionner. Tout d'abord, l'impossibilité de connaître la raison qui a conduit les assurés à être hospitalisés ou à se rendre aux urgences à l'aide des données internes, limite l'interprétabilité des résultats des modèles. En effet, bien qu'une corrélation ait été clairement identifiée, il n'est pas possible à ce stade d'affirmer rigoureusement une causalité. Toutefois, les constatations faites par Santé publique France sur l'effet des vagues de chaleur à l'échelle nationale laissent penser que l'hypothèse que cet impact observé sur les passages aux urgences soit attribué aux températures anormales, du moins en partie, est plausible.

De plus, les résultats obtenus s'appliquent dans un cadre précis et peuvent sensiblement varier en fonction de la population ciblée par un assureur :

- un portefeuille individuel avec toutes les classes d'âge, puis un portefeuille individuel de personnes retraitées. Par ailleurs, il a été constaté que le coefficient afférent à l'indicateur biométéorologique pour le portefeuille de retraités est plus élevé qu'en mélangeant toutes les classes d'âge, ce qui témoignerait d'un effet de la chaleur plus important sur les personnes âgées ;
- la composante de chaleur retenue qui est la somme de deux moyennes mobiles sur trois jours des températures minimales et maximales. Ce choix, inspiré des recherches menées sur la surmortalité liée à la chaleur, fut concluant dans l'étude menée. Cependant, l'utilisation d'un autre indicateur, comme une indicatrice de canicule, pourrait impliquer des résultats différents ;
- un cadre réglementaire qui a connu une évolution en 2022. Il est alors possible que le nombre d'assurés ayant déclaré un forfait patient urgences soit sous-estimé par rapport au nombre réel, du fait des personnes hospitalisées par la suite ;
- la dynamique projetée de la sinistralité pour les passages aux urgences se place dans le cadre de l'application des résultats d'une régression binomiale négative et à portefeuille constant.

Par ailleurs, outre l'incertitude sur la trajectoire climatique qui sera empruntée dans les prochaines décennies, l'impact des vagues de chaleur dépend également d'autres facteurs exogènes tels que les politiques de sensibilisation des populations et d'aménagement de l'urbanisme (zones vertes, isolation thermique des bâtiments), des habitudes de vie des assurés et de leur capacité d'adaptation (climatisation, logement thermiquement viable, lieu de résidence). L'étude de ces facteurs peut constituer d'autres pistes de réflexion tout comme la sensibilisation aux bonnes pratiques lors de fortes chaleurs par les assureurs par exemple (à l'image des activités de l'association Assurance Prévention de France Assureurs).

Sur le plan opérationnel, l'enjeu grandissant du réchauffement climatique pourrait amener les complémentaires santé à accorder une attention particulière au risque de dérive périodique de la sinistralité en période estivale. Maintes études possibles peuvent être menées dans un cadre :

- de provisionnement avec une réflexion sur l'intégration d'une provision complémentaire pour risque de sur-sinistralité liée aux épisodes caniculaires ;
- de tarification avec la prise en compte du risque de canicule et de ses répercussions sur le coût moyen, en fonction du lieu de résidence dans la méthode de tarification des contrats en santé ;
- des scénarios ORSA : pour le pilotage de l'activité santé de Swiss Life Prévoyance et Santé, le scénario faisant intervenir le risque d'intensification des canicules n'est pas construit à ce jour. Il peut être utile de construire un modèle prévoyant ce risque pour les années à venir.

Table des figures

| | | |
|--------|--|----------|
| I.1.1 | Évolution de l'écart de température entre la période de référence et 2011-2020 (<i>source : GIEC</i>) | p. 22 |
| I.1.2 | Projections des émissions de CO ₂ et de réchauffement climatique par scénario SSP (<i>source : GIEC</i>) | p. 24 |
| I.2.1 | Répartition des observations météorologiques | p. 28 |
| I.2.2 | Historique des écarts à la normale des températures moyennes en France métropolitaine (<i>source : Météo France</i>) | p. 29 |
| I.2.3 | Températures moyennes annuelles pour les stations de Cap Cépet, Nice, Nancy-Ochet et Reims-Prunay | p. 30 |
| I.2.4 | Répartition des stations météorologiques sur le territoire | p. 31 |
| I.2.5 | Climats de la France métropolitaine (<i>source : Météo France</i>) | p. 32 |
| I.2.6 | Températures moyennes sur 2010-2023 | p. 33 |
| I.2.7 | 95 ^{ème} quantile de température sur 2010-2023 | p. 33 |
| I.2.8 | Carte des groupements de régions | p. 34 |
| I.2.9 | Températures moyennes annuelles et quantiles 5 et 95 | p. 35 |
| I.2.10 | Variation moyenne du 95 ^{ème} quantile de température entre 2010-2013 et 2020-2023 (°C) | p. 36 |
| I.2.11 | Seuils des IBM (IBM _{min} et IBM _{max}) départementaux (<i>source : Météo France</i>) | p. 37 |
| I.2.12 | Nombre de canicules par département | p. 40 |
| I.2.13 | Intensité moyenne des canicules par département | p. 41 |
| I.2.14 | Durée moyenne des canicules par département | p. 41 |
| I.3.1 | Résumé des étapes de descente d'échelle | p. 44 |
| I.3.2 | Réchauffement projeté pour chaque modèle à horizon 2071-2100 (saison estivale et RCP 4.5) | p. 45 |
| I.3.3 | Découpage géographique pour les projections du réchauffement climatique sur le territoire métropolitain | p. 46 |
| I.3.4 | Projections du réchauffement annuel pour les RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5 | p. 48 |
| I.3.5 | Projections des canicules à horizon 2100 selon trois scénarios RCP du GIEC | p. 50-51 |
| I.3.6 | Nombre de canicules à horizon 2100 (Île-de-France) | p. 52 |
| II.1.1 | Évolution du nombre de nuits tropicales pour la station de Nice et périodes de nuits tropicales consécutives (sévérité) | p. 58 |
| II.1.2 | Évolution moyenne du 95 ^{ème} quantile de l'indicateur humidex (comparaison des périodes 2010-2016 et 2017-2023) | p. 59 |
| II.1.3 | Population exposée aux vagues de chaleur et passages aux urgences pour l'été 2022 (<i>source : Santé publique France</i>) | p. 60 |
| II.2.1 | Décomposition du principe de remboursement par l'Assurance Maladie | p. 64 |
| II.3.1 | Évolution du volume de primes (bâtonnets) et du nombre de contrats (courbe noire) pour la santé individuelle en Standard | p. 68 |
| II.3.2 | Schéma du processus de construction de la base de données | p. 69 |
| II.3.3 | Comparaison 2019-2020 du nombre total de séjours hospitaliers (<i>source : DREES</i>) | p. 71 |
| II.3.4 | Évolution de l'âge et du rapport F/H du portefeuille | p. 73 |
| II.3.5 | Répartition du nombre d'actes par garantie | p. 74 |

| | | |
|----------|---|------------|
| II.3.6 | Histogrammes des déclarations | p. 75-76 |
| II.3.7 | Proportion d'assurés sinistrés par semaine sur la période d'étude (Île-de-France) | p. 77 |
| II.3.8 | Résidus standardisés pour les variables <i>Age</i> , <i>Zone géographique</i> et <i>Genre</i> | p. 80 |
| II.3.9 | Boîtes à moustaches de IBM _{sévérité} selon la zone géographique | p. 82 |
| II.3.10 | Histogramme du nombre d'assurés hebdomadaire déclarant un passage aux urgences | p. 83 |
| II.3.11 | Résidus de déviance et de Pearson | p. 85 |
| II.3.12 | Nombre d'assurés en fonction du nombre de forfaits journaliers remboursés (FJ >= 10) | p. 86 |
| II.3.13 | Histogramme du nombre d'assurés hebdomadaire déclarant une hospitalisation | p. 87 |
| III.1.1 | Population de l'échantillon de contrats SLSR | p. 92 |
| III.1.2 | Répartition F/H dans l'échantillon | p. 93 |
| III.1.3 | Répartition de l'âge par sexe dans l'échantillon | p. 93 |
| III.1.4 | Répartition des assurés de l'échantillon sur le territoire métropolitain | p. 94 |
| III.1.5 | Répartition F/H des assurés sinistrés | p. 95 |
| III.1.6 | Répartition de l'âge par sexe pour les assurés ayant déclaré au moins une prestation | p. 96 |
| III.1.7 | Proportion d'assurés sinistrés par département | p. 96 |
| III.1.8 | Fréquence moyenne des actes hospitaliers par département | p. 97 |
| III.1.9 | Distribution du nombre d'actes | p. 97 |
| III.1.10 | Coût moyen par département/région | p. 98 |
| III.1.11 | Assurés ayant eu un remboursement du FPU | p. 99 |
| III.1.12 | Remboursement de garanties en nombre d'assurés | p. 99 |
| III.1.13 | Durée moyenne d'utilisation des garanties (hors FPU) | p. 100 |
| III.2.1 | Histogramme du nombre d'assurés SLSR hebdomadaire déclarant un passage aux urgences | p. 102 |
| III.2.2 | Résidus de déviance et de Pearson pour le modèle complet (SLSR) | p. 103 |
| III.3.1 | Simulation du nombre hebdomadaire de passages aux urgences | p. 107-108 |
| III.3.2 | Simulation du nombre annuel de passages aux urgences | p. 109 |
| III.3.3 | Écart de sinistralité avec le RCP 4.5 (en nombre et en %) | p. 110 |
| III.3.4 | Écart de sinistralité avec la survenance 2023 (en nombre et en %) | p. 110-111 |
| III.3.5 | Variation du coût moyen annuel vs. 2023 (en %) | p. 112-113 |

Bibliographie

- ABRAHAMSON V., WOLF J. et al. (2008). *Perceptions of heatwave risks to health: interview-based study of older people in London and Norwich, UK*. Journal of Public Health, vol. 31, n° 1, 119-126.
- AMELI (2022). *Le forfait patient urgences (FPU)*. URL : <https://www.ameli.fr/assure/remboursements/reste-charge/forfait-patient-urgences-fpu> (évolution de la participation forfaitaire pour les urgences, définition du FPU).
- ANDERSON, G. B., DOMINICI, F. et al. (2013). *Heat-related emergency hospitalizations for respiratory diseases in the Medicare population*. American journal of respiratory and critical care medicine, vol. 187, n° 10, 1098-1103.
- AUGER, N., NAIMI, A. I., SMARGIASSI, A., LO, E. et KOSATSKY, T. (2014). *Extreme heat and risk of early delivery among preterm and term pregnancies*. Epidemiology, vol. 25, n° 3, 344-350.
- AXA (2023). *Future Risks Report*.
- BENMARHONIA, T. (2015). *Vulnérabilité à la chaleur dans le contexte des changements climatiques*. Thèse de doctorat, Université Paris Sud – Paris XI ; Université de Montréal. URL : <https://theses.hal.science/tel-01456772>.
- DREES (2021). *En 2020, le nombre de séjours hospitaliers hors Covid-19 a diminué de 13% par rapport à 2019*. Etudes et Résultats, 1204, 1-8. URL : <https://drees.solidarites-sante.gouv.fr/sites/default/files/2021-09/ER1204.pdf>.
- DRIAS (2021). *Les nouvelles projections climatiques de référence DRIAS 2020 pour la métropole*. URL : <https://www.drias-climat.fr/document/rapport-DRIAS-2020-red3-2.pdf> (présentation technique du jeu de simulations climatiques DRIAS-2020).
- DRIAS (2021). Portail DRIAS. Jeu de données corrigées DRIAS-2020.
- FAVRE-BEGUET, M. (2022). *Protection sociale*. ISFA.
- FOUILLET, A., REY, G. et al. (200). *Has the impact of heat waves on mortality changed in France since the European heat wave of summer 2003 ? A study of the 2006 heat wave*. International Journal of Epidemiology, vol. 37, n° 2, 309-317.
- GALEA (2023). *Où trouver des données climat ? Les données Météo France*. URL : galea-associes.eu/wp-content/uploads/2023/02/Article-donnees-climat-SYNOP.pdf (description de la base météorologique Météo France SYNOP).
- GIEC (2001). *Radiative Forcing of Climate Change*.
- GIEC (2021). *Climate Change 2021 : The Physical Science Basis*. Groupe de travail I.
- GIEC (2023). *Synthesis Report of the Sixth Assessment Report*.
- INSEE (2016). *De plus en plus de couples dans lesquels l'homme est plus jeune que la femme*. INSEE Première, 1613. URL : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2121591>

- INSEE (2022). *Femmes et hommes, l'égalité en question – Santé et recours aux soins*. INSEE Références, Edition 2022. URL : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/6047751>.
- JOEL, M. (2003). *Les conditions de vie des personnes âgées vivant à domicile d'après l'enquête HID*. Revue française des affaires sociales, 103-122.
- KOPPE, M. (2021). *Comprendre les îlots de chaleur urbains*. URL : <https://lejournal.cnrs.fr/articles/comprendre-les-ilots-de-chaleur-urbains> (explications du phénomène d'îlot de chaleur urbain).
- LAAIDI, K., PASCAL, M., BERAT, B., STRAUSS, B., LEDRANS et M., EMPEREUR-BISONNET, P. (2006). *Système d'alerte canicule et santé 2006*. Rapport opérationnel, Institut de Veille Sanitaire.
- LAAIDI, K., UNG, A., WAGNER, V., BEAUDEAU, P. et PASCAL, M. (2012). *Système d'alerte canicule et santé : principes, fondements et évaluation*. Institut de Veille Sanitaire.
- LAAIDI, K., UNG, A., PASCAL, M. et BEAUDEAU, P. (2014). *Vulnérabilité à la chaleur : actualisation des connaissances sur les facteurs de risque*. Institut de Veille Sanitaire.
- MASIELLO, E. (2021). *Modèles linéaires généralisés*. ISFA.
- METEO FRANCE (2023). *Canicule, vague ou pic de chaleur ?* URL : <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/comprendre-la-meteo/temperature/comment-les-climatologues-evaluent-vagues-chaleur-canicules> (définition des différents types d'épisodes de chaleur).
- METEO FRANCE. Données SYNOP ESSENTIELLES OMM. URL : <https://public.opendatasoft.com/explore/dataset/donnees-synop-essentielles-omm> (données météorologiques Météo France SYNOP).
- MINISTERE DE LA SANTE (2017). *Plan National Canicule 2017*. URL : https://sante.gouv.fr/IMG/pdf/pnc_actualise_2017.pdf.
- PASCAL, M. et LAAIDI, K. (2013). *Atelier interdisciplinaire sur la vulnérabilité aux vagues de chaleur*. Institut de Veille Sanitaire.
- PINCEMIN, G. (2021). *Risques climatiques et mortalité, impact du risque canicule à l'horizon 2070*. Mémoire d'actuariat, EURIA, p. 7.
- SISTO, A., VICINANZA, F., CAMPANOZZI, L. L., RICCI, G., TARTAGLINI, D. et TAMBONE, V. (2019). *Towards a Transversal Definition of Psychological Resilience : A Literature Review*. Medicina. URL : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6915594/pdf/medicina-55-00745.pdf>.
- VANDENTORREN, S., BRETIN et al. (2006). *August 2003 Heat Wave in France : Risk Factors for Death of Elderly People Living at Home*. European Journal of Public Health, vol. 16, n° 6, 583-591.
- VAN ZUTPHEN, A. R., LIN, S., FLETCHER, B. A. et HWANG S. A. (2012). *A population-based case-control study of extreme summer temperature and birth defects*. Environ Health Perspect, vol. 120, n° 10, 1443-1449.

Annexes

Annexe A : Groupements de régions

À l'image des groupements par zones climatiques, les groupements de régions permettent de simplifier la démarche tout en conservant les différentes tendances à une échelle régionale (bassin méditerranéen, zones intérieures de l'est de la France, etc.). Étant donné l'étendue des phénomènes climatiques comme les fortes chaleurs, ces regroupements sont justifiés et permettent une étude plus globale. Associer les assurés à de telles zones permet également moins de dispersion et un gain en puissance statistique.

| Région | Code région | Groupement |
|----------------------------|-------------|---------------|
| Auvergne-Rhône-Alpes | ARA | Est |
| Bourgogne-Franche-Comté | BFC | Est |
| Bretagne | BRE | Nord |
| Centre-Val de Loire | CVL | Ouest |
| Corse | COR | Sud |
| Grand Est | GES | Est |
| Hauts-de-France | HDF | Nord |
| Île-de-France | IDF | Île-de-France |
| Normandie | NOR | Nord |
| Nouvelle-Aquitaine | NAQ | Ouest |
| Occitanie | OCC | Sud |
| Pays de la Loire | PDL | Ouest |
| Provence-Alpes-Côte d'Azur | PAC | Sud |

Table A : Régions et groupements

Annexe B : Seuils régionaux

Les seuils IBM sont utilisés dans le Plan National Canicule pour faciliter la prise de décision à l'échelle nationale. Ces seuils sont à la maille départementale. Ce mémoire retient la moyenne des seuils départementaux pour une région considérée.

| Région | Seuil IBM _{min} | Seuil IBM _{max} |
|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Auvergne-Rhône-Alpes | 19,1°C | 34,2°C |
| Bourgogne-Franche-Comté | 19,0°C | 33,9°C |
| Bretagne | 18,8°C | 32,3°C |
| Centre-Val de Loire | 18,8°C | 34,7°C |
| Corse | 23,0°C | 33,0°C |
| Grand Est | 18,4°C | 34,1°C |
| Hauts-de-France | 18,0°C | 33,2°C |
| Île-de-France | 21,0°C | 31,0°C |
| Normandie | 18,4°C | 32,6°C |
| Nouvelle-Aquitaine | 19,9°C | 35,1°C |
| Occitanie | 20,6°C | 35,2°C |

| | | |
|----------------------------|--------|--------|
| Pays de la Loire | 19,6°C | 34,2°C |
| Provence-Alpes-Côte d'Azur | 21,5°C | 34,5°C |

Table B : Seuils d'alerte canicule régionaux

Annexe C : Villes pour les projections de température

Pour les projections climatiques, quatorze villes de référence réparties sur le territoire ont été choisies depuis le portail du DRIAS, afin de représenter localement les températures minimales et maximales. Cette annexe donne le détail des zones extraites ainsi que les zones géographiques associées à ces villes.

| Ville | Latitude du centre du cercle (degrés) | Longitude du centre du cercle (degrés) | Rayon (km) | Code région | Groupe ment |
|------------|---------------------------------------|--|------------|-------------|---------------|
| Bordeaux | 44,8378 | -0,5796 | 30 | NAQ | Ouest |
| Dijon | 47,3230 | 5,0419 | 30 | BFC | Est |
| Grenoble | 45,1861 | 5,7341 | 30 | ARA | Est |
| Le Havre | 49,4941 | 0,1079 | 30 | NOR | Nord |
| Lille | 50,6320 | 3,0574 | 30 | HDF | Nord |
| Limoges | 45,8345 | 1,2616 | 30 | NAQ | Ouest |
| Lyon | 45,7588 | 4,8413 | 30 | ARA | Est |
| Marseille | 43,2967 | 5,3761 | 30 | PAC | Sud |
| Nice | 43,7020 | 7,2683 | 30 | PAC | Sud |
| Paris | 48,8578 | 2,3199 | 20 | IDF | Île-de-France |
| Rennes | 48,1141 | -1,6809 | 30 | BRE | Nord |
| Strasbourg | 48,5733 | 7,7521 | 20 | GES | Est |
| Toulouse | 43,6045 | 1,4419 | 22 | OCC | Sud |
| Tours | 47,3928 | 0,6883 | 21 | CVL | Ouest |

Table C : Extractions réalisées sur le portail du DRIAS