



**Mémoire présenté devant le jury de l'EURIA en vue de l'obtention
du diplôme d'Actuaire EURIA
et de l'admission à l'Institut des Actuaire
le 22 septembre 2021**

Par : Gaëlle Pincemin

Titre : Risques climatiques et mortalité, impact du risque canicule à l'horizon 2070

Confidentialité : Non Oui (Durée : 1 an 2 ans)

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

*Membres présents du jury de l'Institut
des Actuaire :*

Fabrice HAMON

Guillaume BIESSY

Guillaume GONNET

Entreprise :

Nom : Prim'Act

Signature :

Membres présents du jury de l'EURIA :

Brice FRANKE

Directeurs de Mémoire en entreprise :

Nom : Quentin GUIBERT

Signature :

Nom : Édouard PORCEL

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)*

Secrétariat :

Bibliothèque :

Signature du responsable entreprise

Signature du candidat

Résumé

Nombreuses sont les observations historiques faites entre climat et santé, cependant la corrélation entre ces deux variables est nouée de questionnements et d'interprétations variés. Les températures quelles qu'elles soient peuvent avoir raison de la santé d'un individu, le faisant passer d'un état sain, à la maladie, voire l'entraîner vers la mort selon certaines circonstances.

Les vagues de froid et de chaleur sont chaque année responsables d'un excès de mortalité. Dans un contexte de réchauffement climatique, les vagues de chaleur sont devenues la première source d'inquiétude en matière de mortalité. Leur fréquence et intensité ont déjà augmenté au cours des 30 dernières années et les scénarios climatiques ne prévoient pas d'amélioration, bien au contraire. Quel que soit le scénario du GIEC considéré (RCP 2.6 optimiste et RCP 8.5 pessimiste) les vagues de chaleurs augmenteront au cours du XXI^{ème} siècle.

L'appréhension du risque de mortalité est un enjeu crucial en assurance. L'élaboration des tables prospectives s'attelle à estimer les espérances de vie futures en extrapolant les tendances passées. Le changement climatique et toutes ses conséquences sur la santé pourraient altérer les trajectoires empruntées par ces tables.

Ce mémoire ouvre les réflexions sur la prise en compte du risque climatique sur la mortalité. Une large étude est d'abord menée pour comprendre et décrire l'impact des températures sur l'Homme, que ce soit par des dommages directs (vagues de chaleur et de froid) ou indirects (dommages collatéraux liés aux moustiques, aux rayonnements ultraviolets (UV) ou à la pollution par exemple). La seconde partie s'attelle uniquement au risque canicule et décrit son évolution. Le lien entre température et mortalité est reproduit à l'aide d'un modèle à contraintes et retards. Enfin, avec les données prospectives de températures et de mortalité, une évaluation des dommages futurs en nombre de décès et espérance de vie perdue est réalisée dans différents scénarios.

Mots-clés : température, mortalité, GIEC, canicule, changement climatique.

Abstract

Many historical observations have been made between climate and health, but the correlation between the two is fraught with questions and varying interpretations. Temperatures of any kind can affect an individual's health, causing him to go from a healthy state to illness, or even death under certain circumstances.

Cold and heat waves are responsible for excess mortality every year. In a context of global warming, heat waves have become the primary source of concern in terms of mortality. Their frequency and intensity have already increased over the last 30 years and climate scenarios do not foresee any improvement, on the contrary. Regardless of the IPCC scenario considered (RCP 2.6 optimistic and RCP 8.5 pessimistic) heat waves will increase during the 21st century.

The understanding of mortality risk is a crucial issue in insurance. The development of prospective tables focuses on estimating the improvement of future life expectancies by extrapolating past trends. Climate change and all its consequences on health could alter the trajectories taken by these tables.

This Master's thesis opens a debate on the inclusion of climate risk on mortality. A broad summary is first carried out to understand and describe the impact of temperatures on humans, whether through direct damages (heat and cold waves) or indirect damages (collateral damage linked to mosquitoes, ultraviolet (UV) radiation or pollution for example). The second part focuses solely on the risk of heat waves and describes their evolution. The link between temperature and mortality is reproduced using a constraint and lag model. Finally, with the prospective temperature and mortality data, an assessment of future damages in terms of number of deaths and lost life expectancy is achieved.

Keywords : temperature, mortality, IPCC, heat waves, climate change.

Note de Synthèse

L'être humain et particulièrement sa santé est subordonnée aux facteurs climatiques. Sans évoquer les catastrophes ici des catastrophes naturelles telles que les tempêtes ou les inondations, de simples variations de températures, plus ou moins extrêmes, engendrent diverses conséquences sur la santé humaine. L'influence exercée par ces variables est multiple, cela va contribuer, positivement ou négativement, à contracter différentes pathologies et pourra également nuire à son bien-être global. Les vagues de froid et de chaleur sont de loin la première cause de décès résultant du climat. Cette étroite relation entre température et mortalité s'évalue sous forme de « U » ou de « V ». Les saisons thermiques des zones tempérées comme la France impliquent une saisonnalité dans la répartition des décès. Sur ce rythme annuel de mortalité, deux maximums sont observables, un en saison hivernale et un second au plus chaud de l'été. Ces deux points culminants s'avèrent encore plus meurtriers face à des événements saisonniers typiques tels que les épidémies de grippe en hiver ou les canicules en été. La question du changement climatique impliquant une hausse globale des températures et une augmentation des épisodes caniculaires tant en occurrence qu'en intensité pourrait bousculer l'ordonnement des décès annuels. Les vagues de chaleur attendues seront plus fréquentes, plus chaudes et surtout devraient durer plus longtemps que dans le passé. Ce risque est déjà bien présent et visible et ne peut plus être considéré comme émergent. Les températures atteintes sur les années 2019 et 2020 ont été responsables pour la première fois du déclenchement du niveau d'alerte rouge du Plan National Canicule (niveau maximal). Dans ce contexte, cette étude cherche à quantifier les décès engendrés par les canicules à l'horizon 2070 à partir des scénarios du GIEC (RCP 8.5 pessimiste et RCP 2.6 optimiste).

Les effets des températures sur l'Homme

Habituellement en équilibre homéostatique avec le milieu dans lequel il vit, le corps humain grâce à des réponses physiologiques et comportementales adaptées s'accommode aux variations climatiques ambiantes. Une rupture de cet équilibre se manifeste par de légers symptômes (tremblements et rougeurs face au froid, fatigue et déficience cognitive face à la chaleur). Les Hommes ne sont pas tous égaux face à la sensibilité climatique. Leur réponse dépendra de l'âge, du sexe, ou encore de l'acclimatation (qui découle du lieu usuel de vie). La réponse physiologique entre homme et femme peut légèrement différer et explique une sensibilité accrue des femmes face aux températures. L'âge entre également en compte, les personnes âgées ont des déficiences de leur appareil homéostatique, ce qui entraîne par exemple une sudation insuffisante empêchant le corps de se refroidir correctement.

Enfin, les effets biologiques engendrés par les températures sont à la fois immédiats et différés. Face à une hausse soudaine des températures, les taux de décès de la population vont rapidement augmenter et en cas de sursaut majeur, il s'en suivra un épisode de sous-mortalité. Cet effet découle des personnes fragilisées par un état de santé dégradé ou ayant un âge avancé. Elles se retrouvent emportées prématurément par de hautes températures alors même qu'elles n'auraient pu survivre que sur les quelques jours ou semaines suivantes.

Données, méthode et résultats

L'historique des températures en France métropolitaine provient de la base GHCN (CLIMATE DATA RECORD (CDR) PROGRAM, 2018), il s'agit d'une extraction des températures moyennes, minimales et maximales pour 14 stations météorologiques françaises sur la période 1950-2019. Ces relevés sont ensuite moyennés à l'échelle de la France. Les données de mortalité ont été fournies par le réseau Quetelet-Prodego Diffusion et produites par l'INSEE. Il s'agit d'une agrégation de l'état civil de 1975 à 2019 avec différentes informations clefs (sexe, âge de décès, CSP, région de décès, etc.).

Le lien entre température moyenne journalière est reproduit à l'aide un modèle additif généralisé à contraintes et retard dit CSDL (Constrained Segmented Distributed Lag Model) (MUGGEO, VMR, 2010). On considère $\mathbb{E}[D_t] = \lambda_t$ le nombre de décès attendu pour le jour $t = 1, 2, \dots, T$ tel que $D_t \sim Pois(\lambda_t)$ avec $\lambda_t = E_t \times \mu_t$ où E_t est l'exposition au risque et μ_t la fonction de hasard. z_t est la température moyenne du jour t , et x_t^\top un vecteur de variables explicatives supplémentaires telles que l'année, le jour de la semaine ou le mois :

$$\ln(\lambda_t) = \mathbf{x}_t^\top \boldsymbol{\delta} + \sum_{l_1=0}^{L_1} \beta_{1l_1} (z_{t-l_1} - \psi_1)_- + \sum_{l_2=0}^{L_2} \beta_{2l_2} (z_{t-l_2} - \psi_2)_+.$$

L_1 et L_2 correspondent aux nombres de jours d'observation des effets températures, ils sont fixés à 45 jours. ψ_1 et ψ_2 sont les seuils à partir desquels on considère que la température froide (respectivement chaude) à un effet notable sur la mortalité. Finalement, la partie $(z - \psi_1)_- = (z - \psi_1) \mathbb{1}_{(z < \psi_1)}$ et $(z - \psi_2)_+ = (z - \psi_2) \mathbb{1}_{(z > \psi_2)}$ permet de prendre en compte les effets des hautes températures lorsqu'on se trouve au-dessus du seuil de chaleur, et respectivement des faibles températures lorsqu'on se retrouve en dessous du seuil de froid. Le vecteur, $\boldsymbol{\beta}_2 = (\beta_{20}, \beta_{21}, \dots, \beta_{2l_2}, \dots, \beta_{2L_2})^\top$ peut alors être interprété comme l'effet retard du log risque relatif pour une hausse de température proportionnelle à l'écart au seuil de chaleur ψ_2 , il s'agit du risque provenant des jours $1, 2, \dots, l_2, \dots, L_2$ précédents. Après une exposition sur un instant t à une température z_t , les effets seront modélisés jusqu'en $t + L$ (Figure 1).

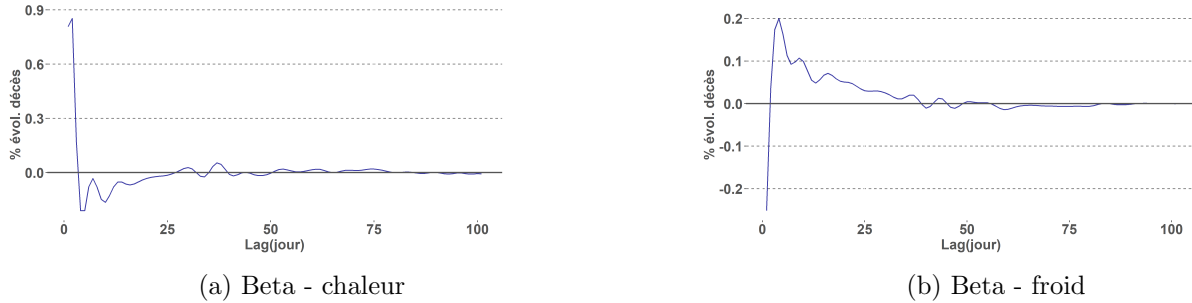


FIGURE 1 : % d'évolution sur le nombre de décès expliqué par la chaleur ou par le froid.

Ce modèle s'avère assez sensible face à la variation de ces paramètres. Après une étude de sensibilité et de qualité de prédiction les conventions prises sont les suivantes : la période d'observation est réduite à 2000-2019 sans l'année 2003 qui présente une canicule extrêmement meurtrière, les données de mortalité sont différenciées par sexe et par tranche d'âge (0-49 ans, puis des plages de 5 ans, et enfin les plus de 90 ans sont regroupés ensemble). Pour chaque sexe et tranche d'âge un modèle est calibré. Le seuil ψ est unique et égal à 18°C . La période d'observation des effets retards (L) est de 45 jours.

Cette étude portant sur les effets liés à la chaleur, on ne sélectionnera pour la projection que la partie du modèle faisant lien entre mortalité et température au-dessus de 18°C soit le vecteur β_{2L_2} .

Le portail DRIAS permet d'accéder aux données météorologiques extraites des modèles climatiques élaborés dans les laboratoires français CNRM, IPSL et CERFACS (DRIAS, 2020). Ces données donnent accès aux températures journalières (minimales, maximales et moyennes) entre 2020 et 2070¹ par scénario et modèle climatique sélectionné. Le choix se porte ici sur deux des quatre scénarios du GIEC (RCP 8.5 et RCP 2.6) issu du modèle CNRM-CM5 (VOLDOIRE et al., 2011).

Ainsi, avec les 10 courbes $\beta_{s,x}$ relatives à chaque sexe et tranche d'âge et des températures journalières $z_{RCP,t}$ de chaque scénario considéré, des facteurs journaliers $w_{s,x,RCP,t}$ sont calculés de la façon suivante :

$$w_{s,x,RCP,t} = \sum_{l=0}^{45j} \beta_{s,x,l} (z_{RCP,t-l} - 18^\circ C)_+$$

Les facteurs seront calculés uniquement si le jour t est évalué comme étant un jour de canicule. Les vagues de chaleur sont identifiées au sens d'alerte du plan national, c'est-à-dire par la définition de Météo-France. Un jour t est considéré comme caniculaire si la moyenne mobile sur 3 jours de sa température minimale et maximale se trouve au-dessus du seuil d'alerte (seuil_{min} = 18°C de nuit et seuil_{max} = 30°C de jour) :

$$\bar{T}_{\max_t} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 T_{\max_{t-i}} > \text{seuil}_{\max} \quad \text{et} \quad \bar{T}_{\min_t} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 T_{\min_{t-i}} > \text{seuil}_{\min}$$

Les seuils sont départementaux, mais par soucis de simplification les travaux sont ici réalisés à l'échelle nationale. Les facteurs journaliers sont ensuite annualisés pour obtenir un facteur $w_{s,x,RCP,n}$ par année n . Le but étant d'établir des chocs associables aux tables de mortalité prospectives telles que celles de l'INSEE 2070 (INSEE, 2016) et en se ramenant à l'expression initiale du modèle CSDL, on a :

$$\ln(E_{s,x,n} \mu_{s,x,n}) = \mathbf{x}_{s,n}^\top \boldsymbol{\delta} + w_{s,x,RCP,n} \quad \Rightarrow \quad \mu_{s,x,n} = \frac{e^{\mathbf{x}_{s,n}^\top \boldsymbol{\delta}}}{E_{s,x,n}} e^{w_{s,x,RCP,n}}$$

Alors, le terme $e^{w_{s,x,RCP,n}}$ est applicable à une force de mortalité $\mu_{s,x,n}$ en tant que pénalité résultante des canicules survenues sur l'année n du RCP 8.5 ou 2.6 et est proportionnel aux dommages associés sur le groupe de sexe s et d'âge x (RCP 2.6 en Figure 2, RCP 8.5 en Figure 3 et facteurs moyens par scénario en Figure 4).

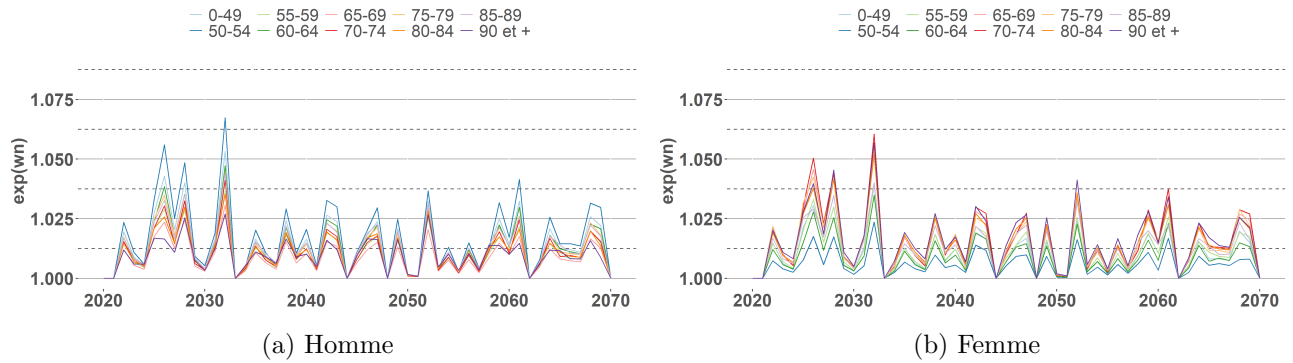


FIGURE 2 : Facteur e^{w_n} annuel sur les canicules pour les hommes et les femmes, scénario RCP 2.6.

¹en réalité, les données sont disponibles jusqu'en 2100, mais dans le cadre de cette étude, on s'arrête en 2070 soit la fin des tables de mortalité prospectives INSEE

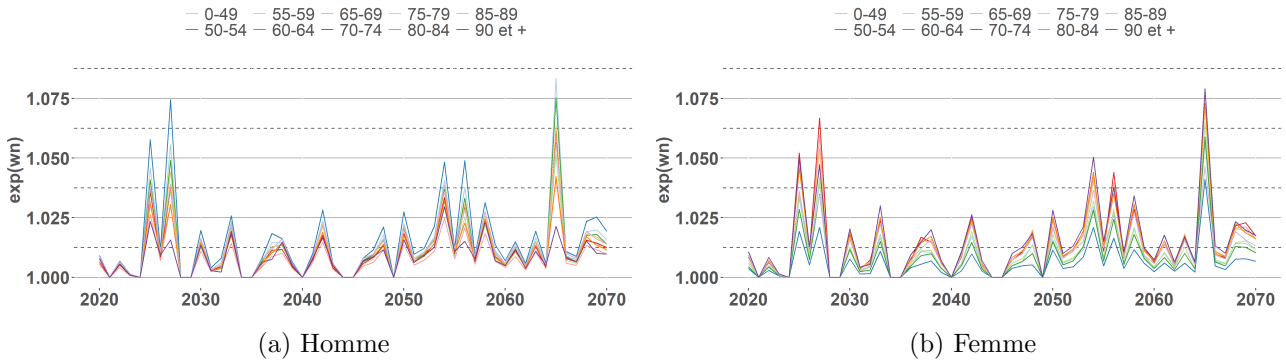


FIGURE 3 : Facteur e^{w_n} annuel sur les canicules pour les hommes et les femmes, scénario RCP 8.5.

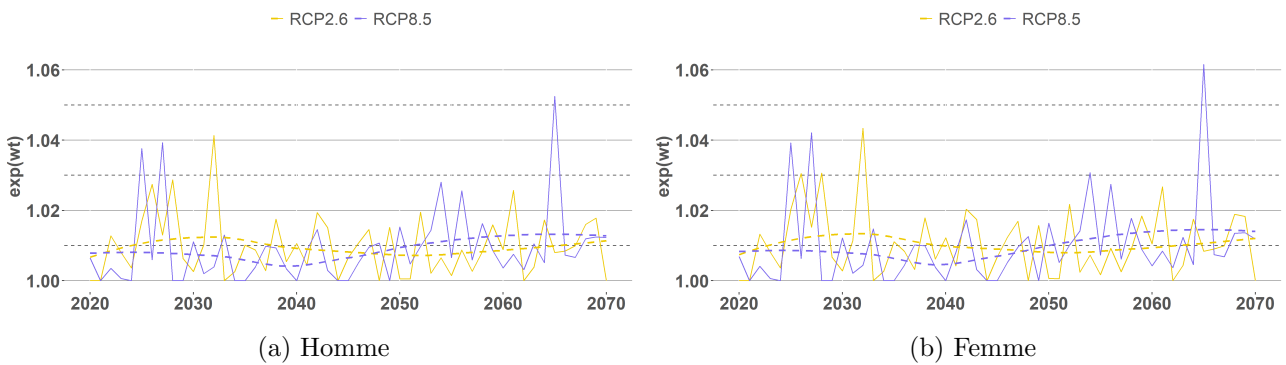


FIGURE 4 : Facteur e^{w_n} annuel moyen pour les hommes et les femmes tout âges confondus.

Les facteurs reflètent les conditions météorologiques telles qu'envisagées par le scénario considéré (RCP 8.5 ou 2.6). Les pics correspondent à l'apparition d'une ou plusieurs vagues de chaleur. Ils sont plus ou moins marqués en fonction de l'intensité et du nombre de jours de canicule survenus en année n (Figure 3).

Les tables de mortalité prospectives de l'INSEE sont détaillées par sexe, elles sont chacune pénalisée par les séries de facteurs correspondants (en âge x , sexe s et année n) pour établir des variantes de tables « choquées ». En supposant la fonction de hasard constante selon l'âge et l'année, on a : $\mu_{x,n} = -\ln(1 - q_{x,n})$. On calcule ensuite $\mu_{x,n}^{85}$ pour le scénario RCP 8.5 et $\mu_{x,n}^{26}$ pour le RCP 2.6 de la façon suivante pour tout x et n

$$\mu_{x,n}^{85} = \mu_{x,n} e^{w_{x,n}^{85}} \quad \text{et} \quad \mu_{x,n}^{26} = \mu_{x,n} e^{w_{x,n}^{26}}.$$

Pour ces trois tables prospectives, on déduit les espérances de vie résiduelles à un âge x ainsi que le nombre de décès associé en utilisant les projections de populations Omphale de l'INSEE (INSEE, 2016). Les projections en nombre de décès sont calculées par vague et année. Une vague de chaleur se compte en nombre de jours de canicule consécutifs. Le nombre de décès considéré comme lié aux températures correspond à l'écart entre le nombre de décès résultant de la table de référence (INSEE) et du nombre de décès issus des 2 tables « choquées » par scénario climatique. En moyenne entre 2020 et 2070 les vagues de chaleur seraient responsables de 7 000 à 7 800 décès par an pour ces deux trajectoires. La différence homme-femme évoquée précédemment se ressent avec un millier de décès en écart au détriment des femmes. Les dynamiques des deux scénarios diffèrent après 2050, le 2.6 est plus stable et présente moins de canicules qu'en période 2020-2050, en revanche le 8.5 continue une ascension tant en fréquence qu'en intensité des vagues. En moyenne entre 2020 et 2050, sur le scénario

2.6, on comptabilise 7 878 décès additionnels annuels et 4 925 sur le 8.5. La différence entre les deux scénarios avant 2050 s’explique par les caractéristiques des trajectoires empruntées. Il s’agit d’une unique simulation comportant une part d’aléatoire dans l’apparition de phénomène climatique comme les canicules. Entre 2020 et 2050 la simulation issue du RCP 2.6 présente de nombreuses canicules sur quasiment chaque année. En moyenne les facteurs d’impact, tous âges confondus sont supérieurs à ceux issus de la simulation RCP 8.5 jusqu’en 2050. Après 2050, la tendance s’inverse, le nombre de décès commence à réduire sur le 2.6 (7 593 décès/an) et augmente brutalement sur le 8.5 (10 260 décès/an). Le nombre de décès est dépendant des cohortes, c’est-à-dire de la taille de la population et de sa répartition par âge. L’indicateur espérance de vie (Table 1) s’avère plus approprié de ce point de vue puisqu’il prend en compte les particularités démographiques des époques considérées. On regarde ici l’espérance de vie à 70 ans (pour bien voir l’évolution du climat entre 2020 et 2070). D’après les projections INSEE, l’espérance de vie à 70 ans passerait de 17.8 années en 2020 contre 22.3 années en 2070 pour les hommes et de 21.37 à 24.74 années pour les femmes. Ces estimations ne prennent pas en compte l’impact potentiel des prévisions climatiques sur la mortalité. En appliquant des pénalités issues des vagues de chaleur telles qu’envisagées par les deux trajectoires extraites du modèle climatique CNRM-CM5 sur le RCP 8.5 et 2.6, ce prolongement de vie pourrait légèrement se réduire. En 2020 et 2030, la perte issue du RCP 2.6 s’avère supérieure à celle du 8.5 ($[-0.1; -0.11]$ pour le 2.6 contre $[-0.07; -0.08]$ pour le 8.5), cela est dû à la trajectoire empruntée par ce scénario, il présente un plus grand nombre de canicules entre 2020 et 2050 que la trajectoire du RCP 8.5. Ce qu’il est intéressant de regarder ici est plutôt la dynamique d’évolution de ces pertes. Que ce soit pour les hommes ou pour les femmes, sur le scénario 2.6 la perte s’atténue au fil des décennies alors que pour le 8.5, elle augmente et double même chez les femmes en passant de -0.08 à -0.16 années (Table 1).

	Homme			Femme		
	INSEE	RCP 2.6	RCP 8.5	INSEE	RCP 2.6	RCP 8.5
2020	17.80	-0.10	-0.07	21.37	-0.11	-0.08
2030	19.15	-0.08	-0.06	22.22	-0.10	-0.09
2040	20.55	-0.07	-0.08	23.44	-0.10	-0.12
2050	21.66	-0.07	-0.09	24.33	-0.09	-0.15
2060	22.20	-0.06	-0.09	24.68	-0.09	-0.15
2070	22.30	-0.07	-0.11	24.74	-0.09	-0.16

TABLE 1 : Espérance de vie à 70 ans

Pour autant, ce ne sont ici que deux trajectoires types issues de ces scénarios intégrant une partie de hasard dans la probabilité d’apparition d’épisodes caniculaires. Les résultats partagés sont donc très dépendants de ces deux chemins qui ne peuvent à eux seuls traduire chaque scénario. Avoir un échantillon de trajectoires par scénarios permettrait d’affiner les résultats et de réduire la part de hasard qui est assez importante dans l’étude de phénomènes extrêmes. Dans les résultats présentés, les prédictions relatives au RCP 2.6 semblent plus pessimiste que le 8.5 sur les premières années, or d’un point de vue température, les deux scénarios évoluent similairement jusqu’en 2050, puis quand l’un se détériore et voit ses températures fortement augmenter (8.5), le second s’apaise pour retrouver des niveaux plus raisonnables (2.6). L’étude s’arrête ici en 2070 (fin des tables prospectives), pour autant sur le pire scénario climatiques des canicules extrêmement longues et intenses sont attendues après cette date, elles pourraient durer plus d’un mois et apparaîtraient chaque année (Figure 5).

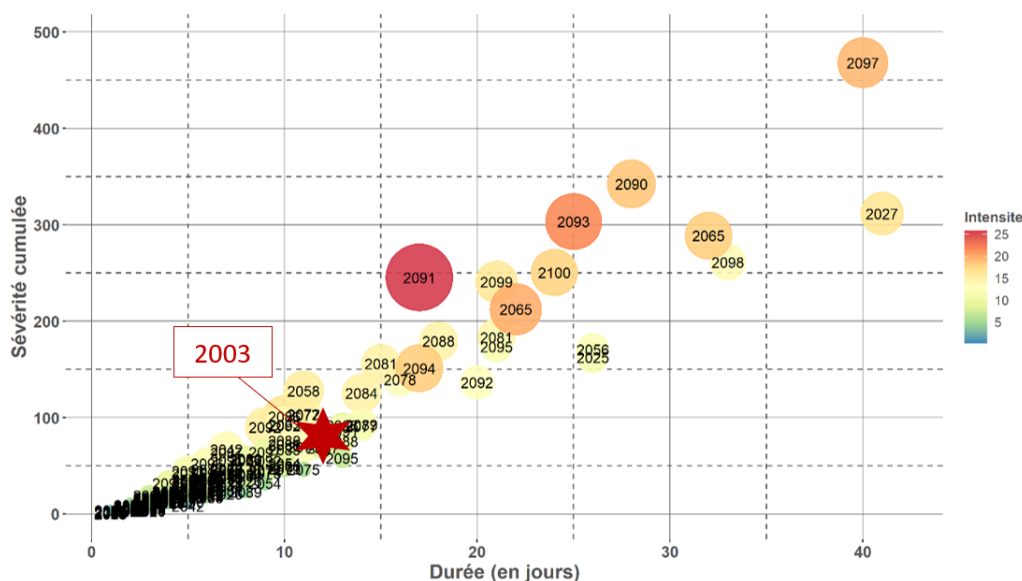


FIGURE 5 : Vagues de canicule à l’horizon 2100 pour le scénario RCP 8.5 du GIEC.

Conclusion

Il est de plus en plus régulier d’observer des épisodes de canicules en France métropolitaine. L’apparition de ces phénomènes est d’une part plus fréquente et d’autre part plus durable et intense. Les vagues de chaleur ne sont pas sans impact sur l’Homme, elles entraînent une surmortalité parfois très conséquente (plus de 15 000 décès en 2003). Les modélisations de l’évolution de la mortalité sont des extrapolations des tendances passées. Le changement climatique pourrait compromettre ces projections. Le GIEC propose plusieurs trajectoires d’évolution du climat, de la plus optimiste (RCP 2.6) à la plus pessimiste (RCP 8.5). À partir des canicules issues de ces trajectoires, des impacts sur les taux prospectifs de mortalité ont été estimés afin de les intégrer aux tables de mortalité prospectives actuellement en vigueur. Avec ces nouvelles tables incluant un facteur climat des estimations tant en nombre de décès qu’en espérance de vie sont proposées. Les canicules pourraient entraîner une surmortalité de l’ordre de 7 000 à 7 800 décès en moyenne chaque année et réduirait l’espérance de vie¹ de l’ordre d’un dixième d’année en 2020, ce chiffre se réduirait à l’avenir pour le RCP 2.6 et pourrait aller jusqu’à doubler pour le RCP 8.5. La modélisation de la mortalité est un enjeu crucial en actuariat et permet par exemple la détermination des taux de rentes (liés à l’espérance de vie). Les résultats présentés ici supposent qu’une prise en compte du risque climatique en assurance-vie s’avère significative.

Il faut tout de même nuancer ces résultats. Le lien entre température et mortalité est modélisé avec les observations passées. Seulement très peu de canicules historiques ont des durées et intensités importantes, ce qui ferait d’elles des canicules similaires à celles prévues dans les projections climatiques. Des incertitudes découlent également des projections climatiques utilisées, celles-ci sont uniques et ne fournissent qu’un exemple de trajectoire par scénario. De plus, les estimations réalisées ici ne prennent pas en compte l’acclimatation des populations, celle-ci pourrait réduire les dommages liés à la chaleur. Cette part d’acclimatation est difficilement modélisable, elle comprend d’une part les moyens de protection comportementaux (air conditionné, isolation des habitats...) et d’autre part l’adaptation physiologique humaine. Face aux nouvelles preuves en matière de changement climatique (GIEC,

¹à 70 ans

2021), la protection des populations est un enjeu primordial dans les actions publiques visant à réduire les dommages induits par les vagues de chaleur.

La modélisation de la mortalité est un élément essentiel dans le domaine assurantiel. Elle permet d'estimer au mieux les engagements futurs de l'assureur (produits d'assurance-vie, prévoyance, retraite, etc.). Les risques climatiques ne sont pas pris en compte dans cette modélisation. L'étude menée ici s'inscrit dans une démarche de réflexion sur la prise en compte du risque climat en mortalité et, du fait de sa complexité, nécessiterait d'être approfondie. Au-delà de la mortalité, le changement climatique engendre des dépenses conséquentes. Ces coûts pourraient avoir des impacts sur les frais de soin et les arrêts de travail engendrant des coûts conséquents et non-attendus pour les mutuelles et assureurs.

Remerciements

Je souhaite avant tout présenter mes sincères remerciements à Quentin GUIBERT et Frédéric PLANCHET sans qui la réalisation de ce mémoire n'aurait pas été possible. Je me sens extrêmement privilégiée d'avoir eu un tel encadrement. Ils m'ont accordé de leur temps et je suis bien consciente qu'il est très précieux. C'est grâce à leur accompagnement, leurs conseils, et corrections pendant ces 6 mois qu'il m'est possible de présenter ce mémoire aujourd'hui.

Je remercie le réseau Quetelet Progedo Diffusion, réseau français des centres de données pour les sciences sociales qui acte pour la diffusion des données auprès des chercheurs et étudiants et qui m'a permis d'obtenir mes données de décès provenant de l'état civil.

Je remercie également le cabinet Prim'Act dans son ensemble, en particulier Edouard PORCEL qui est mon tuteur au sein du cabinet et qui m'a accompagnée sur ces 6 mois, ainsi que Ludovic POIRAUD avec qui j'ai beaucoup travaillé et qui m'a encadrée sur ma principale mission.

Merci à l'ensemble du corps enseignant de l'EURIA avec une attention particulière à l'égard de Marine HABART.

Un énorme merci à ma famille, mes parents, mon frère, pour leur soutien inconditionnel. Merci de m'avoir encouragée, soutenue, et en particulier durant la rédaction de ce mémoire : avoir supporté mon humeur.

Table des matières

Résumé	3
Abstract	4
Note de Synthèse	5
Remerciements	13
Table des matières	15
Introduction	17
1 Impacts températures-mortalité	19
1.1 Saisonnalité des décès	21
1.2 Observations saisonnières	24
1.3 Liens entre chaleur et mortalité	30
1.4 Impact des vagues de froid	43
2 Canicule et mortalité	49
2.1 Définition et outils de mesure	49
2.2 Historiques des températures et canicules en France	50
2.3 Analyse détaillée de 3 épisodes de canicules historiques	57
3 Modélisation des effets températures sur la mortalité	65
3.1 Modèle CSDL - Constrained Segmented Distributed Lag Model	65
3.2 Intégration d'un facteur température	68
3.3 Mise en place et comparaison des variables explicatives	70
3.4 Critère de qualité	71

3.5	Étude de la sensibilité du modèle	71
3.6	Comparaison des variables explicatives	80
3.7	Choix des paramètres pour la calibration du facteur température	85
4	Évaluation prospective	87
4.1	Trajectoires climatiques et scénarios du GIEC	87
4.2	Modélisation prospective de la population	96
4.3	Impact du risque canicule sur la mortalité	97
4.4	Perspectives en assurance	112
	Conclusion	117
	Bibliographie	119
A	Annexes	125
A.1	Projection des polluants atmosphériques	125
A.2	Résultats complémentaires sur l'impact des UV	128
A.3	Des tableaux	129
A.4	Des graphiques	137

Introduction

Le lien entre température et mortalité fait l'objet de nombreuses études et recherches. Il constitue une problématique grandissante à la vue des projections climatiques actuelles. Les principales études sont rétrospectives et évaluent les liens et les répercussions entre ces deux agents en tentant d'identifier des facteurs d'atténuation ou d'aggravation. Dans un contexte assurantiel où l'étude de la mortalité fait l'objet d'une attention particulière, très peu de travaux actuariels étudient ce lien. Ce mémoire s'inscrit donc dans une démarche d'ouverture et de questionnement sur la prise en compte des risques climatiques en mortalité.

Les vagues de chaleur sont la principale cause de décès liée au climat (WHO, 2017) à l'instar de la canicule de 2003 responsable de plus de 70 000 décès en Europe. L'été 2021 met en évidence l'augmentation en fréquence des événements extrêmes comme les dômes de chaleur apparus en juillet au Canada et en août au Maghreb. Malgré la mise en place de mesures protectrices, les impacts sanitaires restent significatifs.

Les projections climatiques telles que celles utilisées par le GIEC (GIEC, 2014) s'accordent et estiment l'augmentation des épisodes de canicule tant en fréquence qu'en intensité comme inévitable. Les conséquences de telles vagues pourraient s'avérer largement plus conséquentes à l'avenir.

Bien que le secteur assurantiel s'intéresse depuis de nombreuses années aux risques climatiques, très peu d'études s'appliquent aux impacts du climat sur la mortalité. Parallèlement, des tables de mortalité prospectives sont proposées par différents organismes, pour anticiper les évolutions de mortalité et d'espérance de vie. Ces tables ont en commun que les tendances futures d'amélioration de la mortalité sont des extrapolations des tendances passées. Le changement climatique pourrait changer ce rythme d'évolution et, dès lors, il est important de chercher à intégrer les informations induites par ce nouveau contexte dans les projections.

Dans ces circonstances, on tente dans ce mémoire de quantifier et d'évaluer les risques physiques liés aux canicules à l'horizon 2070. Une première partie recense l'ensemble des effets induits par le climat sur la mortalité, les facteurs influençant la sensibilité d'une population, les moyens de protection et les dommages collatéraux. Elle est suivie d'une étude plus précise sur les impacts des canicules historiques en France métropolitaine. Une modélisation du lien température-mortalité est proposée dans le troisième chapitre complété d'une étude de sensibilité du modèle. Enfin, une estimation prospective de l'impact des canicules en mortalité est proposée en se basant sur deux scénarios climatiques (un optimiste et un pessimiste).

Chapitre 1

Les impacts connus des températures sur la mortalité

Il n'est pas anodin d'attribuer au climat une quantité innombrable de résultantes : l'humeur, les troubles physiques, les infections, la maladie voire le décès. Les grands philosophes des Lumières en faisaient déjà un constat. Montesquieu dans sa « théorie des climats », tirée de son ouvrage « De l'esprit des lois » en 1748, caractérise le chaud et le froid comme des variants sur les activités et les relations humaines : l'Homme est sensible et exposé face aux variations climatiques.

“Les climats, les saisons, les couleurs, l'obscurité, la lumière, les éléments, les aliments, le bruit, le silence, le mouvement, le repos, tout agit sur notre machine et sur notre âme “

Rousseau, 1782

Beaucoup de ces liens, en particulier psychiques, n'ont pas été prouvés scientifiquement et de nombreuses interrogations persistent sur l'impact physique. L'émergence de la bioclimatologie, science qui étudie les liens entre climat et santé humaine, permet d'approfondir les recherches et de répondre à certaines questions.

Cette première partie évalue les liens directs et indirects entre les températures et la mortalité. Pour se faire, des observations fines sont nécessaires : les données de décès et de températures doivent être à un pas journalier. Une distinction en fonction du sexe et de l'âge sur les décès permettra d'étudier différentes sensibilités. Pour les données de mortalité l'obtention d'un détail aussi fin n'est pas disponible directement en open source sur un historique conséquent. Il doit faire l'objet d'une demande particulière auprès du réseau Quetelet-Prodego Diffusion, réseau français des centres de données pour les sciences sociales. Il s'agit d'un portail qui met à disposition des chercheurs et étudiants un grand nombre de données par une mise en relation avec les institutions concernées, ici l'INSEE. L'équipe ADISP offre la possibilité d'effectuer des tableaux sur mesure. La demande s'est portée sur une agrégation des décès de l'état civil en sélectionnant plusieurs variables disponibles telles que le sexe, l'âge du défunt, la catégorie socioprofessionnelle, la tranche urbaine, le département et la région du décès. Les décès sont uniquement sélectionnés pour la France métropolitaine entre les années 1975 et 2019. La référence concernée est :

- Etat civil – Décès : Tabulation sur mesure, INSEE [producteur], ADISP [diffuseur]

Les relevés de température utilisés dans ce mémoire proviennent de la base de données GHCN (Global Historical Climatology Network¹). Cette base rassemble plus de 20 sources différentes et contient les principales informations climatologiques observables à la surface du globe, par station. Elle est soumise à plusieurs phases de test et processus de validation pour s'assurer de l'exactitude de ces données. Les données les plus anciennes de la BDD GHCN peuvent avoir jusqu'à 175 ans, et dans le cas des températures cela pose divers problèmes. Les stations météo, au fur et à mesure des années, ont évolué techniquement, migré d'un lieu à un autre ou ont pu être recalibrées. C'est pourquoi des algorithmes et processus de recalibrage ont été appliqués sur cette base (CLIMATE DATA RECORD (CDR) PROGRAM, 2018).

De nombreux relevés de stations météorologiques à travers le monde sont disponibles et notamment pour la France métropolitaine. Pour quadriller au mieux le territoire français sur la période 1950-2020, 14 stations sont sélectionnées. Pour chacune d'entre-elles les relevés journaliers donnent accès à la température moyenne, minimale, et maximale. Malgré les retraitements réalisés en amont, certaines données sont manquantes. Deux des 14 villes n'ont aucun relevé pour certaines dates. C'est le cas de la station de *Tours, Fr* qui commence ses observations à partir de 1959, et *Paris le Bourget, Fr* avec une absence de données de l'ordre de 0.28% répartie entre 1950 et 2019. Dans les autres cas il s'agissait de températures moyennes absentes (32.6% de l'effectif), une moyenne entre la température minimale et maximale est alors calculée. Pour les températures minimales et maximales manquantes, (0.81% et 1.33% respectivement), on remarque que cela provient exclusivement des relevés pour l'année 2020 ou de la station de *Paris le Bourget, Fr*. Il est décidé de supprimer l'année 2020 de l'étude, ce qui aurait probablement dû intervenir plus tard dans les travaux à cause du biais généré par la surmortalité liée à la COVID19. Les données manquantes pour Paris sont remplacées en totalité par les relevés des stations *Orly, Fr* et *Vallée de Seine, Fr*. En conclusion, cette base de données donne accès à l'ensemble des températures journalières historiques (moyennes, maximales et minimales) entre 1950 et 2019 pour 13 agglomérations de France métropolitaine (14 à partir de 1959 avec l'ajout des données de la ville de Tours).

Les retraitements de données et les travaux de ce mémoire sont réalisés sous R (R CORE TEAM, 2019). Les packages utilisés seront spécifiés au fur et à mesure.

¹<https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/land-based-station-data/land-based-datasets/global-historical-climatology-network-ghcn>

1.1 Saisonnalité de la mortalité en France

1.1.1 Constat de la littérature et observations sur les données

Dans une zone à climat tempéré comme la France, les saisons rythment la mortalité humaine. Le nombre de décès observé par mois de l'année varie significativement (Figure 1.1) avec un point culminant en hiver au plus froid de l'année, et un minimum durant les périodes les plus chaudes (hors canicule). La différence peut atteindre de 10 à 20% en fonction du mois observé (PELTIER, 2016). Ce phénomène est historiquement bien connu mais pour autant, il n'est pas entièrement compris à cause du nombre de facteurs mis en cause (maladies et épidémies, activités physiques réduites, températures et aléas climatiques, activités humaines, etc.). Contrairement aux idées communes, la surmortalité hivernale n'est pas une résultante des épidémies grippales, mais est plutôt liée aux maladies sensibles au climat hivernal (maladies cardiovasculaires comme la cardiopathie, les maladies cérébrovasculaire ou encore respiratoires, etc.). Bien que certaines années les épidémies de grippe aient eu un impact significatif sur les décès observés, la tendance est à la baisse grâce aux campagnes de vaccinations ciblées sur les personnes vulnérables. D'autres mécanismes peuvent expliquer cette hausse de mortalité : l'hypothermie, qui est directement liée aux températures observées et qui touche principalement les sans-abris, ou encore les maladies hivernales.

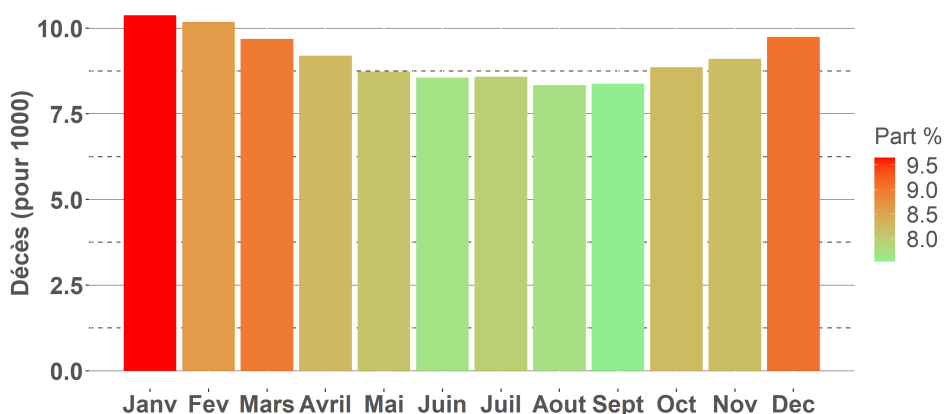


FIGURE 1.1 : Taux de décès mensuel (pour 1 000) en vision annualisée et répartition en % par mois en France, données INSEE de 1975 à 2019.

Il existe une différence de sensibilité entre les hommes et les femmes. Lors des périodes hivernales, les femmes présentent une surmortalité légèrement plus importante que celle des hommes et inversement, en cas de sous-mortalité, celle-ci sera plus conséquente chez les femmes. Au global, cette sensibilité accrue des femmes place les deux sexes à égalité face à l'exposition saisonnière (voir partie 1.3.2). L'âge est également un facteur déterminant dans l'étude de la saisonnalité des décès. Une personne jeune (tranche 0-24 ans) a une probabilité plus importante de décéder en été, alors qu'une personne plus âgée (plus de 65 ans) aura plutôt tendance à décéder en hiver. Les taux de mortalité des personnes aux âges intermédiaires sont quant à eux plus stables (PELTIER, 2016).

1.1.2 Mesure de la saisonnalité

Sur la série des taux de décès depuis 1975, une saisonnalité se dégage clairement. Afin de pouvoir la mesurer, la série est d'abord retraitée de sa tendance, qui est modélisée par un polynôme de degré 5 (Figure 1.4). La saisonnalité est ensuite mesurée sur la série à partir de coefficients dépendants de la fréquence des données, ici 365.25. Pour chaque 0.25 jour un coefficient est déterminé à l'aide de la fonction $tslm()$ du package *Forecast* (HYNDMA et al., 2021). Ainsi, en visualisant la série brute retraitée de sa tendance (gris) et le modèle de saisonnalité (rouge), la variation cyclique observée est bien approchée avec un R^2 de 0.588 (Figure 1.2).

On a alors $T_{avg_t} - T_t = S_t + \epsilon_t$, avec :

- T_t la composante tendancielle modélisée par un polynôme de degré 5,
- S_t la composante saisonnière,
- ϵ_t composante aléatoire.

Des valeurs extrêmes subsistent et sont régulièrement en dehors de la saisonnalité classique. En hiver (sur les crêtes supérieures), de nombreuses périodes dépassent largement la courbe de saisonnalité alors qu'en été les décès réels et modélisés sont beaucoup plus proches. Pour vérifier si des mois respectent plus que d'autres la saisonnalité, les p-value par coefficient sont tracées (Figure 1.3). Le constat visuel se confirme, les p-value pour les mois de décembre, janvier, février et mars sont plus élevées que pour le reste de l'année et attestent d'une significativité moins importante du coefficient.

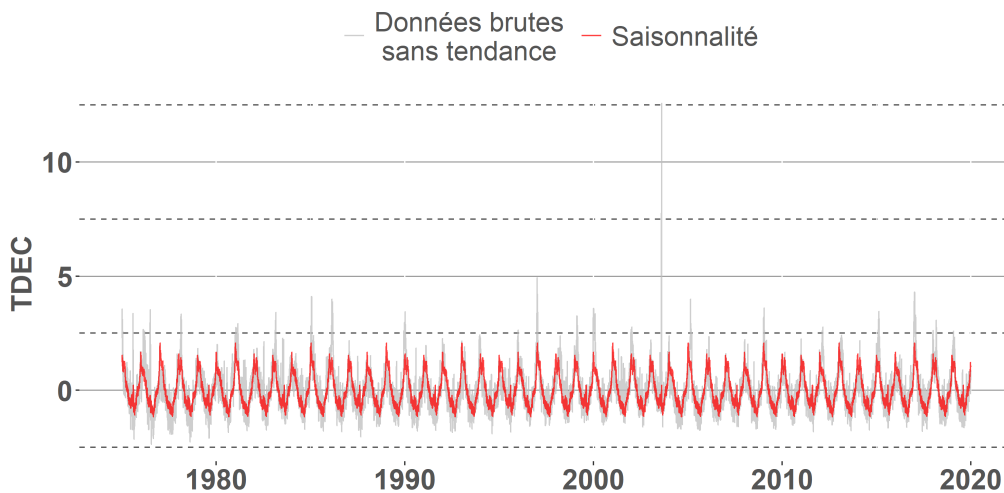


FIGURE 1.2 : Taux de décès mensuel (pour 1 000) en vision annualisée retraités de la tendance et courbe de saisonnalité, données INSEE de 1975 à 2019.

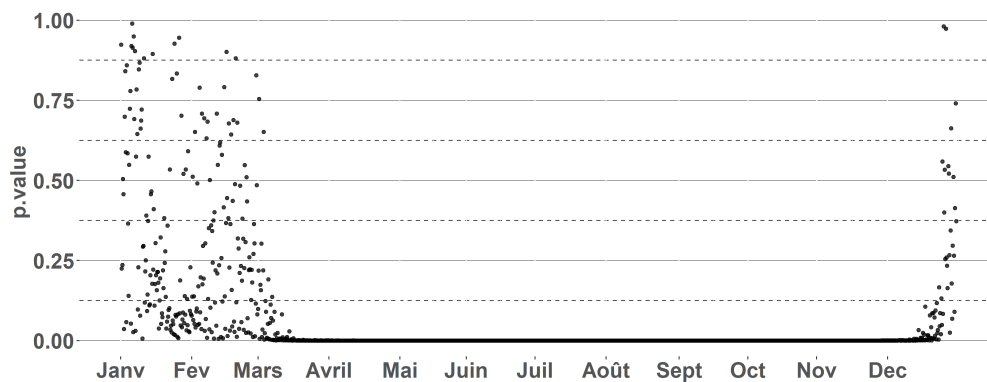


FIGURE 1.3 : P-value des coefficients de saisonnalité.

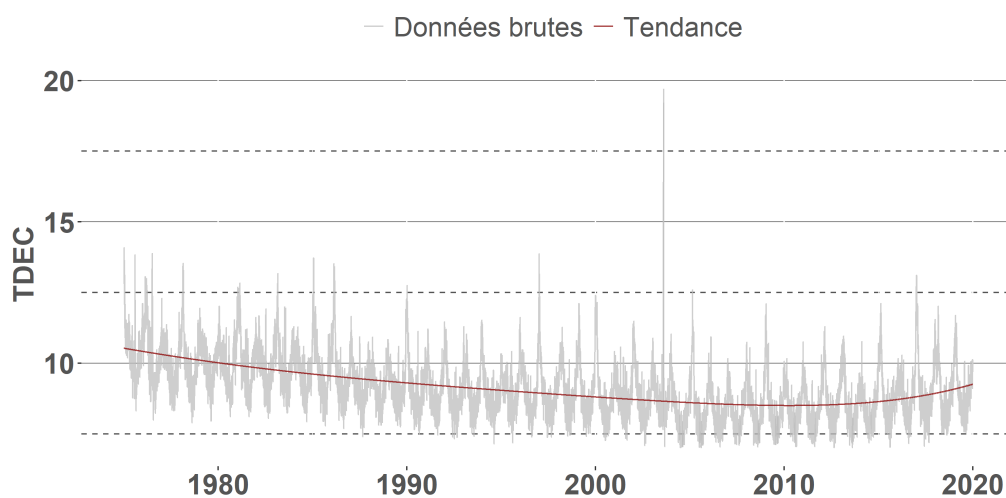


FIGURE 1.4 : Taux de décès mensuel (pour 1 000) en vision annualisée et tendance polynomiale, données INSEE de 1975 à 2019.

1.2 Observations saisonnières sur la mortalité française

1.2.1 Les événements saisonniers et la mortalité engendrée

Certains événements externes (climatiques ou épidémiques) peuvent fortement impacter la répartition annuelle des décès. La Figure 1.5 présente les taux de décès mensuels et annualisés pour 1 000 habitants sur différentes années. Les principales explications de surmortalité sont les épidémies (de grippe et de la COVID19 en 2020) et les canicules. Des écarts peuvent être constatés en fonction de l'année observée et s'expliquent par l'amélioration de l'espérance de vie et le vieillissement de la population. Alors que les taux de décès montraient une décroissance sur les années 1990-2000, la tendance s'est inversée depuis 2007. La pyramide des âges continue de voir la part des plus âgés augmenter et explique des taux plus élevés sur les années récentes.

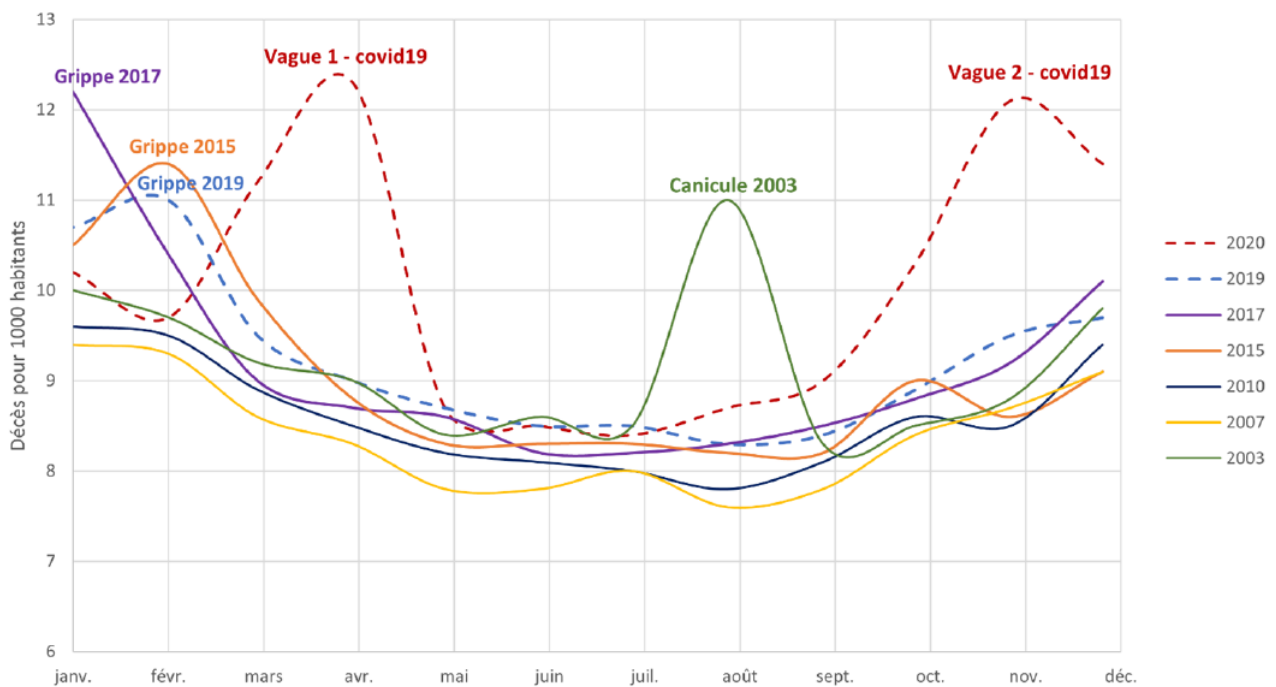


FIGURE 1.5 : Taux de décès mensuels pour 1 000 habitants en France par année, données INSEE (INSEE, 2021).

En hiver, certaines épidémies de grippe ont impacté les taux de mortalité : alors qu'habituellement, en janvier/février, il est comptabilisé de 9 à 10 décès pour 1 000 habitants, ce taux a pu atteindre 12.2 en janvier 2017, 11.5 en février 2015 et 11.0 en février 2019. En été, le risque provient des vagues de chaleur, la canicule de 2003 est largement marquée avec un pic en août à 11.0 soit presque 4 points de plus qu'en période estivale classique. Cette canicule sévère s'observe facilement, mais avec une vision mensuelle comme ici, il est plus difficile d'observer une surmortalité liée à d'autres canicules. La première explication est d'abord quantitative : le nombre de décès liés aux vagues de chaleur n'est pas assez important pour impacter le taux mensuel. La seconde peut provenir de l'effet moisson typique des canicules : une surmortalité rapide est d'abord observée avant de subir un rattrapage (sous-mortalité). Alors, sur une large période d'observation, aucune variation ne sera visible.

1.2.2 Observations entre température moyenne et mortalité

Observation en vision annuelle

Les taux de décès évoluent au fil de l'année et suivent une saisonnalité (voir partie 1.1). Ils sont au plus bas en période estivale et printanière (entre avril et septembre) et atteignent leurs maximums en hiver. En traçant les courbes de tendance¹, deux paraboles de sens opposé apparaissent. Avec cette observation, il est légitime de s'interroger sur la véritable contribution des températures sur cette variation de décès ainsi que sa contribution aux variations journalières. Visualiser les courbes de tendance des deux agents permet d'établir un premier lien visuel d'évolution globale et quantitatif. L'accès au détail des variations journalières justifie une relation directe et quasi-immédiate des températures (ici en moyenne journalière) sur les décès survenus à la même date. À titre d'exemple, l'année 2010 est illustrée dans la suite de la partie, en rouge est tracé le taux moyen observé sur l'année.

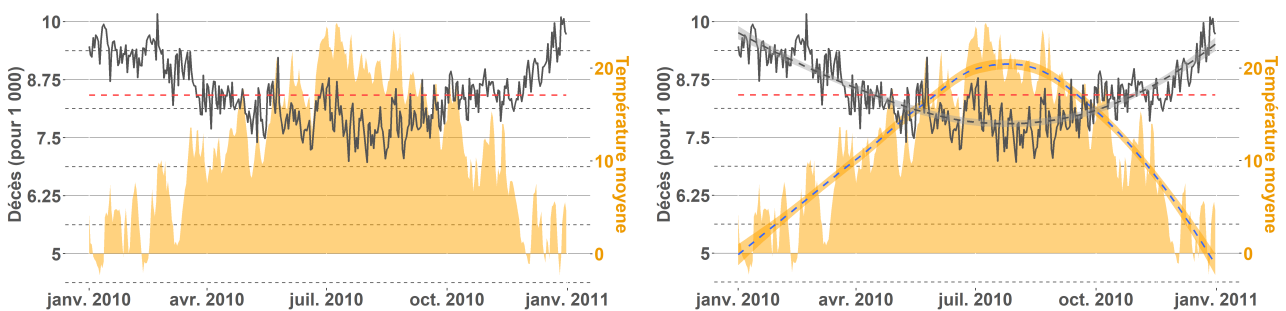


FIGURE 1.7 : Taux de décès et température moyenne en 2010, avec et sans courbe de tendance. La courbe grise correspond au taux de décès, l'air en orange représente la température moyenne, la ligne rouge : la moyenne des taux de décès sur l'année. Données INSEE et GHCN.

Observation en vision estivale

En été (de juin à août), les taux évoluent avec des dynamiques suivant quasi parfaitement celles des températures moyennes. Visuellement une corrélation forte et positive est observée.

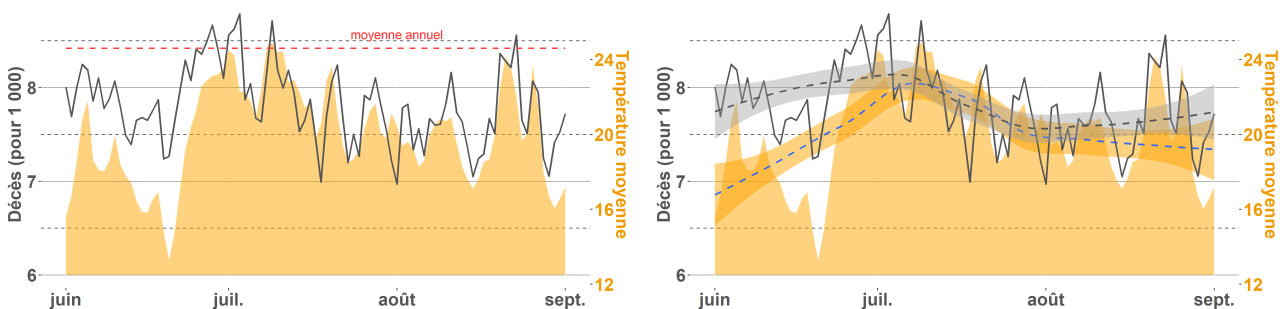


FIGURE 1.8 : Taux de décès et température moyenne en été 2010, avec et sans courbe de tendance. La courbe grise correspond au taux de décès, l'air en orange représente la température moyenne, la ligne rouge : la moyenne des taux de décès sur l'année. Données INSEE et GHCN.

¹Méthode loess

Observation en vision hivernale

En hiver (de décembre à mars), les taux et les températures évoluent en sens inverse, contrairement à l'été, la dynamique conjointe est ici largement moins forte. Pour mieux visualiser le lien, les taux en Figure 1.9b ont été multipliés par -1 afin d'établir si une corrélation négative existe. Le graphe est donc à lire attentivement en suivant l'échelle des décès qui décroît en montant. Cette différence journalière provient du retard des effets liés au froid. Lorsqu'en été, face à des températures élevées, une surmortalité immédiate est observée, le décalage temporel en hiver est plus long et moins marqué. C'est pourquoi au global les tendances des deux variables se recourent sans correspondre exactement au jour le jour.

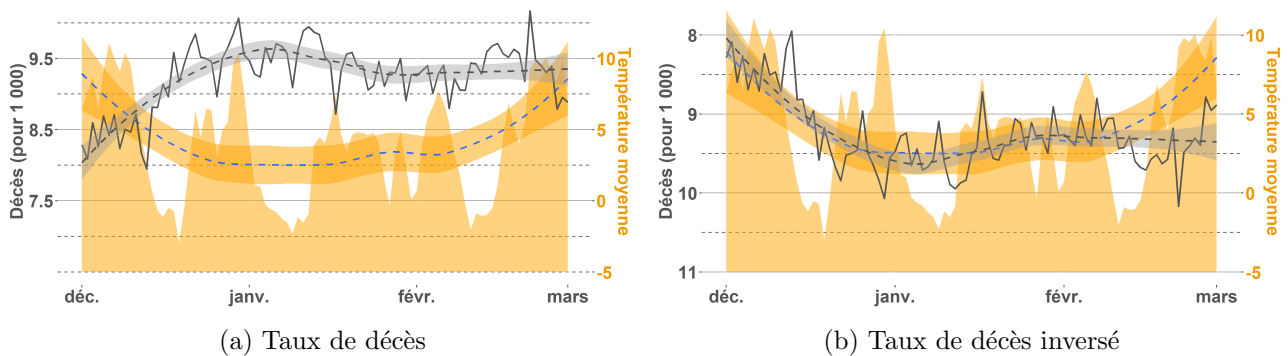


FIGURE 1.9 : Taux de décès, taux de décès inversés et température moyenne en hiver 2009-2010 avec courbe de tendance. La courbe grise correspond au taux de décès, l'air en orange représente la température moyenne. Données INSEE et GHCN.

Mesure du lien température-mortalité par régression entre température moyenne et taux de mortalité

Les taux de décès et les températures ont une saisonnalité similaire et l'un pourrait expliquer l'autre. En premier lieu, à partir d'un modèle de régression simple, les taux sont régressés par rapport à la température moyenne journalière sur l'année entière (Figure 1.10). La saisonnalité des températures coïncide avec la saisonnalité des décès, ce qui permet au modèle de régression de s'approcher des taux bruts. Le R^2 est alors de 0.3976. Pour évaluer si des effets supplémentaires autres que les variations saisonnières sont expliqués par les températures, les deux séries sont retraitées de leur saisonnalité et la même régression est faite. Sur l'année entière les variations de températures autres que la variation saisonnière expliquent très peu les variations dans les taux de décès (Figure 1.11). Sur l'année entière, les variations journalières des taux de décès ne sont pas expliquées simplement par les variations de température du même jour. Pourtant, un lien existe comme expliqué en début de partie. Pour mieux comprendre ce lien, deux zooms sont réalisés sur les saisons, un premier sur les 3 mois d'été (juin, juillet et août), et un second en hiver (décembre, janvier et février). Aucun retraitement de saisonnalité n'est nécessaire ici. Sur les 3 mois d'été, la régression fonctionne plutôt bien (Figure 1.12), le R^2 est alors de 0.33. La variable température est significative dans le modèle avec une p-value très petite ($< 2e^{-16}$). En revanche sur les 3 mois d'hiver, le lien direct n'est pas établi, le R^2 est de 0.015 et de la p-value plus importante ($2.53e^{-6}$) (Figure 1.13). L'explication provient du fait qu'en été, face à des températures élevées les décès interviennent rapidement et sont visibles dès le premier jour. Ce n'est pas le cas pour les températures hivernales qui ont des impacts sur un plus long terme. Ces phénomènes sont expliqués dans la suite de ce chapitre.

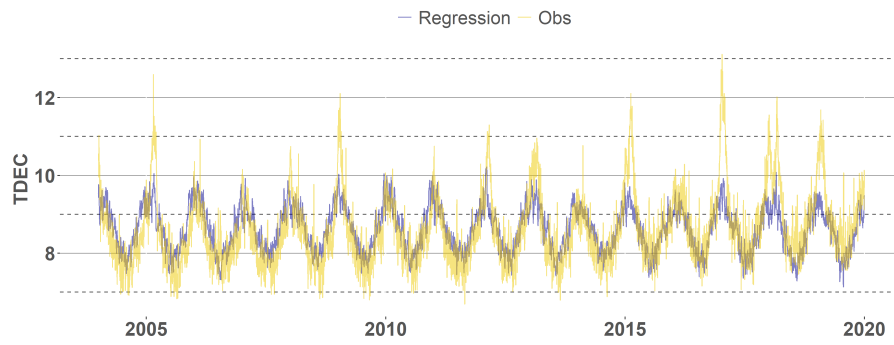


FIGURE 1.10 : Regression des taux de décès par la température moyenne.



FIGURE 1.11 : Regression des taux de décès par la température moyenne sur les séries désaisonnalisées.

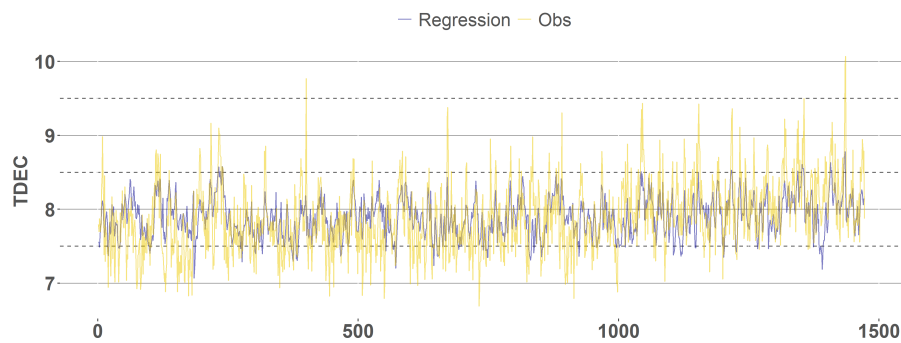


FIGURE 1.12 : Regression des taux de décès par la température moyenne sur les 3 mois d'été.

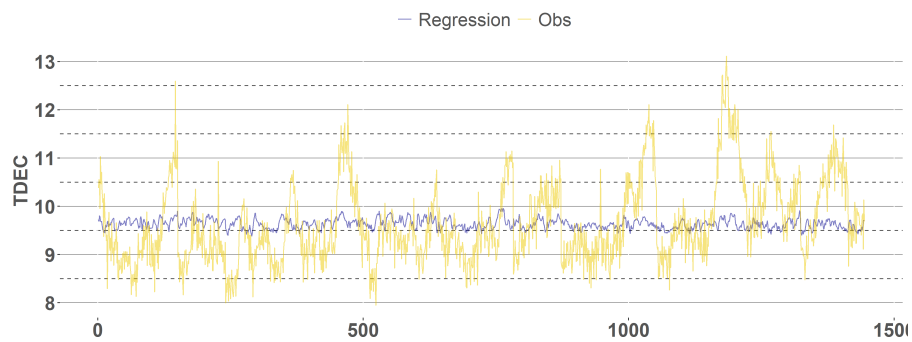


FIGURE 1.13 : Regression des taux de décès par la température moyenne sur les 3 mois d'hiver.

Relation température mortalité en "U" - "V"

Pour relier température moyenne et mortalité, il est préférable de travailler en tranche de températures afin d'éviter les fluctuations d'échantillonnage et pouvoir en dégager une tendance. Elle est estimée par régression non-paramétrique méthode loess pour s'ajuster au nuage de points. Les données utilisées ici sont des taux de décès journaliers et les températures moyennes sur la France métropolitaine. En travaillant sur des tranches de 1°C une tendance parabolique se dégage (Figure 1.14) et se rapproche des observations courantes de la littérature scientifique (BESANCENOT, 2000). Pour éviter des variations trop importantes sur les taux de mortalité liées à la période d'étude, les plages temporelles sont réduites à 10 ans pour minimiser les effets de structures d'âge. La prise en compte de l'année 2003 influe fortement sur la forme parabolique observable. Lors de la canicule de 2003 les taux ont atteint des valeurs beaucoup plus importantes que leurs valeurs habituelles (20 décès pour 1 000 au lieu de 8/9 observables habituellement au mois d'août en taux annualisé). Ces valeurs extrêmes influent sur la courbe température mortalité observée en Figure 1.14 (a) du côté de la chaleur. Hors année 2003, la pente est plus longue face aux températures hivernales et entraîne plus de décès que les températures élevées. Un creux est observable aux alentours de 18°C-20°C et correspond à l'optimum thermique, il s'agit de la température pour laquelle le minimum de décès est observé. Face aux températures élevées la pente est légèrement plus raide.

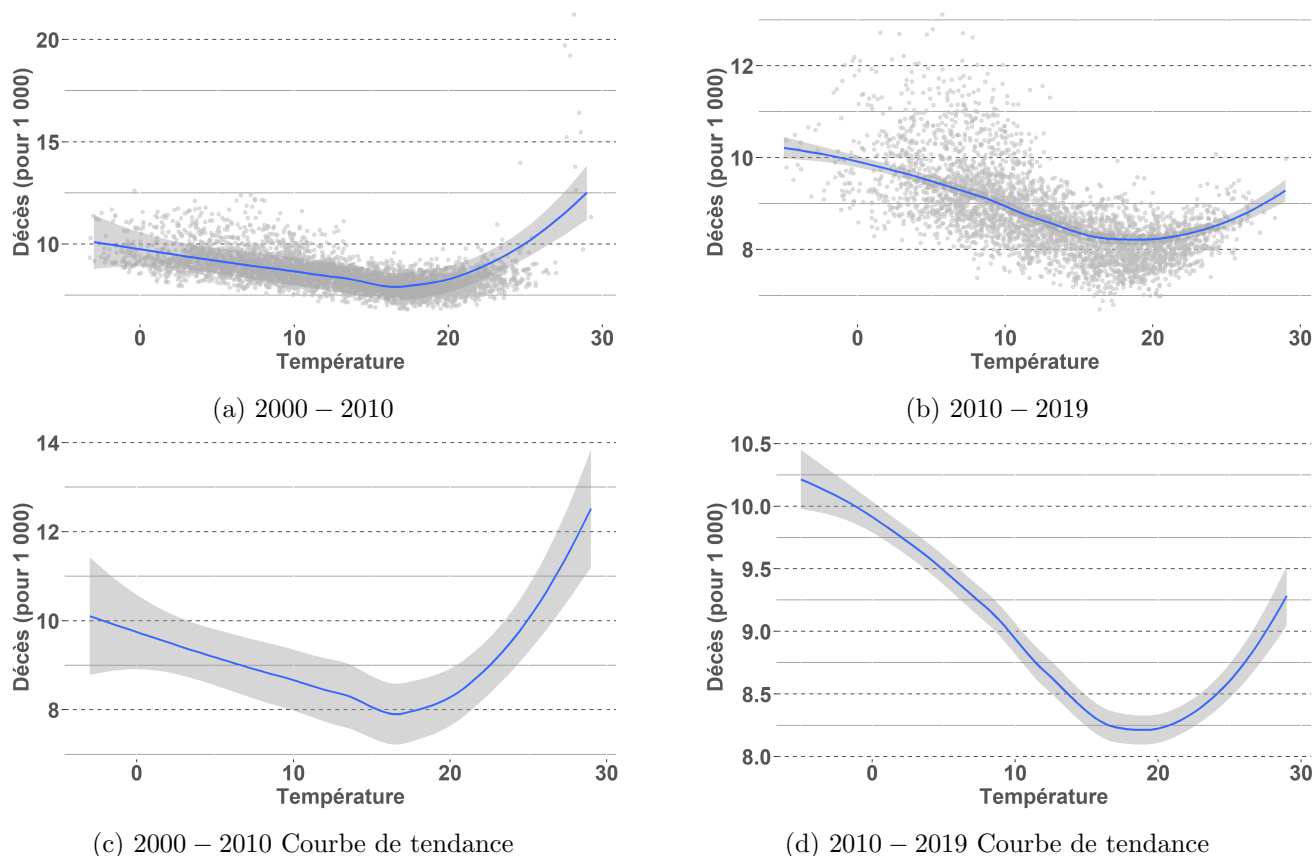


FIGURE 1.14 : Taux de décès annualisé pour 1 000 habitant en fonction de la température, nuage de points et courbe de tendance. Données INSEE et GHCN.

Corrélation de Pearson

Le coefficient de corrélation de Pearson permet d'identifier s'il existe une relation linéaire entre deux variables. Ce coefficient peut varier entre -1 et 1, avec 1 qui correspond à une relation parfaitement linéaire, 0 aucune corrélation et -1 une corrélation linéaire négative. Le but ici est d'identifier les différences de corrélation entre température et taux de décès en fonction du mois de l'année. Pour chaque mois m ce coefficient se calcule alors de la façon suivante :

$$r_m = \frac{\sum_{i=1}^{n_m} (q_{i,m} - \bar{q}_m) (T_{i,m} - \bar{T}_m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n_m} (q_{i,m} - \bar{q}_m)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{n_m} (T_{i,m} - \bar{T}_m)^2}}$$

Avec r_m le coefficient du mois m , n_m le nombre de jour du mois m , q_i le taux de décès du jour i , \bar{q}_m le taux de décès moyen sur le mois m , T_i la température du jour i et \bar{T}_m la température moyenne du mois m .

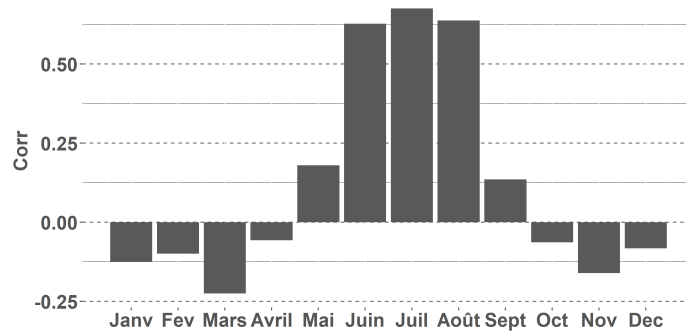


FIGURE 1.15 : Corrélation de Pearson température moyenne et taux de décès par mois de l'année, données de 2010 à 2019.

Les corrélations les plus importantes sont observées sur les mois de l'été (juin, juillet, août) où des températures extrêmes peuvent être enregistrées et ayant un impact direct sur la mortalité. La corrélation en hiver est négative : une baisse des températures entraîne une hausse des décès. Mais les coefficients sont eux moins élevés. Dans la mesure où les effets sur les décès en hiver ne sont pas tous immédiats, il faudrait prendre en compte les effets retardés pour vérifier si une corrélation plus importante peut être établie. Concernant les mois à température douce (avril, mai, septembre, octobre), la corrélation calculée entre température et taux de décès est plutôt faible.

1.3 Liens entre chaleur et mortalité

1.3.1 L'organisme face aux vagues de chaleur

Une exposition aux fortes températures peut déclencher de l'hyperthermie, ou ce qu'on appelle plus communément coup de chaleur. Le corps humain devient de plus en plus chaud à cause de son environnement et non à cause de son activité interne, ce qui différencie l'hyperthermie de la fièvre. Elle peut devenir mortelle dans 15 à 20% des cas (INRS, 2021)¹, et provoque différents symptômes : pouls rapide, maux de tête, nausées, pertes de connaissance. . . Les autres symptômes classiquement associés aux grandes chaleurs sont les irruptions cutanées, la fatigue, les crampes de chaleur et la déshydratation. Une longue exposition peut également aggraver des maladies déjà présentes. C'est notamment le cas pour les pathologies cardiovasculaires, particulièrement sensibles aux températures extrêmes. Avec une saisonnalité des décès assez claire dans les pays à climat tempéré, la période d'été présente régulièrement des pics de surmortalité liés aux vagues de chaleur, tout particulièrement chez la population âgée.

La thermorégulation

L'homme est un être homéotherme, c'est-à-dire capable de stabiliser sa température interne face à des variations climatiques extérieures, ce qui lui permet de maintenir son compartiment central (organes vitaux) à une température constante de 37°C. Son compartiment périphérique (muscle, peau. . .) peut lui varier de 20 à 40°C. La chaleur est produite par thermogénèse : c'est grâce à l'absorption de nutriments couplée à l'oxygène que la respiration cellulaire produit la chaleur corporelle.

La perte de chaleur s'établit sous 4 vecteurs :

- La **convection**, l'air autour de la peau se réchauffe au contact de la peau. La perte de chaleur est d'autant plus importante avec un mouvement permanent de l'air dû au vent, mais ce mécanisme reste limité et n'est plus efficace lorsque la température interne dépasse 38°C (NICOLLE-MIR, 2016).
- La **conduction**, par le contact avec un objet.
- Le **rayonnement**, la peau cède de la chaleur par rayonnement infrarouge.
- L'**évaporation** provoquée par la sudation : son efficacité est dépendante du climat, favorisée par les mouvements d'air et défavorisée par une forte humidité.

Face à un bilan thermique déséquilibré il existe deux types de réponses :

- **La réponse physiologique** : face au froid, le corps se contracte par le frisson pour produire de la chaleur, et face à la chaleur, il produit de la sueur pour refroidir sa surface par l'évaporation.
- **La réponse comportementale** : utilisation de vêtements chauds, chauffage de maison et à l'inverse, hydratation corporelle, recherche de l'ombre, climatisation des maisons. . .

Face à l'absence de réponse comportementale suffisante, la réponse physiologique peut ne pas suffire et provoquer de l'hyperthermie (coup de chaleur) ou de l'hypothermie (coup de froid).

L'état physique (obésité, maladies diverses) et l'âge sont des facteurs primordiaux sur l'efficacité du fonctionnement biologique permettant la thermorégulation.

¹Institut National de Recherche et de Sécurité

1.3.2 Les facteurs de risque

L'impact de l'âge et des générations

Face aux vagues de chaleur, la population âgée est particulièrement à risque. Elle est exposée à diverses pathologies dont le coup de chaleur. L'explication est principalement physiologique : la personne âgée présente une déficience dans sa réponse thermorégulatrice qui avec l'âge est de moins en moins efficace. Cela se traduit par un manque de perception de la chaleur, une transpiration moins importante due à la baisse du nombre de glandes sudoripares, et une absence de la sensation de soif. Certains facteurs et maladies vont accentuer le risque face aux hautes températures : la dépendance, l'invalidité, l'isolement social, la présence de certaines pathologies ou encore d'un traitement à risque vis-à-vis de la chaleur comme les antihistaminiques ou les anti-inflammatoires non-stéroïdiens (SANTÉ PUBLIQUE FRANCE, 2015).

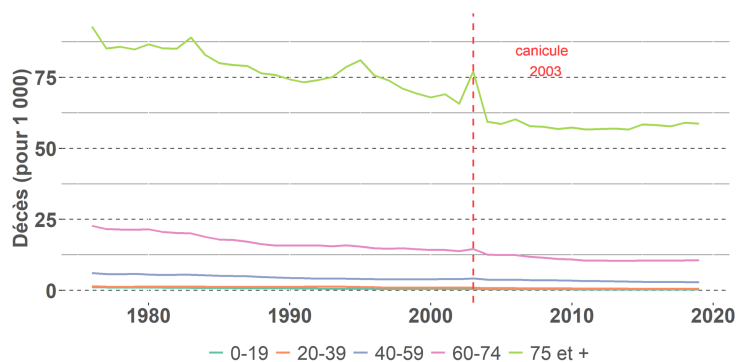


FIGURE 1.16 : Taux de décès mensuel annualisé par tranche d'âge. Données INSEE.

Les températures extrêmes étant des phénomènes climatiques touchant principalement les personnes âgées, le caractère meurtrier d'un tel épisode sera influencé par la part d'aînés dans la population. En comparant les pyramides des âges pour l'année 1980 et 2019 (Figure 1.17), la proportion des plus de 75 ans est passée de [F : 7,5% - H : 3,9%] à [F : 11,2% - H : 7,6%], avec une population qui a augmenté de 53 millions à 65 millions. La baisse des taux de mortalité due à l'amélioration des conditions de vie a déjà vu sa tendance s'inverser expliquée par la nouvelle répartition de la population. Les projections de population de l'INSEE (projection Omphale) prévoient une augmentation de la population jusqu'à 75 millions en 2070. La part des plus de 75 ans, passerait de 9.3% en 2020 à plus de 16% en 2050 (INSEE, 2016). Dans ce nouveau contexte, les vagues de chaleur pourraient être de plus en plus meurtrières.

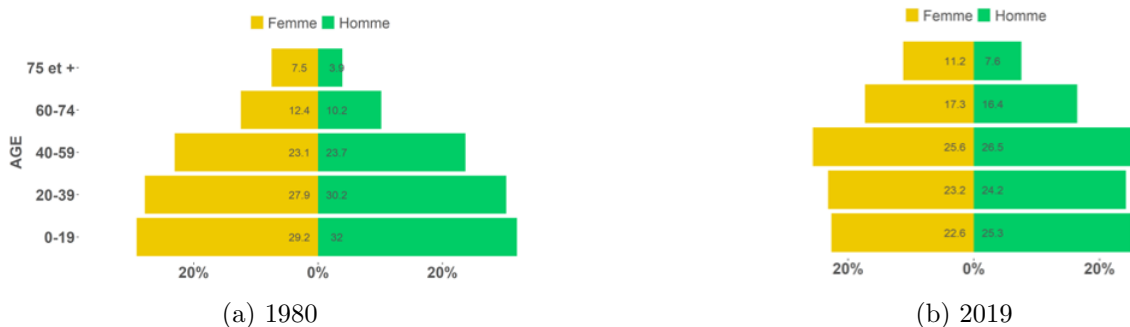


FIGURE 1.17 : Pyramides des âges en proportion (%) pour les années 1980 et 2019.

Impact du sexe

La saisonnalité des décès dépend également du sexe. Les hommes ont des taux de décès plus importants que les femmes, et une espérance de vie plus faible. En 2019, l'espérance de vie à la naissance des femmes était de 85.6 ans contre 79.7 ans pour les hommes. En 2017, cette différence entre homme et femme était la plus importante d'Europe (INSEE, 2020). Il est intéressant ici d'étudier le mois de l'année et donc son climat comme variable déterminante sur cet écart. La surmortalité hivernale est plus marquée dans la population féminine que masculine. En période estivale, la sous-mortalité observée sur la population est plus importante chez les femmes que chez les hommes (PELTIER, 2016). La Figure 1.19 présente les taux de décès mensuels annualisés en fonction du sexe sur l'année entière, sur les 3 mois d'été et sur les 3 mois d'hiver. Ces taux sont issus des données INSEE récoltées dans le cadre de ce mémoire. L'écart entre les taux des hommes et des femmes est plus important en été qu'en hiver. En revanche lors d'épisodes atypiques de surmortalité tels que la canicule de 2003, les taux de décès des femmes sont plus impactés, ils ont même dépassé ceux des hommes en 2003. « Dans toutes les classes d'âge, le ratio de mortalité est de 15 à 20 % plus élevé chez les femmes que chez les hommes. » (HÉMON et JOUGLA, 2004)¹. Cette observation selon laquelle les femmes seraient plus exposées au risque canicule que les hommes se retrouve dans la littérature (BESANCENOT, 2000) mais est parfois contesté (FALL, 2021).

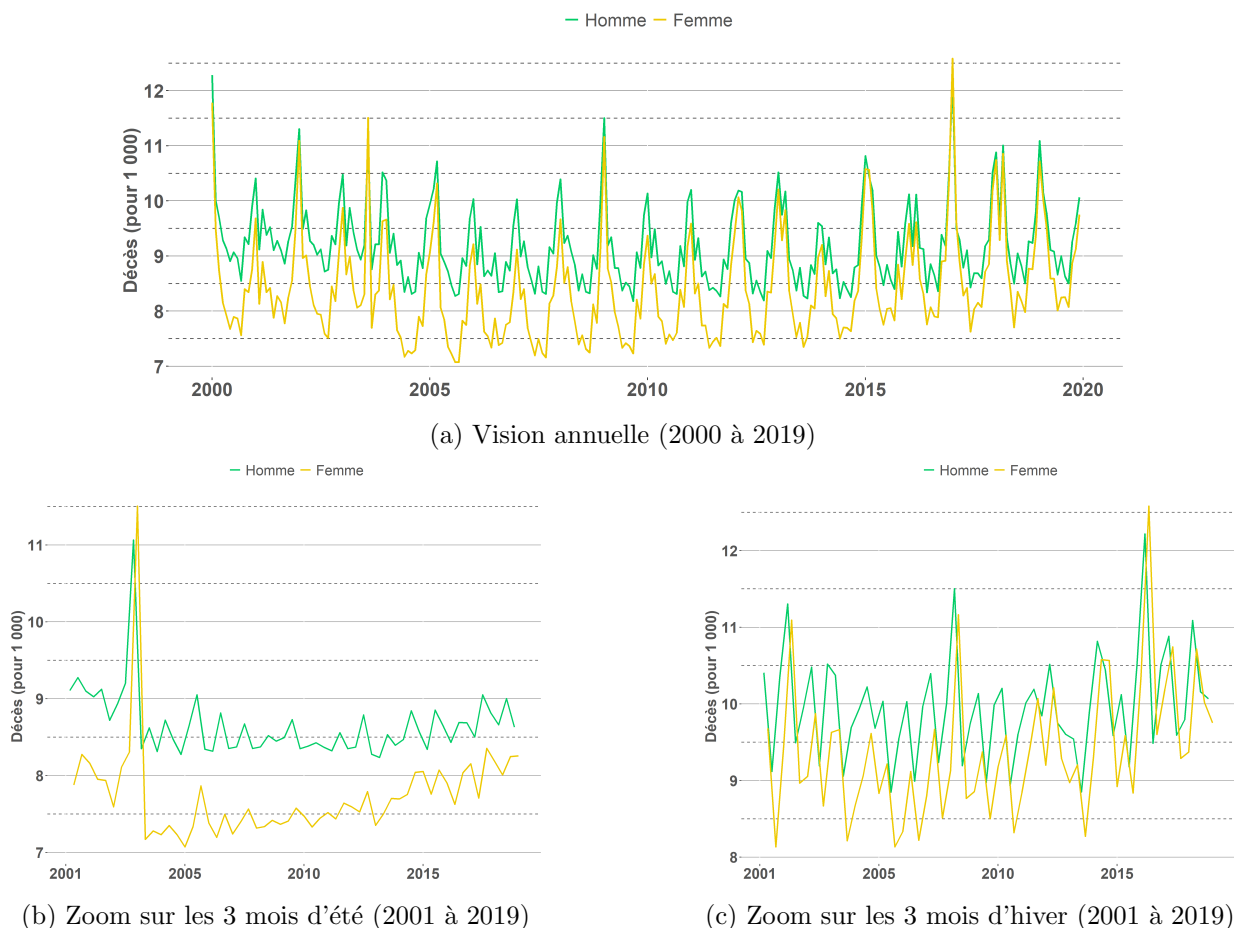


FIGURE 1.19 : Taux de décès mensuel annualisé en fonction du sexe et des saisons. Données INSEE.

¹Citation issue d'une étude sur la surmortalité de l'été 2003

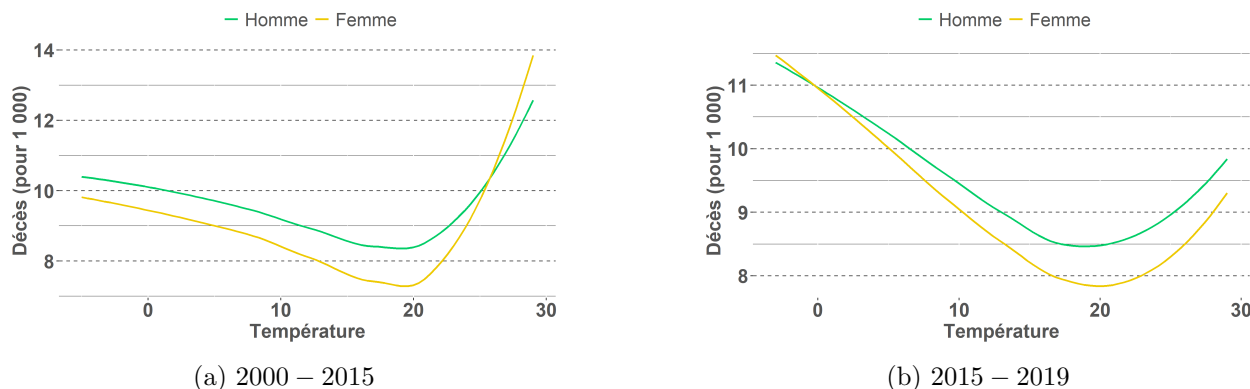


FIGURE 1.20 : Taux de décès annualisé (pour 1 000 habitants) par sexe en fonction de la température.

De façon similaire à la partie 1.2.2, les courbes mortalité-température assimilable à un « U » sont tracées par sexe. Les observations précédentes se confirment : sur la Figure 1.20b, pour les années 2015 à 2019, plus les températures baissent et plus les taux de décès homme et femme se rapprochent. En revanche au niveau de l'optimum thermique, l'écart est à son maximum, à 20°C les taux chez les hommes sont de 8.5 décès pour 1 000 contre 7.9 pour les femmes. L'écart persiste en période de chaleur et se réduit légèrement en approchant des températures élevées. Sur la période 2000-2015, la présence de la canicule de 2003 responsable d'une surmortalité féminine plus importante explique le croisement à 26°C entre les deux sexes. Pour les températures hivernales, l'écart entre les taux est plus marqué que pour la période 2015-2019, cette observation correspond avec la Figure 1.18c.

Impact zone urbaine

Les grandes agglomérations présentent en général des températures supérieures à cause des îlots de chaleur urbain. Une forte densité urbaine augmente le risque relatif de décès face aux vagues de chaleur (SANTÉ PUBLIQUE FRANCE, 2020). Ce phénomène est particulièrement marquant la nuit en empêchant les températures de retomber à des niveaux plus faibles. Il existe également des phénomènes de micro-îlot urbain au sein même des villes dus à des surfaces artificielles et extrêmement urbanisées. Des écarts de 7 à 8°C sont observables entre le cœur de la ville et les zones péri-urbaines dans des villes comme Toulouse, Strasbourg ou Paris pendant une nuit d'été (BENMARHIA et BEAUDEAU, 2018). L'impact sanitaire de ces îlots même hors période de canicule peut entraîner un excès de décès. Pendant les vagues de chaleur extrême, ce nouveau facteur peut avoir un impact énorme. Sur la canicule de 2003, la surmortalité était de 40% pour les petites et moyennes agglomérations, de 80% pour Lyon et 141% pour Paris (LAIDI K., 2012). Dans un contexte de réchauffement climatique, de plus en plus de villes prennent des initiatives pour réduire ce phénomène en intégrant cette variable dans les plans de développement urbain, notamment en privilégiant les espaces verts.

Autres facteurs de risques

D'autres populations sont également à risque : les nourrissons, les personnes travaillant en extérieur ou dans un habitacle chaud (comme les bus non climatisés), les femmes enceintes, les personnes avec des comorbidités, maladies chroniques ou sous traitements particuliers. La défaveur sociale joue un rôle décisif. L'isolement et les mauvaises conditions de vie dans un habitat mal isolé accentuent l'inégalité du risque face à une vague de chaleur. C'est pourquoi les sans-abris sont extrêmement exposés, ils n'ont ni la possibilité de se rafraîchir ni un accès constant à l'eau.

1.3.3 Les effets collatéraux du climat estival

Avec l'arrivé du climat estival, des hautes températures et du beau temps de nouveaux risques pour la santé émergent. Ces nouvelles conditions sont favorables à l'implantation des moustiques « *Aedes Albopictus* » vecteurs de maladies dangereuses pour l'Homme. Elles sont également responsables des pics d'ozone typique des vagues de chaleur. À plus long terme, la présence du soleil et des rayons UV constituent une inquiétude pour la peau avec cancers et brûlures.

Maladies vectorielles, transmission de gènes pathogènes

Les températures estivales sont propices aux proliférations de moustiques, en particuliers ceux capables de transmettre des maladies telles que la Dengue, le Chikungunya ou encore le virus Zika. À l'arrivée de l'hiver, ils disparaissent totalement du territoire. Le changement climatique et l'augmentation des températures pourraient favoriser l'implantation de ces moustiques sur le territoire métropolitain et devenir un nouveau risque de santé publique. Les résultats présentés ici proviennent de l'étude menée par Y. Drif, B. Roche et P. Valade (AON, 2020), complétés des articles épidémiologiques de Santé Publique France (MOLHO et al., 2018), (GIRON et al., 2020).

L'exposition de la population française aux maladies à transmission vectorielle est en augmentation permanente. La présence des moustiques responsables de la Dengue, du Chikungunya ou du virus Zika est historiquement concentrée dans les DOM, mais aujourd'hui la métropole est de plus en plus exposée. Le moustique *Aedes Albopictus* vecteur de virus est arrivé sur le territoire en 2004, avec une forte hétérogénéité de répartition. Avec une concentration dans les régions du sud, la prolifération du moustique vers le Nord du pays est en train de se réaliser depuis ces dernières années (Figure 1.21).

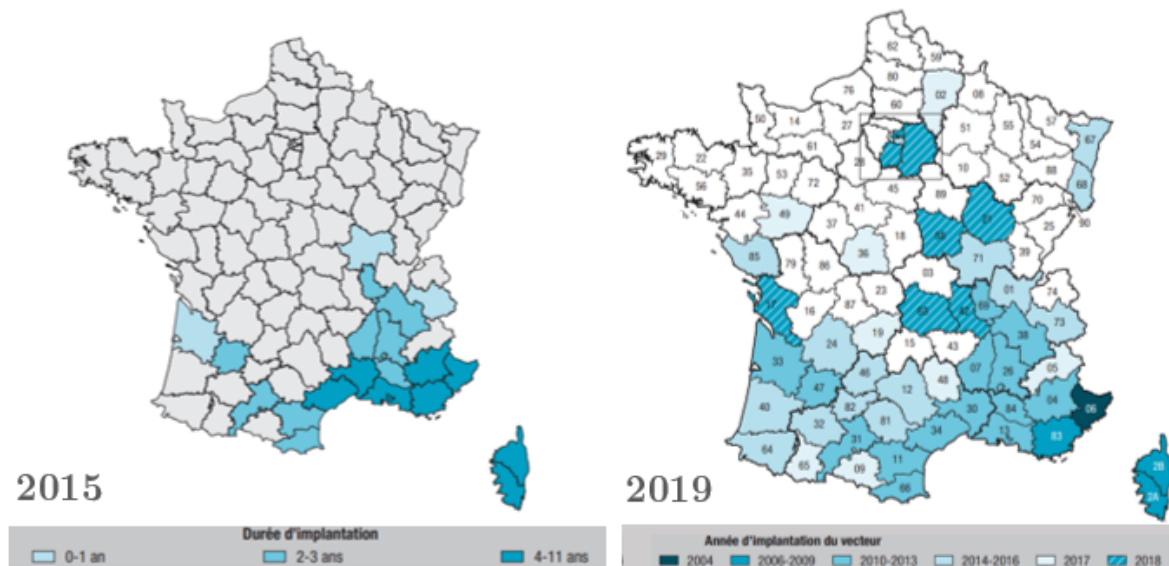


FIGURE 1.21 : Départements français colonisés par *Aedes Albopictus* en 2015 et en 2019 (MOLHO et al., 2018), (GIRON et al., 2020).

La prolifération des moustiques suit les grands axes routiers : ils sont transportés de façon passive via les voitures et les camions. La migration est très rapide : en 2015, seul le sud de la France était touché, aujourd'hui une large partie du pays abrite ces moustiques. L'évolution sur les régions d'Auvergne-Rhône-Alpes (ARA) et Bourgogne Franche-Comté est détaillé à titre d'exemple (Figure 1.22). Il est présenté ci-dessous le nombre de communes colonisées de 2012 à 2018. Une augmentation globale est enregistrée pour tous les départements, en particulier pour le Rhône (+34 communes) et la Savoie (+10 communes).

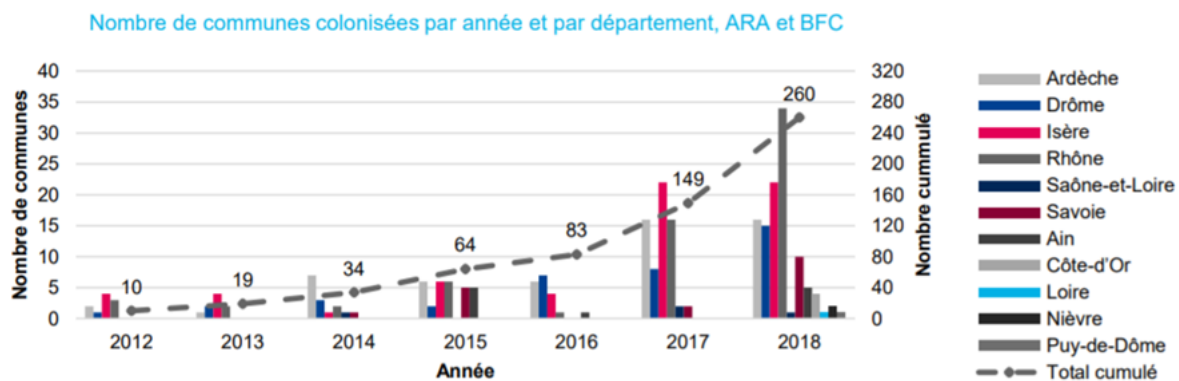


FIGURE 1.22 : Évolution du nombre de communes colonisées par année et par département sur les régions d'Auvergne-Rhône-Alpes (ARA) et Bourgogne Franche-Comté (BFC) (SANTÉ PUBLIQUE FRANCE, 2019a).

Sur l'année 2015, 1 000 cas de Dengue et de Chikungunya ont été importés sur le territoire. Il s'agit de personnes revenant en général de pays tropicaux ou d'Asie. Les moustiques présents sur le territoire servent alors de vecteur pour transmettre la maladie d'une personne à une autre. Des plans de lutte contre ces moustiques sont déjà en place dans le sud de la France, ce qui permet de limiter les contaminations mais aucun traitement curatif ou vaccin n'existe à ce jour pour prévenir ces infections. Seule la lutte antivectorielle passant par les comportements et l'éducation des populations est actuellement efficace. Avec le changement climatique, une augmentation des températures ambiantes et une diminution des périodes hivernales sont attendues. Cela favorisera l'implantation, la reproduction et la contamination de ces moustiques sur le sol métropolitain. Aon a travaillé en ce sens pour évaluer l'impact physique suivant le scénario RCP 8.5 du GIEC, en vue de l'appliquer pour l'exercice pilote de l'ACPR, (ACPR, 2020). Sur 3 horizons de temps, 2025 (+0.5°C), 2030 (+1°C) et 2040 (+2°C), et en vision départementale, une évaluation de l'impact sur les taux de mortalité, frais de soin et arrêts de travail est réalisée. Ils ont pu mettre en évidence qu'une augmentation d'1°C entraînait une hausse de probabilité de présence de 7% du moustique (avec un seuil minimal de température à 10,4°C). À partir d'un modèle mathématique de transmission vectorielle, des projections de population exposée au virus, et des projections de présence du moustique dans chaque département (forte ou basse), des probabilités d'apparition d'épidémies sont calculées. L'impact physique est ensuite traduit en sinistralité, à partir de liens médicaux préalablement établis (exemple : en cas de Dengue : 1% de décès, 40% de consultation médicale, et 1% d'arrêt de travail de 10 jours). Ainsi en 2030, entre 100 000 et 1 270 000 personnes pourraient être touchées par ces virus. Ces chiffres passeraient de 250 000 à 2 000 000 en 2040, avec près de 2 000 décès engendrés par année.

Pollution atmosphérique

La concentration de l'air en ozone (O_3) et particules fines (PM_{10} et $PM_{2.5}$) peut transposer une vague de chaleur classique en vague de chaleur meurtrière. Alors que les concentrations en particules fines sont plus importantes en hiver, l'ozone est typique des beaux jours et des canicules. Avec le soleil, l'absence de vent et la chaleur, l'air s'en charge et à forte concentration cela devient toxique pour l'Homme. La synergie entre hautes températures et pollution atmosphérique implique une extension des décès attendus. Ce constat corrélationnel est important à appréhender en vue des projections climatiques qui prévoient une augmentation des températures et des variations locales de la pollution de l'air. Une augmentation de $10 \mu g/m^3$ de PM_{10} relève le risque de décès de 3% en été et de 14.2% pendant une vague de chaleur (PASCAL et al., 2021). L'ozone augmente également le risque de décès sur une canicule. À titre d'exemple, pendant la canicule de 2003, des différences très significatives en nombre de décès ont été reportées en fonction des villes et de leur concentration en O_3 . En comparant avec des observations ayant des niveaux d' O_3 similaires aux observations locales de 2003, une étude a estimé la part de décès liés aux températures et ceux liés à l'ozone pendant la vague de 2003 (FILLEUL et al., 2006). Le risque de mortalité en excès lié à la combinaison température et concentration de l'air en ozone était estimé à 10.6% pour le Havre contre 174.7% pour Paris durant la vague du 3 au 17 août 2003 (Figure 1.23). Dans les agglomérations de Paris, Bordeaux, et Lyon, la température a un effet plus important que l'ozone. En revanche, pour Toulouse et Strasbourg, la part expliquée par l'ozone est plus importante. Ces différences s'expliqueraient par les spécificités locales, les caractéristiques des populations exposées (personnes âgées, enfants, catégorie sociale...). Au global, sur les 9 villes françaises de l'étude, ce risque de décès en excès augmenterait de 1% en moyenne (avec des disparités locales importantes) pour une augmentation de $10 \mu g/m^3$ en O_3 (FILLEUL et al., 2006).

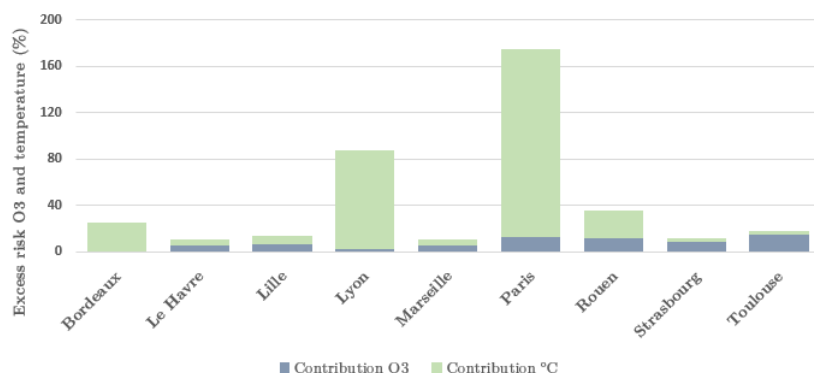


FIGURE 1.23 : Part de surmortalité expliquée par les températures ou les concentrations en Ozone dans 9 villes françaises pendant la canicule de 2003, (FILLEUL et al., 2006).

Au-delà de son impact sur les vagues de chaleur, la pollution atmosphérique est un enjeu majeur de santé publique et les projections de ces différents polluants fait l'objet de nombreux travaux. Pour résumer rapidement, en se plaçant dans le pire scénario envisagé par le GIEC (scénario RCP 8.5), les concentrations de PM_{10} devraient progressivement se réduire à l'horizon 2050, alors que l'ozone va augmenter (LACRESSONNIÈRE, 2012). Actuellement, pour les PM_{10} on enregistre de 2 à $14 \mu g/m^3$ en été, et de 8 à $24 \mu g/m^3$ en hiver avec des maxima pour les grandes agglomérations ($14 \mu g/m^3$ en été et $24 \mu g/m^3$ en hiver pour Paris). La baisse atteindrait un seuil de $5 \mu g/m^3$ au maximum pour l'été et $15 \mu g/m^3$ en hiver. Concernant l'ozone, en été, la tendance est à la baisse pour la partie sud de la France (de 8 à $16 \mu g/m^3$), alors que pour la partie nord une augmentation est attendue (12 à $18 \mu g/m^3$). En hiver l'ensemble du pays observerait une hausse. Les résultats de ces projections sont détaillés en annexe A.1.

Incidence du rayonnement

Le rayonnement ultra-violet a été découvert en 1801 par Johann Wilhem Ritter, un physicien allemand. Il correspond aux longueurs d'onde comprises entre 280 et 400 nm. À la surface de la Terre, il se décompose en 98% de UV-A [315 à 400 nm], responsable des rides et des taches et 2% d'UV-B [280 à 315 nm] à l'origine des brûlures et cancers.

L'exposition prolongée aux ultra-violets (UV) provoque différents cancers de la peau (mélanome et carcinome pour la majorité). D'après une étude américaine, l'augmentation de 1 degré Celsius augmenterait le nombre de cas de carcinomes épidermoïdes de 5,5% (VANDERLEUN et al., 2008). Ce résultat implique une corrélation entre nombre de cas de cancers de la peau, quantité d'UV et température. Le nombre de cancers de la peau est en augmentation depuis ces dernières années, la fréquence est passée de 3 cas pour 100 000 à 10 cas pour 100 000 entre 1980 et 2011 (GIS, 2014). Bien qu'ils ne soient que rarement mortels, les cancers de la peau engendrent des dépenses médicales conséquentes. Les UV sont également responsables de problèmes ophtalmologiques (cataractes, kératites) et de 90% du vieillissement de la peau (GIS, 2014). Il est également important de nuancer l'aspect néfaste des rayons UV avec ses bénéfices. Ce rayonnement est indispensable au fonctionnement de l'organisme humain, il aide à la synthèse de la vitamine D, nécessaire pour l'absorption du calcium et du phosphore, primordiale au développement osseux, et à la défense immunitaire.

En vue du changement climatique, il convient donc de s'interroger sur la quantité d'UV reçue en surface. Cette quantité va dépendre de nombreux facteurs en interaction les uns avec les autres, et notamment l'efficacité filtrante de la couche d'ozone. La couche d'ozone a vu sa qualité se dégrader due aux activités humaines, un trou a même été détecté au dessus de l'Antarctique. Des études ont démontré que l'origine de cet appauvrissement proviendrait des émissions des gaz halogénés de l'industrie chimique. Suite à ces découvertes, de nouveaux accords ont été mis en place pour stopper cette pollution et montrent déjà leur efficacité avec une reconstruction visible de la couche d'ozone (Protocole de Montréal). L'augmentation des rayons UV ainsi observée a commencé à réduire à son tour (GIS, 2014).

Cependant la quantité d'UV reçue au sol dépend de l'équilibre radiatif du système climatique, équilibre complexe qui fait intervenir de nombreux éléments comme le montre la Figure 1.24 (IPCC, 2013). C'est un déséquilibre de ce système qui est à l'origine du changement climatique. Le soleil est la source de ces ultra-violets, c'est ensuite le chemin emprunté, l'angle d'incidence, et les matières et milieux traversés (gaz, nuages) qui vont influencer sur l'absorption et/ou sur la diffusion des rayons ultra-violets. Les trajectoires climatiques prévoient différentes évolutions futures de concentration de ces gaz, et donc en influant sur les quantités d'UV reçues au sol. Ces trajectoires prévoient une augmentation en CO_2 et N_2O , et une hausse ou baisse du CH_4 en fonction du scénario. Quant aux quantités d'ozone, elles vont varier différemment en fonction de l'hémisphère. À cause de ces nombreux indicateurs, les projections à long terme des rayonnements UV sont difficilement modélisables et restent encore aujourd'hui incertaines (LAMY, 2019). Si l'on se tient aux résultats du GIS, une réduction des rayonnements UV pour l'ensemble des scénarios dans l'hémisphère Nord est attendue, cela est largement expliquée par la reconstruction de la couche d'ozone. Cette réduction implique la nécessité d'un plus large temps nécessaire à la synthèse de la vitamine D, en revanche pour les coups de soleil le temps d'exposition va dépendre du scénario. D'autres résultats sur ce thème sont présentés en annexe (A.2), en particulier ceux du projet RISC-UV du GIS.

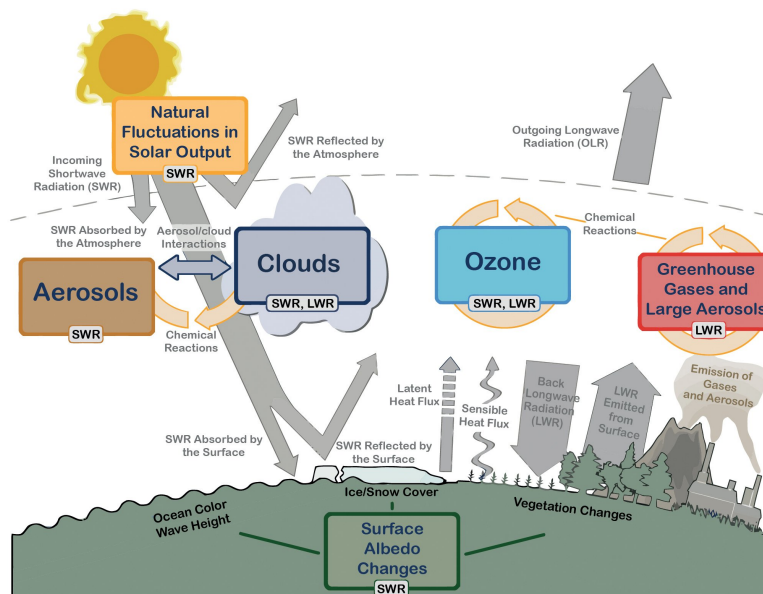


FIGURE 1.24 : Equilibre radiatif du système climatique (IPCC, 2013).

Famine

Après des décennies d'amélioration dans la lutte contre la faim, la tendance s'est inversée avec un nombre de personnes souffrant de malnutrition en augmentation dans le monde depuis 2014 (FAO et al., 2020). La famine est engendrée par les conflits, les problèmes économiques et les aléas climatiques. Les sécheresses interminables exterminent les cultures et entraînent des pénuries de ressources alimentaires. Depuis mai 2020, l'île de Madagascar est plongée dans une extrême sécheresse entraînant l'insécurité alimentaire de plus de 1.14 millions d'habitants sur les 27.2 millions que compte le pays. Cette catastrophe humanitaire est considérée comme directement liée au changement climatique (CHOLEZ, 2021). Le cas de Madagascar n'est pas isolé, aujourd'hui 41 millions de personnes dans 43 pays sont au bord de la famine, c'est 14 millions de personnes de plus qu'en 2019. Les conflits en sont la première cause mais les retombées de la COVID-19 et le changement climatique contribuent également à cette augmentation (PAM NATIONS UNIES, 2021). Aujourd'hui, 690 millions de personnes sont confrontées à la malnutrition pour diverses raisons soit 8.9% de la population mondiale. La crise de la COVID-19 devrait augmenter ce chiffre de 83 à 132 millions de personnes. Et si rien n'est fait 600 millions de personnes supplémentaires pourraient être impactées par les problèmes de nutrition à cause du changement climatique d'ici 2080 (PROGRAMME DES NATIONS UNIES, 2021).

1.3.4 Les moyens de protection

Les plans d'actions et de prévention

La canicule de 2003 a entraîné une surmortalité sans précédent en France et dans plusieurs pays d'Europe. À la suite de cet épisode, de nombreux pays européens ont mis en place un plan d'action et de protection des populations en période caniculaire. La création de ces plans a suscité de nombreux questionnements et études : Quelles sont les facteurs de risque ? Quelles sont les bons comportements à adopter ? Comment protéger les plus vulnérables ? Différents plans ont alors été créés en Europe à la suite de l'épisode de 2003. La définition météorologique de canicule n'étant pas unique, chaque pays a alors défini ses propres seuils d'alerte et indicateurs (voir Table 1.1) à partir des températures journalières (moyenne sur plusieurs jours, maximum et minimum) et d'une granularité des observations (région, département, etc.). D'autres variables peuvent être également consultées, par exemple la Belgique est l'un des seuls pays à regarder conjointement concentration d'ozone et température.

Pays	Ancienneté	Nom	Indicateurs
France	2004, mise à jour annuelle	Plan national Canicule	Moyenne sur 3 jours, par département : $T_{MAX} > \text{seuil}_{MAX}$ et $T_{MIN} > \text{seuil}_{MIN}$
Belgique	Depuis 2015, intégration de l'ozone	Plan vague de chaleur et pics d'ozone	$T_{MAX} > 28$ et concentration horaire moyenne d'ozone supérieure à $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$
Espagne	2004	Spain National Heat Health Plan	Moyenne sur 5 jours : T_{MAX} et $T_{MIN} > 95\%$ des températures historiques avec des exceptions régionales

TABLE 1.1 : Plan de protection pour le risque canicule en France, Belgique et Espagne.

En France, c'est l'Institut de veille sanitaire qui conjointement avec Météo France a élaboré le Plan National Canicule effectif depuis 2004. Des seuils d'alerte départementaux de température ont été définis permettant de déclencher différents niveaux d'alerte (de 1 à 4).

Niveau 1 : Le premier niveau est automatiquement activé du 1er juin au 15 septembre. Il s'agit d'une veille saisonnière permettant de prévenir et agir en cas de fortes chaleurs.

Niveau 2 : Le second niveau d'alerte correspond à un avertissement de chaleur en prévision d'une vague de chaleur à venir. Le Plan National Canicule est déclenché et les Cires (Cellules interrégionales d'épidémiologie) sont réquisitionnées pour suivre et transmettre à l'InVS¹ les différentes données sanitaires (état civil, entrée aux urgences, pompiers, pompes funèbres...).

Niveau 3 : Le troisième niveau est déclenché à la date effective d'arrivée de la vague de chaleur. À partir de ce niveau des mesures pour protéger les personnes les plus fragiles sont mises en place (centre d'appel d'urgence et suivi des populations qui sont inscrites pour cette aide, communication sur les comportements à adopter, mise à disposition de salles climatisées dans certaines villes...).

Niveau 4 : Le dernier niveau est activé en cas de prolongation de la vague de chaleur ou de phénomènes annexes pouvant empirer la situation actuelle (sècheresse, pollution, panne d'électricité...).

¹Institut de veille sanitaire

Dès le niveau 1, de la communication préventive pilotée par le ministère de la Santé est déployée. Différentes plaquettes informatives sont distribuées par les ARS¹ aux associations, entreprises, écoles et autres institutions accueillant du public. Tous ces supports sont disponibles sur le site de Santé Publique France. Une note de rappel sur la conduite à tenir est également adressée aux personnels de santé. Vient ensuite la communication d'urgence à partir du niveau 2, similaire à la communication de base elle est largement plus diffusée par les radios et les chaînes de télévision notamment. La communication préventive et d'urgence informe sur les premiers signes physiques du coup de chaleur ou de la déshydratation à ne pas négliger, sur la façon de se protéger (boire, manger en quantité suffisante, éviter l'alcool et les activités physiques...). Elles informent également sur la conduite à tenir pour aider les personnes vulnérables (enfants et personnes âgées) et les possibilités d'action protectrice. Par exemple, les personnes vulnérables peuvent se signaler en mairie et bénéficier de visites régulières par des bénévoles ou professionnels.

Modification de l'habitat

Avec la multiplication des vagues de chaleur depuis 2015 les foyers français ont commencé à s'équiper en climatiseur. D'après une enquête menée par EDF Recherche & Développement (GRIGNON-MASSÉ et BINET, 2020) 22% des ménages français en possède un (mobile ou intégré au logement). Ce chiffre s'élevait à 14% en 2016 et dépend du type de logement, de son ancienneté et de sa localisation. Les systèmes de climatisation PAC² air/air réversible (75% des PAC) peuvent aussi être utilisés en hiver comme moyen de chauffage et faire baisser la facture énergétique et l'empreinte carbone du foyer.

Sans forcément avoir recours à une climatisation qui n'est pas sans impact pour le climat, d'autres solutions existent. Par exemple l'isolation active qui repose sur deux principes : protéger son logement de la chaleur (en lui apportant de l'ombre ou en améliorant son isolation thermique) et lui apporter de la fraîcheur en aérant pendant les périodes les plus fraîches. Améliorer son isolation est bénéfique en été face aux pics de chaleur et en hiver pour limiter sa consommation énergétique. Des techniques architecturales servent également à limiter l'accumulation de chaleur dans le foyer (utilisation de couleurs claires dans le logement et sur la toiture, utilisation de végétaux...), (NOS GESTES CLIMAT, 2020).

¹Agence régionale de santé

²Pompe à chaleur

L'acclimatation

L'être humain ne peut vivre que dans des conditions thermiques favorables. Pourtant il a pu s'implanter dans une large partie du globe et s'adapter à son environnement. La tolérance à la chaleur des populations varie fortement en fonction des régions. Plusieurs niveaux d'acclimations peuvent exister au sein d'une même population expliqués par leurs habitudes et leur mode de vie (travailler ou faire du sport en extérieur, être sédentaire ou vivre en intérieur climatisé). Un groupe exposé régulièrement à un climat extrême, qu'il soit chaud ou froid, présentera une réponse physiologique différente qu'un groupe constamment protégé. À long terme, et face à une exposition régulière, le corps est capable d'adapter ses mécanismes internes pour mieux se protéger. La réponse est plus optimisée, c'est-à-dire plus efficace et surtout moins coûteuse en énergie pour l'organisme. En détail cela s'explique par une augmentation de la capacité de sudation et une meilleure fonctionnalité rénale. Il en résulte une baisse de la sensation de fatigue permettant l'exercice physique ou intellectuel (NICOLLE-MIR, 2016). L'état physique et l'âge influent fortement sur la capacité d'adaptation d'une personne. Des études ont été menées sur des athlètes pour mesurer et comprendre leur adaptation face aux variations de températures (ROUSSEY, 2018). Avec la mise en place d'une stratégie d'acclimatation qui consiste en l'exposition de l'athlète de façon active et passive, une hausse de la température corporelle est provoquée afin de stimuler l'appareil homéostatique. Les résultats ont montré qu'après cette période de stress climatique imposée, les performances physiques sont améliorées, la capacité de sudation augmentée, le confort thermique plus agréable et le stress cardiovasculaire diminué. Les bénéfices et les preuves de l'acclimatation sont multiples et ce après des expositions répétées sur environ 15 jours.

En revanche, l'acclimatation à très long terme est assez méconnue, en particulier lorsqu'on souhaite étudier l'adaptation des populations face aux vagues de chaleur dues au changement climatique sur une longue période. On peut utiliser comme indicateur de référence l'optimum thermique, qui correspond à la température relative au minimum de décès. L'optimum thermique, ou minimum mortality temperature (MMT), a initialement été utilisé pour comparer la différence de mortalité entre différentes villes aux Etats-Unis, (FRANCK C. CURRIERO AND AL., 2002). Le MMT est corrélé à la latitude, en considérant le taux minimum de mortalité sur des tranches de 3°C. En Europe il est minimum au Nord de la Finlande pour 14.3-17.3°C, en passant par Londres, 19.3-22.3°C, jusqu'à Athènes 22.7-25.7°C (KEATING et al., 2000). Ce qu'il est intéressant d'étudier ici, et en particulier dans un contexte de réchauffement climatique, est la variabilité de l'optimum thermique et sa vitesse d'adaptation à de nouvelles conditions climatiques. En France, l'optimum thermique est passé de 17.5°C (1968-1981), à 17.8°C (1982-1998) et enfin 18.2°C (1999-2007), (TODD et VALLERON, 2015). Le MMT aurait augmenté de 0.8°C comparativement aux températures qui sur ces périodes ont augmenté de 1.5°C en été et 0.8°C en hiver. Les résultats sont illustrés pour la France métropolitaine (Figure 1.25) en comparant la température moyenne d'été (droite) avec l'optimum thermique (gauche), qui pour rappel est la température pour laquelle le taux de mortalité est le plus faible.

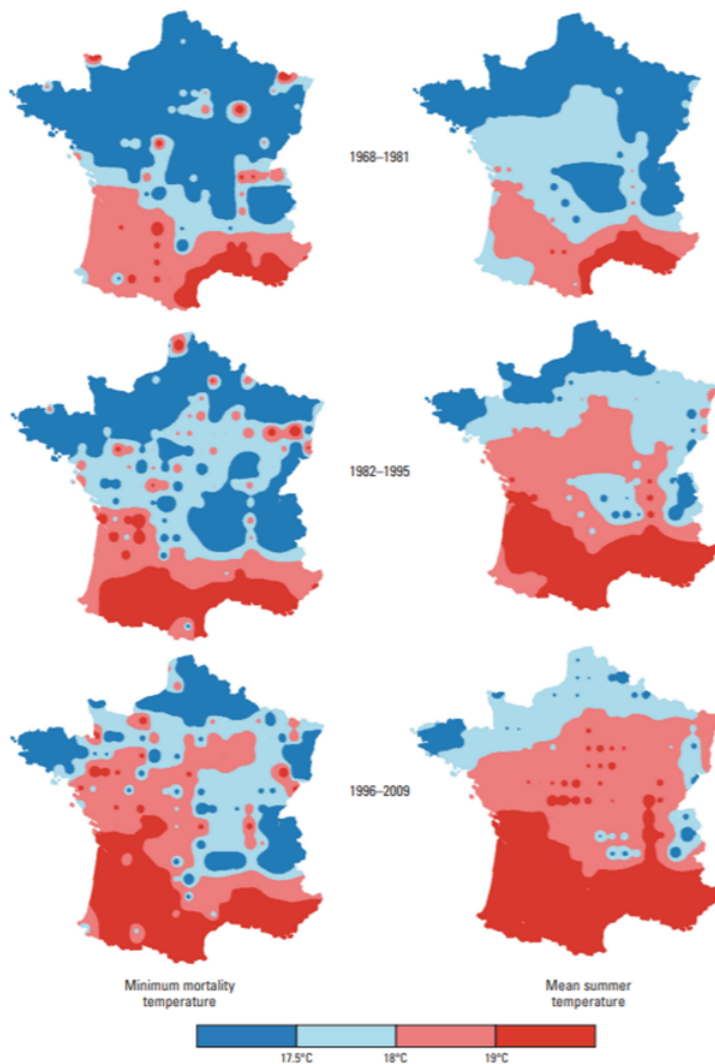


FIGURE 1.25 : MMT et moyenne des températures estivales par périodes, 1968-1981, 1982-1995 et 1996-2009 (TODD et VALLERON, 2015).

Ces résultats sont confirmés par une seconde étude réalisée sur la population néerlandaise pour 23 années en se focalisant sur les plus de 65 ans (FOLKERTS et al., 2020). 3 méthodes de régression sont mises en place pour l'étude de l'optimum thermique : SEG (Segmented Regression Poisson), CSDL (Constrained Segmented Distributed Lag Model) et DLNM (Distributed Lag-Non Linear Models). Pour 2 des 3 méthodes une augmentation de l'optimum thermique est observée (Figure 1.26), c'est le cas pour les méthodes prenant en compte une-lag-réponse (CSDL et DLNM), c'est-à-dire un effet différé sur la mortalité du aux températures. L'étude française précédemment évoquée (TODD et VALLERON, 2015) tient également compte d'un retard dans la réponse en utilisant des variables météorologiques à pas de temps différés : température du jour et température 6 jours avant, dans un modèle GAM¹ Poisson. Face à une augmentation des températures de 0.03°C par année sur les 23 années d'étude, le MMT pour la méthode CSDL a augmenté de $0.11^{\circ}\text{C} \pm 0.05^{\circ}\text{C}$ par an, de $0.15^{\circ}\text{C} \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ pour DLNM, et aucune augmentation pour SEG.

¹Generalized Additive Model

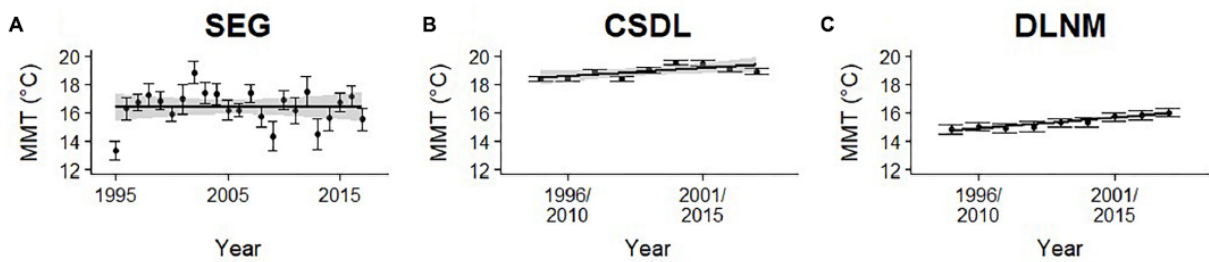


FIGURE 1.26 : Évolution du minimum mortality temperature (MMT) sur les plus de 65 ans au Pays-Bas en fonction des méthodes de régression (1995-2017) (FOLKERTS et al., 2020).

Malgré des résultats qui semblent prédire une adaptation raisonnable de la population à leur climat, il est très difficile de mesurer quelle est la part due à une réponse physiologique et laquelle est celle due aux réponses comportementales (amélioration des infrastructures, développement de l'air conditionné, prévention et protection des populations) et jusqu'où elle peut aller. Une meilleure résistance face aux fortes chaleurs n'est qu'en partie due à l'aspect physiologique, les comportements et la technologie sont non négligeables et compris dans le calcul de l'optimum thermique.

1.4 Impact des vagues de froid

1.4.1 L'organisme face aux vagues de froid

L'exposition aux faibles températures entraîne pathologies cardiaques et respiratoires. Elle provoque, à l'opposé de l'hyperthermie, de l'hypothermie, se caractérisant par des frissons, des refroidissements des extrémités, des engelures. . . Contrairement aux épisodes de fortes chaleurs où l'on peut observer assez rapidement un impact sur la population (entre 1 et 4/5 jours), le froid a un impact tant direct (hypothermie) qu'à beaucoup plus long terme (jusqu'à une vingtaine de jours) pour les maladies cardiovasculaires, les infections, etc. Les symptômes classiquement associés aux périodes de grands froids et en particulier à l'hypothermie sont : la chair de poule et les frissons, la mauvaise circulation sanguine dans les extrémités, et une aggravation des maladies préexistantes. Sans parler de phénomènes extrêmes, un simple rafraîchissement des températures influe sur la mortalité observée. Comparativement aux fortes chaleurs, où on observe un effet marqué sur la mortalité à partir du percentile¹ 95 de façon quasi immédiate, le froid présente des effets significatifs dès un adoucissement des températures (\geq percentile 25), avec un effet observable jusqu'à 21 jours après l'exposition (SANTÉ PUBLIQUE FRANCE, 2017).

Le nombre de décès en excès lié aux températures hivernales ne se résume pas aux décès des sans-abris par hypothermie, mais principalement par une recrudescence de différentes maladies. En 1985, une forte vague de froid s'est abattue sur la France, ce qui entraîna une surmortalité conséquente (+13 %) principalement par infarctus du myocarde (+17 %), accidents vasculaires cérébraux (+54 %) et pneumonies (+208 %) (INVS, 2004).

¹Les percentiles différencient les températures à partir d'une valeur médiane (percentile 50). Les percentiles 0.1, 1, jusqu'à 5 sont les températures extrêmes du grand froid, les percentiles 95, 99 jusqu'à 99.9 sont les températures extrêmes dans le chaud.

1.4.2 Les facteurs de risque

Les conditions météorologiques globales

D'autres facteurs météorologiques comme le vent peuvent fortement influencer la température ressentie. À titre d'exemple une température de -10°C associée à un vent de $90\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ entraîne un ressenti de -30°C . Cela s'explique par un refroidissement par convection comme expliqué en partie 1.3.1. La prise en compte de l'ensemble des variables météorologiques journalières devient alors essentielle.

La surexposition au froid et une mauvaise protection

Les faibles températures constituent une source de risque particulièrement importante sur les populations défavorisées (sans-abris, vivant dans des habitats insalubres ou n'ayant pas accès à un chauffage décent). C'est pourquoi les décès par hypothermie concernent majoritairement les sans-abris. Ils concernent également les personnes sous l'emprise de psychotrope ou d'alcool, puisque ces substances altèrent les ressentis et empêchent une réponse comportementale adaptée. Et contrairement aux idées communes, l'alcool ne réchauffe aucunement le corps humain, il trompe les sens en atténuant les ressentis. Les travailleurs en extérieur ou les sportifs se confrontant aux températures extrêmes, parfois de façon abusive, peuvent également souffrir des vagues de froid s'ils ne sont pas équipés en conséquence (SANTÉ PUBLIQUE FRANCE, 2019d).

L'âge et les comorbidités

Comme pour les vagues de chaleur, la population âgée est particulièrement sensible aux variations de température dues à une déficience de leur appareil thermorégulateur. On trouve sur cette tranche d'âge une forte présence de comorbidités : maladies cardiaques ou pulmonaires rendant les sujets extrêmement vulnérables. Le froid favorise et aggrave les maladies cardiaques : cela s'explique par un besoin accru en oxygène du cœur et une diminution du diamètre des vaisseaux sanguin (vasoconstriction) entraînant des thromboses, infarctus, angine de poitrine, etc. Les conséquences cardiaques peuvent intervenir entre 7 et 14 jours après l'exposition au froid. Ces mêmes mécanismes peuvent au niveau cérébral, déclencher des accidents vasculaires cérébraux. Les enfants et nourrissons doivent également faire l'objet d'une attention particulière notamment face aux maladies saisonnières (bronchiolite, gastro-entérite et virus de l'hiver) (SANTÉ PUBLIQUE FRANCE, 2019d).

1.4.3 Les effets collatéraux

Les intoxications au monoxyde de carbone

Durant les périodes de grand froid, de nouveaux risques physiques indirectement liés émergent. On retrouve un accident typique hivernal : les intoxications au monoxyde de carbone. Cette intoxication provient d'un excès d'utilisation d'appareils de chauffage, parfois détournés de leur utilisation primaire, ou de l'utilisation de groupes électrogènes dans un endroit clos. Ce gaz est indolore, incolore, imperceptible et toxique lorsqu'il est ingéré de façon excessive. Il se concentre généralement dans l'habitat à cause d'une mauvaise aération. Chaque année, on dénombre 1 000 foyers touchés, soit près de 3 000 personnes dont une centaine de décès (VERRIER, 2015). Les symptômes d'une intoxication

au monoxyde de carbone sont des céphalées¹, nausées, vertiges et parfois un coma pouvant conduire au décès en quelques minutes. Il s'agit de la première cause de mortalité accidentelle par toxique en France. Les ménages les plus touchés sont des maisons individuelles équipées de chaudière et dans plus d'un cas sur deux il s'agit d'un habitat jugé « dégradé ». Il a également été mis en évidence qu'environ la moitié des personnes intoxiquées manquaient d'information sur ce risque voir n'étaient aucunement informées (INVS, 2014). Les comportements à adopter ne sont en général pas connus (aération du logement, évacuation immédiate du logement, arrêt des appareils de combustion, appel des secours et retour dans le logement qu'après intervention d'un professionnel). Pourtant de plus en plus de solutions sont proposées comme des détecteurs de CO ainsi que des campagnes d'information conseillant à la population d'effectuer des vérifications régulières de leur installation de chauffage.

Les épidémies de gripes saisonnières

En France métropolitaine les épidémies de grippe saisonnière surviennent généralement entre les mois de novembre et avril et durent entre 10 et 11 semaines. Sur les derniers chiffres de 2019, il est estimé entre 2 et 6 millions de personnes infectées chaque année pour 10 000 décès annuels (variant en fonction de l'intensité de l'épidémie). La circulation du virus est favorisée par des conditions froides et sèches dans les pays tempérés comme la France. C'est dans les lieux clos et fréquentés qu'une majorité des transmissions ont lieu (école, métro, bus). Le virus se transmet par voie orale, sécrétions respiratoires pendant des toux, des éternuements ou par contact via des objets contaminés. Les cas graves qui amènent au décès sont en grande majorité recensés chez les personnes âgées (90%) (SANTÉ PUBLIQUE FRANCE, 2019b).

La vaccination étant actuellement la solution la plus efficace pour lutter contre ces épidémies saisonnières, sa couverture n'est pas assez étendue pour réduire considérablement les décès. Ainsi le bilan de la surmortalité est souvent important. 14 400 décès attribuables à la grippe sur la saison 2016-2017 dont 90% sur la tranche des plus de 75 ans (SANTÉ PUBLIQUE FRANCE, 2017). 13 100 décès pour l'épidémie de 2018-2019 (SANTÉ PUBLIQUE FRANCE, 2019a). Et 3 700 décès attribuables à la grippe durant l'épidémie de 2019-2020 avec 60 000 passages aux urgences sur les 9 semaines d'épidémies (SANTÉ PUBLIQUE FRANCE, 2020), année également marquée par l'épidémie de la COVID-19.

Les accidents divers

Une augmentation des fractures et accidents liés aux chutes sur du verglas ou de la neige est parfois mise en avant dans certaines publications, et démentie dans d'autres. Les accidents de la route sont quant à eux moins nombreux en hiver, mais plus nombreux sur les piétons. La mortalité routière est principalement en lien avec les précipitations plutôt qu'avec les températures hivernales, le verglas ou la neige.

¹maux de tête

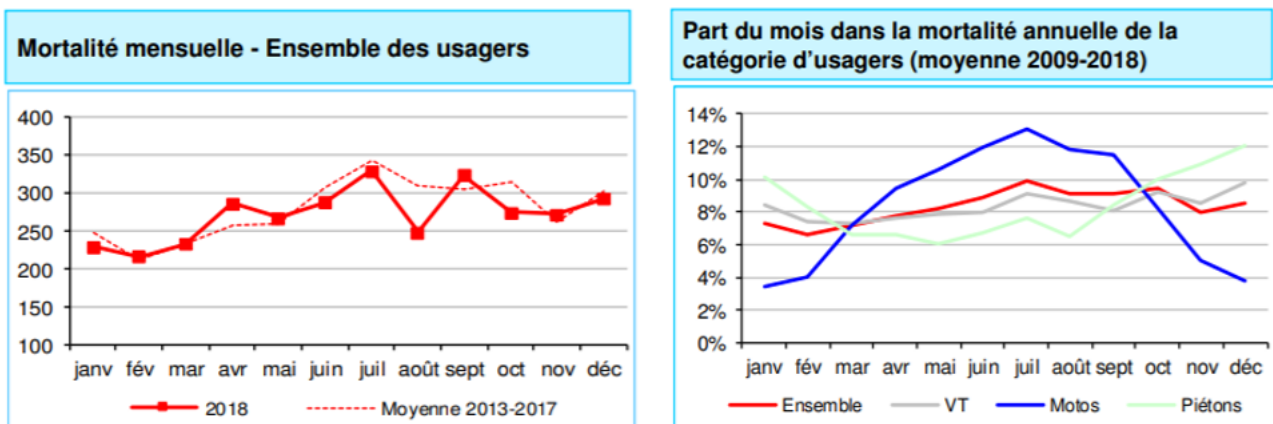


FIGURE 1.27 : Sécurité routière Bilan de l'accidentalité 2018

1.4.4 Les moyens de protections

Le Plan Grand Froid

L'alerte Grand Froid est intégrée aux cartes Météo France depuis 2004. Elle est déclenchée en cas d'épisodes à températures largement inférieures aux normales saisonnières, elle dépend également de son étendue géographique, de la présence de vent et de sa durée. Cette alerte sert à activer les Plans « Grand Froid » des préfectures concernées, ces plans sont majoritairement destinés au secours des sans-abris et a été créée en 2002. Comme pour le PNC¹, il se divise en 4 niveaux de vigilance :

Niveau 1 : Le premier niveau correspond à une veille saisonnière et est automatiquement activé du 1er novembre au 31 mars,

Niveau 2 : Le second niveau d'alerte correspond à un « pic de froid » sur 24h/48h ou sur un froid plus modéré mais persistant. Ordre de grandeur des températures : entre 5°C et -10°C,

Niveau 3 : Le troisième niveau est déclenché en cas de froid intense et durable, c'est le niveau « Grand Froid ». Ordre de grandeur des températures ressenties : entre -10°C et -18°C,

Niveau 4 : Le dernier niveau est activé pour les périodes de froid extrême, lorsqu'elles sont durables, exceptionnelles et qu'elles impactent certaines activités (transport, école, travaux en extérieur, etc.). Il est déclenché en général pour des températures ressenties inférieures à -18°C.

La stratégie en France pour lutter contre les impacts du froid s'organise sous 4 grands axes :

Axe 1 : Prévenir et anticiper les effets des vagues de froid,

Axe 2 : Protéger les populations,

Axe 3 : Informer et communiquer,

Axe 4 : Capitaliser les expériences.

Le premier axe est une veille sanitaire et sociale. Peu importe le niveau d'alerte, les ARS récoltent et analysent les données de santé (maladie hivernale comme la grippe, les infections respiratoires aiguës, la gastro-entérite ou intoxication au monoxyde de carbone) et transmettent chaque semaine dans un

¹Plan National Canicule

bulletin épidémiologique leurs résultats à Santé Publique France. La veille sociale consiste à anticiper une future vague de froid et à être capable de mettre à l'abri différentes catégories de personnes identifiées comme vulnérables (personnes sans domicile fixe, isolées ou à risques). Il s'agit alors d'actions de repérage et de vérification de disponibilité de places dans les centres d'accueil. Des campagnes de prévention pour le grand public et les travailleurs sont déployées pour rappeler les conséquences sanitaires des épisodes de grand froid et les comportements à adopter. Le deuxième axe vise à protéger les populations. La veille sociale effectue les premiers accueils de nuit et distribue du matériel de première nécessité. Des accueils de jour sont aussi mis en place (douche, alimentation, etc.) ainsi que des équipes de terrain mobilisées pour aller directement à la rencontre des populations vulnérables. Comme pour le PNC, la communication se veut préventive puis d'urgence (axe 3). Avec des dépliants, des affiches, des spots radio : les messages se veulent clairs et concis pour sensibiliser au mieux la population et indiquer les premiers comportements responsables à adopter face à de telles situations. Le dernier axe permet d'analyser le déroulement du Plan Grand Froid, après le passage d'un épisode d'alerte, les acteurs concernés sont interrogés sur leurs expériences et leur analyse de l'efficacité des mesures.

Source : INSTITUT DE VEILLE ET DE SÉCURITÉ SANITAIRE (2018)

Chapitre 2

Étude de l'impact des canicules sur la mortalité

Les variations de températures influent sur la mortalité, qu'elles soient dues à de simples variations saisonnières, à des vagues de froid ou à des épisodes de canicule. Cependant, les vagues de chaleur sont de plus en plus fréquentes et intenses, et présentent un risque majeur et préoccupant pour la population. Ces vingt dernières années ont concentré plus de la moitié des vagues de chaleur identifiées depuis 1950. Pour comprendre ce phénomène et évaluer son impact sur la population, il convient d'abord d'identifier ces épisodes et d'en mesurer leurs caractéristiques (intensité, sévérité, durée). Cette partie constitue, à travers une étude rétrospective, une synthèse des canicules historiques en France métropolitaine mêlant caractéristiques climatologiques, impacts en mortalité et santé publique.

2.1 Définition et outils de mesure

2.1.1 Définition

La définition de canicule ou de vague de chaleur n'est pas scientifiquement définie et normée. En fonction des températures usuelles d'une région et de la capacité d'adaptation des populations les seuils de tolérances diffèrent. L'identification d'une vague de chaleur peut dépendre du climat (méditerranéen, continental, océanique, etc.), de l'urbanisation de la zone concernée et peut être définie à partir d'indicateurs (température moyenne, de jour ou de nuit, ressenti, durée, humidité, etc.). Le terme de canicule est propre à chaque institution et varie en fonction de son cadre d'utilisation. Il dépend principalement de sa finalité : pour des analyses climatologiques ou à des fins préventives comme pour le déclenchement de plan d'alerte tel que le PNC². Dans ce mémoire les vagues de chaleur sont identifiées au sens de l'alerte canicule, c'est-à-dire à partir des indicateurs de Météo France utilisés par Santé Publique France pour déclencher le PNC (SANTÉ PUBLIQUE FRANCE, 2019b). Pour simplifier les travaux de ce mémoire, l'échelle spatiale sera moyennée sur la France métropolitaine au lieu d'une échelle départementale. Météo France considère qu'une période est caniculaire si la moyenne des températures journalières en journée (maximale) et de nuit (minimale) est supérieure au percentile 99.5 des observations réalisées entre 1981 et 2010. Ces seuils peuvent sensiblement varier d'un département à l'autre (Table 2.1).

²Plan National Canicule

VILLE	SEUIL TEMPÉRATURE DE NUIT (°C)	SEUIL TEMPÉRATURE DE JOUR (°C)
Paris (75)	20.1	32.8
Marseille (13)	20.1	34.2
Brest (29)	16.2	28.1
Lille (59)	17.0	30.4
Chartres (28)	16.8	32.2

TABLE 2.1 : Echantillon des seuils d'alertes par ville (SANTÉ PUBLIQUE FRANCE, 2019c).

L'urbanisation influe sur les seuils de températures et ce phénomène est particulièrement visible de nuit. Par exemple les villes de Paris et Chartres ont une localisation assez proche et pourtant des seuils largement différents, cet effet est appelé « îlot urbain ».

2.1.2 Mesures et indicateurs

Pour chaque jour d'évaluation, celui-ci est considéré comme caniculaire si sa moyenne mobile minimale (resp. maximale) sur 3 jours dépasse le seuil minimal (resp. maximal). Cette moyenne mobile sur 3 jours est parfois appelée indicateur biométéorologique (IBM_{\min} et IBM_{\max}),

$$\bar{T}_{\max_j} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 T_{\max_{j-i}} \quad \bar{T}_{\min_j} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 T_{\min_{j-i}}.$$

Pour chaque vague caniculaire, différents indicateurs sont calculés pour déclencher le bon niveau du plan d'alerte en adéquation avec le danger lié à la vague. Ces indicateurs permettent également d'évaluer et de classer les canicules entres-elles. Dans ce mémoire, les indicateurs retenus sont : la durée, la sévérité cumulée et l'intensité. La durée correspond au nombre de jours consécutifs au-dessus des seuils d'alerte. La sévérité cumulée est la somme des sévérités pendant la vague, avec la sévérité définie comme la somme des écarts aux seuils :

$$\text{severite}_j = |\bar{T}_{\min_j} - \text{seuil}_{\min}| + |\bar{T}_{\max_j} - \text{seuil}_{\max}|.$$

L'intensité d'une vague correspond à la somme des maximums d'écarts aux seuils observés :

$$\text{intensite} = \max_j [\bar{T}_{\min_j} - \text{seuil}_{\min}] + \max_j [\bar{T}_{\max_j} - \text{seuil}_{\max}].$$

2.2 Historique des températures en France et principaux épisodes de canicule

2.2.1 Introduction

Les aléas climatiques ont engendré de nombreuses vagues de décès au cours de l'histoire de France. Des périodes de grands froids aux épisodes caniculaires, les phénomènes météorologiques intenses ont eu de lourdes répercussions sur la mortalité humaine. Ainsi, le grand hiver de 1708-1709 aurait été à l'origine de 600 000 décès, principalement dus aux famines relatives aux mauvaises récoltes (gel des exploitations). Plus récemment, la France a enregistré deux canicules particulièrement mortelles : en 1911 avec un excès de 40 000 décès et en 2003 avec 17 500 décès (E. LE ROY LADURIE ET D. ROUSSEAU, 2009). Les fortes chaleurs impliquent une surmortalité conséquente, mais les températures hivernales font généralement beaucoup plus de victimes. L'année 1929 a marqué l'histoire en étant

l'hiver le plus meurtrier du XX^{ème} siècle, avec 102 000 décès présumés dus aux températures. Le lien température-mortalité a fait l'objet de nombreuses études et recherches et constitue une problématique grandissante à la vue des projections climatiques actuelles. Les principales études sont rétrospectives et évaluent les liens et les répercussions entre ces deux agents en tentant d'identifier les facteurs d'atténuation ou d'aggravation. La variation de la mortalité journalière due aux températures s'évalue aux alentours de 30% sur la population française (BESANCENOT, 2000). Cette corrélation en forme de « U » ou « V » est régulièrement observée¹ et permet d'identifier l'optimum thermique pour lequel le niveau de décès est le plus bas (17.2 à 20.2 degrés en moyenne pour la population française). La sensibilité autour des faibles températures est accrue et engendre plus de décès que les fortes chaleurs. Les vagues de froid ont de surcroît une incidence sur le long terme, alors que les effets dus à la hausse des températures sont visibles très rapidement.

2.2.2 Historique des températures en France

Évolution des températures moyennes annuelles

Alors que le climat mondial s'est réchauffé d'environ 1°C à la surface du globe sur le siècle dernier, la France métropolitaine quant à elle a subi une augmentation de plus de 1.5°C. Avec 0.1°C d'augmentation par décennie, la tendance s'accélère depuis le XXI^{ème} siècle avec +0.31°C par décennie (MÉTÉO FRANCE, s. d.[c]). Sur les données récoltées auprès du GHCN, la tendance observée correspond aux bilans de Météo France. La température moyenne annuelle en France métropolitaine se situe entre 11.5 et 13.5°C (Figure 2.1). La tendance qui s'en dégage est claire. Depuis 1980, les températures augmentent. En observant chaque décennie, on parvient à des conclusions similaires à celles de Météo-France. Entre la décennie 1950-60 et 1960-70 les températures ont légèrement chuté (-0.18°C) avant de se stabiliser jusqu'aux années 80. Elles ont brutalement augmenté sur la période 1980-2000 (+0.43°C puis +0.57°C soit + d'un degré sur 20 ans). La tendance a semblé se calmer sur la première décennie de 2000, malgré la présence remarquable de l'année 2003 avec un pic à 13.21°C en moyenne sur l'année (année de la canicule historique), l'augmentation continue avec +0.3°C jusqu'en 2019 avec une recrudescence des périodes caniculaires. Les variations annuelles exceptionnelles observées (fortes intempéries, vagues de chaleur extrême) attestent d'une évolution climatique globale et de son instabilité grandissante.

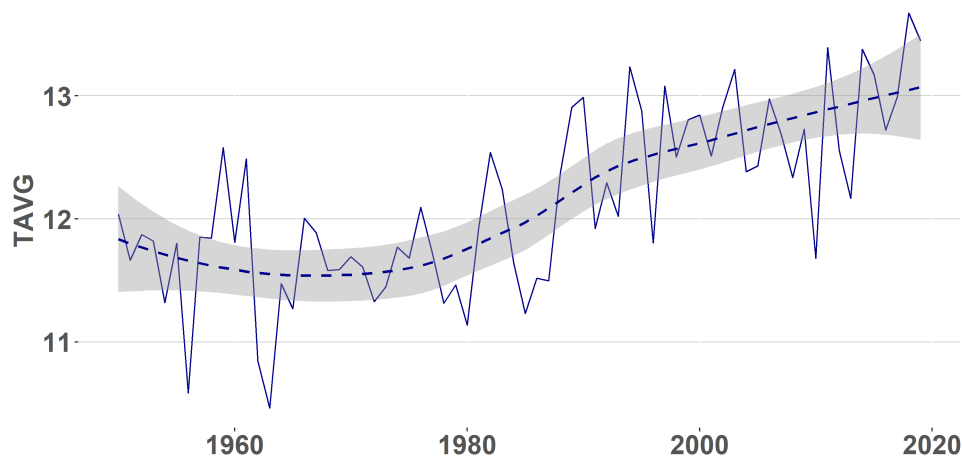


FIGURE 2.1 : Température moyenne annuelle en France Métropolitaine de 1950 à 2019 (données GHCN).

¹FRANCK C. CURRIERO AND AL. (2002)

Bilan de ces observations : des pics annuels sont observables et sont majoritairement le solde d'une présence de vague de froid ou de chaleur durant l'année, la moyenne décennale augmente et en complétant cette série par des observations plus anciennes le constat d'une accélération de cette croissance est largement établi.

En analysant ces observations ville par ville, la présence de la mer semble atténuer la vitesse de réchauffement (Brest, Caen, Nantes), mais globalement la croissance est visible partout et à vitesse comparable, avec peut-être une sensibilité accrue pour Lyon (Figure 2.2).

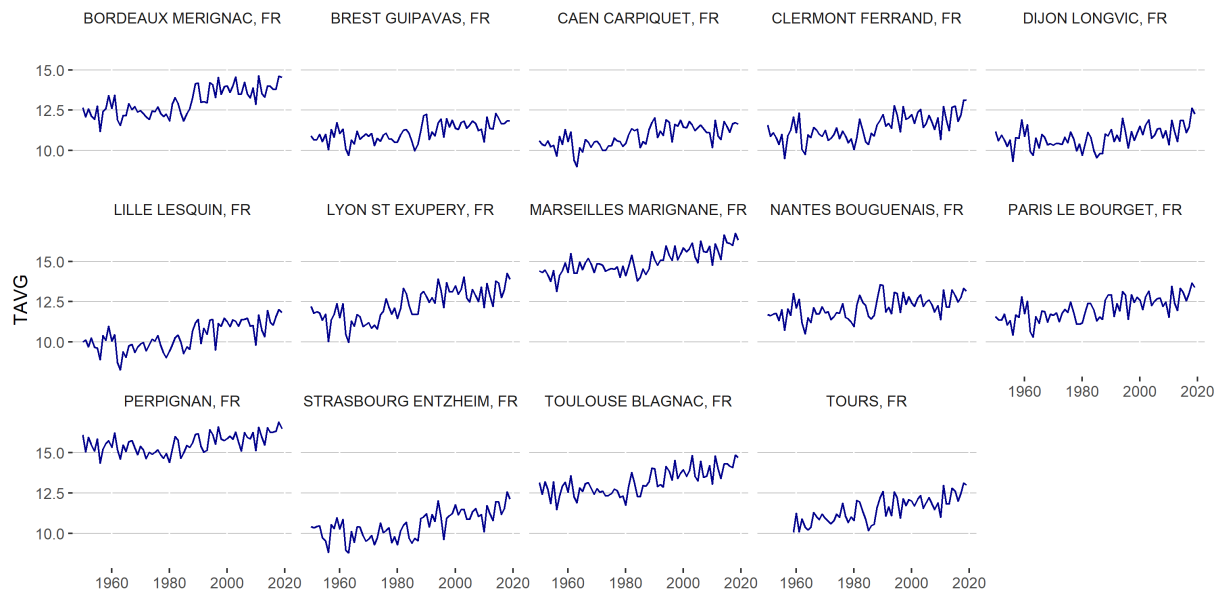


FIGURE 2.2 : Températures moyennes par villes en France Métropolitaine entre 1950 et 2019 (données GHCN).

Application des indicateurs et identification des principales canicules

Avec la définition de canicule présentée en partie 2.1.2, et en utilisant des seuils moyennés à l'échelle de la France les vagues de chaleur sont identifiées. Ainsi, sur chaque année et depuis 1950, les périodes caniculaires, leurs durée, intensité et sévérité sont calculées. Depuis 1950, l'apparition des épisodes de canicules ne cesse de croître, les vagues de chaleur sont plus nombreuses et durent de plus en plus longtemps (Figure 2.3). Sur la période 1950-1980 avec les seuils de 18°C en minimum et 30°C en maximum, le tout en moyenne sur la France, seules 5 périodes sont considérées comme caniculaires. Sur ces 3 décennies, deux épisodes ont fortement marqué la France : la canicule de 1975 et l'importante sécheresse de 1976 (voir le détail de cet épisode en partie 2.3.1). Ces deux événements sont largement plus visibles en abaissant le seuil minimal à 17°C (Figure 2.4) ce qui atteste d'un léger refroidissement la nuit. Pour la période 1980-2000, le nombre de vagues de chaleur augmente. En 20 ans, 8 vagues avec une durée modérée sont observées et coïncident avec la pente observée en Figure 2.1. En revanche, la durée et la fréquence augmentent considérablement sur la période 2000-2020. La canicule de 2003 et celle de 2006 ressortent particulièrement avec respectivement 15 jours et 14 au-dessus des seuils 18 et 30 °C, et 19 et 15 jours pour les seuils 17 et 30°C. Sur cette simple vision, les vagues de chaleur sont identifiées et comparables entres-elles par leur durée. D'autres indicateurs sont calculés afin de mesurer l'intensité et la sévérité de la vague. Ainsi, deux canicules aux durées équivalentes comme 2003 et 2006 vont s'avérer être tout à fait différentes. En Figure 2.6, la vague de 2003 s'avère être l'une des plus intenses juste après celle 2019 tandis que celle de 2006 a une intensité modérée.

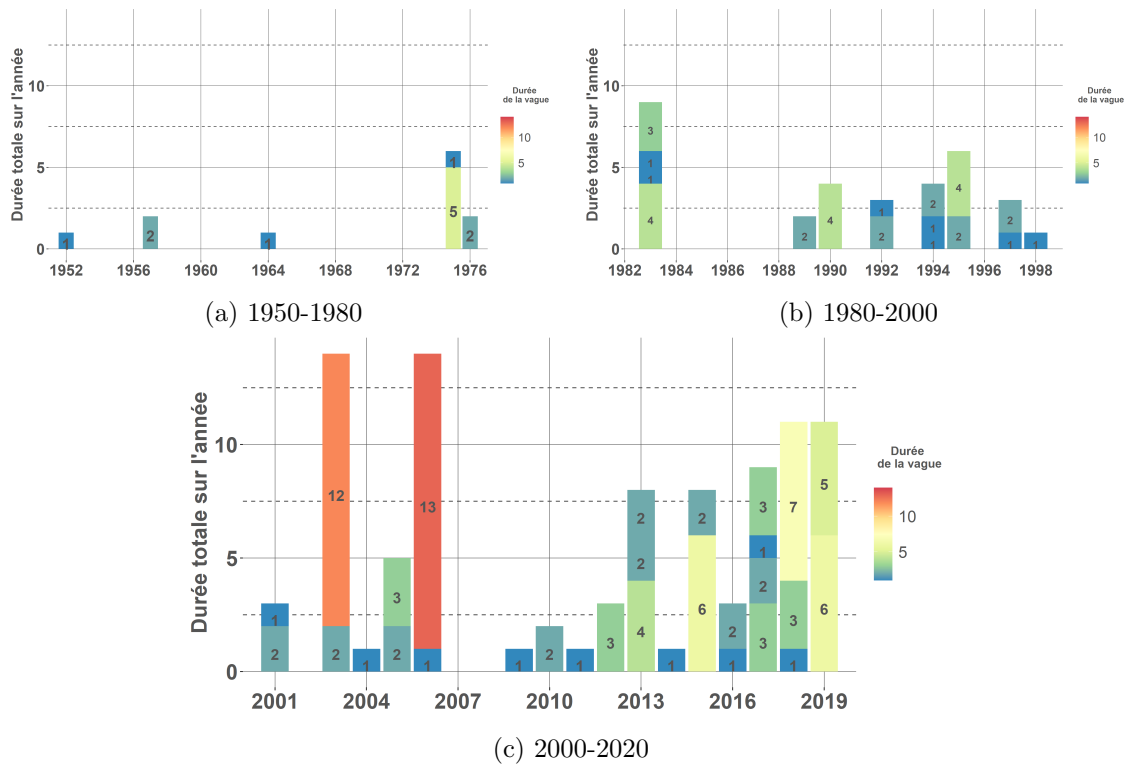


FIGURE 2.3 : Nombre de jours consécutifs par vague caniculaire depuis 1950 (seuil min = 18°C et seuil max = 30°C).

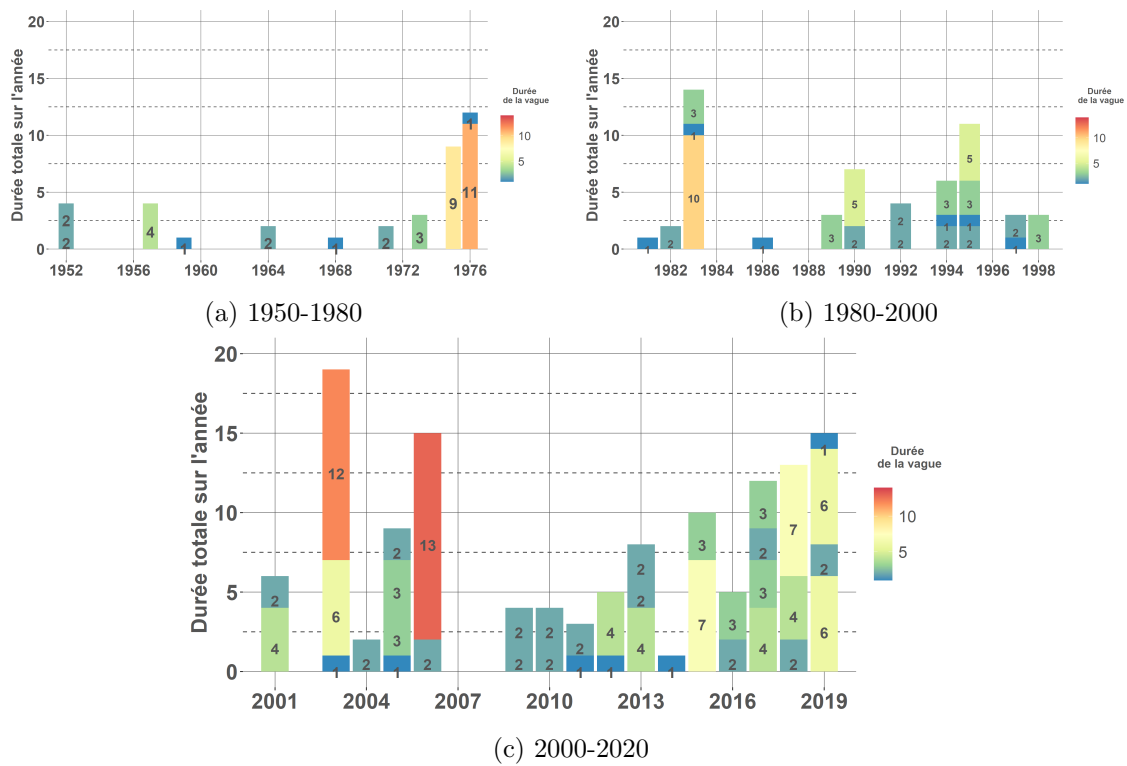


FIGURE 2.4 : Nombre de jours consécutifs par vague caniculaire depuis 1950 (seuil min = 17°C et seuil max = 30°C).

2.2.3 Historique des canicules en France

Les vagues de chaleur sont particulièrement surveillées puisqu'elles sont responsables d'épisodes de surmortalité et d'impacts sanitaires importants (passages aux urgences et hospitalisations). L'épisode le plus marquant en France reste l'été 2003 avec plus de 15 000 décès. Cet épisode a cumulé intensité et durée ce qui explique ces conséquences sanitaires. Cette canicule est détaillée dans la partie suivante. L'année 2019 est marquée par une vague particulièrement intense mais plus brève, la population étant avertie et mieux préparée les conséquences ont été modérées.

Date	Durée cumulée	Décès attribué	
		<i>Santé Publique France</i>	<i>Cred Em'Dat</i>
1976			
Fin juin – mi-juillet	-	4 540	-
1983			
9 juillet – 31 juillet	22 jours	2 900	-
2003			
1er août – 20 août	20 jours	15 257	19 490
2006			
15 juillet – 23 - juillet	8 jours	1 442	1 388
2015			
29 juin – 07-juillet	8 jours	1 739	3 275
12 juillet – 27 juillet	15 jours		
4 – 14 août	10 jours		
2018			
24 juillet – 8 août	15 jours	1 641	-
2019			
24 juin – 7 juillet	13 jours	1 462	1 435
21 juillet – 27 juillet	6 jours		
2020			
26 juillet – 03 août	8 jours	1 924	1 924
07 août – 16 août	9 jours		

TABLE 2.2 : Principales canicules en France Métropolitaine : durée et décès associés.

Les données présentées ci-dessus sont extraites des Bulletins de Santé Publique France sur les étés concernés, elles sont complétées des publications de l'Institut de Veille Sanitaire (INVS, 2015), (SPF, 2018), (SPF, 2019a), (SPF, 2020). L'agence nationale de santé publique rédige en fin de chaque été une note analysant la situation au pas départemental, régional et national. Les données sur les années les plus anciennes (1976, 1983, 2003, 2006) proviennent d'une étude sur les canicules depuis 1970 (SPF, 2019b). À titre comparatif, une seconde source est affichée, il s'agit des données du

CRED-EM'DAT (D. GUHA-SAPIR, s. d.). Cette base de données ouverte et gratuite est un projet de l'IRDR (Integrated Research on Disaster Risk) datant de 2014 (IRDR, 2014). Le CRED-EM'DAT fait partie des 3 plus importantes bases de données en matière de catastrophes à l'échelle mondiale avec celles de MunichRe's NatCatSERVICE et SwissRe's Sigma (RE, s. d.), (SWISS RE GROUP, s. d.). Elle est alimentée par de nombreuses sources gouvernementales et non gouvernementales, assureurs et réassureurs, agences de presse, et entités spécialisées (ex. WHO/OMS des Nations Unis pour les épidémies et pandémies, Smithsonian pour les éruptions volcaniques). Elle regroupe les informations de différentes organisations mondiales (Nations Unis, SwissRe, MünchenRe, NOAA, etc.).

Des différences importantes sur la surmortalité évaluée peuvent exister en fonction de la source retenue. Cela s'explique par les manières de calculer un excès de décès sur une période donnée (écart à la moyenne historique, Z-score, etc.) mais également du choix de la période de référence et du nombre de jours de calcul de la surmortalité.

Les différents impacts sur les taux de décès journaliers en fonction des années sont visualisés ci-dessous (Figure 2.7). Ce graphique a été produit à partir des données INSEE utilisées dans ce mémoire, elles proviennent d'une demande personnalisée auprès du réseau Quetelet afin d'obtenir des tableaux sur-mesure. L'année 2020 n'est pas représentée car absente des données reçues.

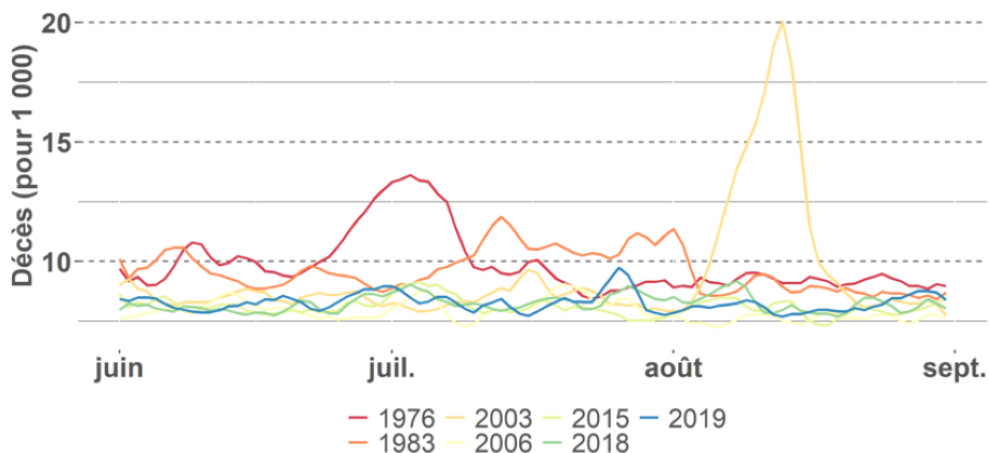


FIGURE 2.7 : Taux de décès journaliers annualisé, pour 1 000 habitants, sur les années à importantes canicules (données INSEE).

2.3 Analyse détaillée de 3 épisodes de canicules historiques

Pour comprendre l'impact humain de la chaleur estivale, 3 années présentant différents types de canicules du point de vue des indicateurs sont analysées. Les étés 1976, 2003 et 2015. Les indicateurs utilisés dans ce mémoire pour caractériser une canicule sont la sévérité qui est l'écart aux seuils, la sévérité cumulée qui est la somme des écarts aux seuils durant la vague, la sévérité moyenne est la moyenne des sévérités journalières, l'intensité est le plus important écart aux seuils observés durant la canicule. T_{MAX} , T_{MIN} et T_{AVG} correspondent aux moyennes des températures maximale, minimale et moyenne pendant la vague. Pour l'étude de ces canicules les seuils de détections ont volontairement été abaissés à 17°C pour la moyenne mobile sur 3 jours de températures minimales et respectivement 30°C pour la maximale. Sans ce changement de seuil, la canicule de 1976 n'apparaît pas puisque les températures minimales étaient en moyenne au plus bas entre 17 et 18 degrés.

Année	Durée	Sévérité cumulée	Sévérité moyenne	Intensité	T_{MAX}	T_{AVG}	T_{MIN}
1976	11 j.	33.7	3.1	4.0	32.1	25.0	17.7
2003-07	6 j.	10.8	1.8	3.6	32.5	24.4	16.5
2003-08	12 j.	104.3	8.69	10.2	36.9	27.5	18.9
2015	7 j.	24.6	3.5	4.6	31.6	24.8	18.8

TABLE 2.3 : Caractéristiques des vagues de chaleur de 1976, 2003 et 2015.

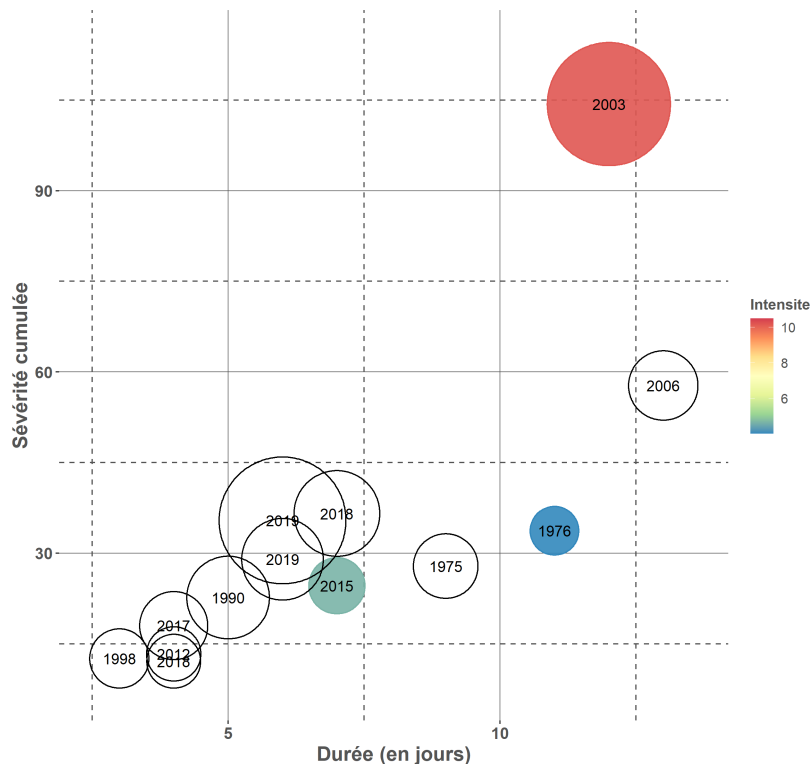


FIGURE 2.8 : Vagues caniculaires de 1950 à 2019 (données GHCN).

2.3.1 L'été de 1976

L'année 1976 a marqué l'histoire par sa terrible sécheresse considérée comme l'une des plus importante du XX^{ème} siècle. À partir de la mi-juin, des températures très élevées s'abattent sur la France en plus d'une absence de pluie. D'un point de vue historique ce climat extrême a engendré de lourdes répercussions sur le milieu agricole et celui des transports : certains agriculteurs peinent à nourrir leurs animaux, les récoltes sont fortement affectées, et des chauffeurs de bus refusent de travailler dans de telles conditions. L'été sera marqué par des incendies notamment en Charente, et de l'aridité des cours d'eau, la Loire étant presque à sec à Tours. Des indemnités exceptionnelles ont été accordées aux différents secteurs touchés grâce à un impôt spécialement dédié à cette crise.

Dans les années 70-80, en période estivale, on comptait en moyenne 1 300/1 400 décès journaliers, ce nombre est passé à plus de 2 000 le 3 juillet 1976 et les taux de mortalité ont augmenté de 3.45 points en moyenne sur la période de canicule. On évalue un excès de décès en comparaison à la moyenne historique de plus de 5 000 sur l'été, Santé Publique France a évalué ce chiffre à 4 540 sur la période fin juin début juillet dans son rapport de 2019.

La violence de cet épisode fait suite à des mois de faible voire d'absence de précipitations depuis l'automne 1975. Dès le mois de mai les températures sont largement au-dessus des normales de saison, et cela est d'autant plus visible en juin avec un pic en fin de mois et début juillet. En moyenne sur la totalité de la France, la température maximale atteint 35°C.

Avec la définition de canicule à partir de seuil, la vague de chaleur aurait duré 11 jours consécutifs avec une température moyenne de plus de 25°C sur la période, jour et nuit confondus. Au-delà de son lourd bilan humain (même s'il ne représente qu'un tiers du bilan de 2003), cette année a marqué les populations par ses nombreuses répercussions économiques et son impact sur la vie quotidienne des Français.

2.3.2 L'été de 2003

Les températures relevées en 2003 ont atteint des sommets : elles ont été les plus élevées depuis les années 50. La période caniculaire a couplé intensité exceptionnelle et longue durée, ce qui entraîna une forte surmortalité. Cette vague a touché d'autres pays européens, majoritairement en Europe occidentale mais avec des intensités moindres, la France restant la plus touchée. Les températures extrêmes ont été accompagnées d'une pollution en ozone significative influant sur le bilan humain.

Cette canicule n'a pas été correctement appréhendée et a surpris non seulement la population mais aussi les autorités par sa soudaineté et sa violence. Pour éviter une telle situation à l'avenir, les nombreux pays touchés ont par la suite mis en place ou amélioré leur Plan d'Alerte Canicule.

Situation météorologique : L'ensemble de l'été 2003 est touché par de fortes chaleurs dès la mi-juillet avec une intensité maximale et durable sur la première quinzaine du mois d'août. L'ensemble du territoire a été touché, 15% des stations météorologiques ont enregistré des températures supérieures à 40°C de façon prolongée. Entre le 1^{er} et le 18 août, les températures atteignaient plus de 35°C de façon systématique pour le sud de la France, et très régulièrement pour la partie centrale du pays, avec des températures atteignant 40°C sur une dizaine de jours en cumulé (Figure 2.9).

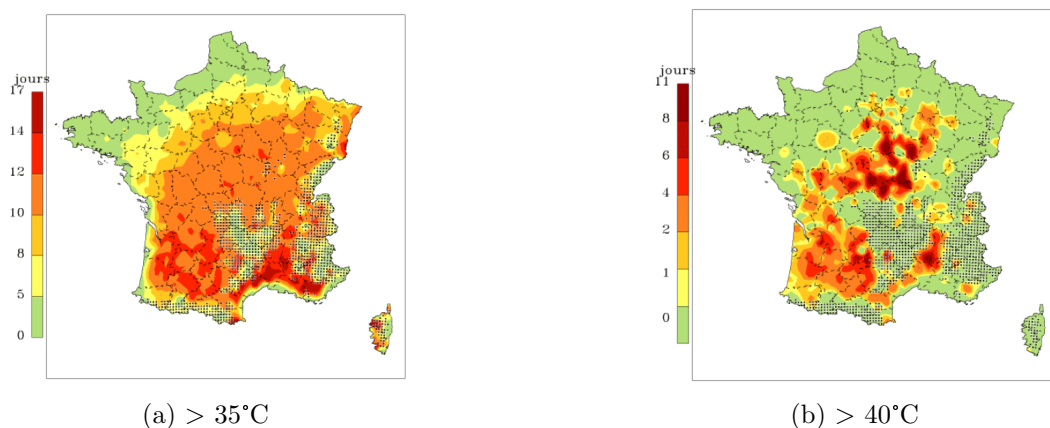


FIGURE 2.9 : Nombre de jours au dessus de 35°C et 40°C entre le 1er et le 18 août 2003 (MÉTÉO FRANCE, s. d.[b])

Lorsqu'en journée les températures atteignaient des sommets, les nuits peinaient à se rafraîchir empêchant les habitations d'abaisser leur température intérieure. Ce phénomène a été d'autant plus marqué dans les agglomérations importantes (Paris, Lyon, Marseille) à cause des îlots de chaleur. Cela a impliqué qu'en moyenne les températures (jour et nuit confondus) étaient largement supérieures aux normales historiques (référence 1999 - 2002), avec +7°C au Mans, +6.7°C pour Paris, +4°C à Lille, +4.2°C pour Marseille ou encore +9.5°C à Poitiers.

Climat particulièrement intense couplé à des niveaux d’ozone élevés : Le seuil d’alerte pour les concentrations d’ O_3 est fixé à $180 \mu g/m^3$ en moyenne horaire. Ce seuil a été largement dépassé durant l’été 2003. Les concentrations d’ozone étaient au-dessus des seuils pendant une trentaine de jours en Ile-de-France et Alsace, et près de 50 jours en Provence-Alpes-Côte d’Azur (PACA) (Table 2.4).

Ville	1999	2000	2001	2002	2003
Bordeaux	4	0	1	2	9
Grenoble	0	1	3	10	24
Le Havre	1	1	4	0	7
Le Mans	1	0	0	0	5
Lille	1	3	3	2	12
Lyon	6	2	5	5	16
Marseille ^a	11	5	22	10	29
Nice	ND ^b	0	1	4	15
Paris	2	1	7	3	13
Poitiers	0	0	0	0	4
Rennes	0	0	0	0	0
Rouen	1	0	3	1	4
Strasbourg	0	7	12	4	27
Toulouse	1	0	1	0	6
Total	ND ^b	20	62	41	171

TABLE 2.4 : Nombre de jours au dessus du seuil d’alerte d’ozone (InVS, 2003).

Par ailleurs, grâce à plusieurs études il est maintenant démontré que la pollution en ozone accentue la surmortalité attendue par une vague de chaleur. Cette relation est détaillée en partie 1.3.3.

Un bilan humain record : Le 6 août, un premier signalement de 3 décès liés à la chaleur est remonté à l’InVS et la Direction Générale de la Santé (DGS) : il s’agit de sujets de 35, 45 et 56 ans décédés sur leur lieu de travail dans le Morbihan. D’autres signalements vont suivre mais la gravité de la situation n’est pas encore mesurée. Le 11 août, le ministère de la Santé lance une enquête nationale sur les récents décès liés aux coups de chaleur en hôpitaux. L’enquête est confiée à l’InVS et sera complétée de recherches et synthèses bibliographiques sur les liens entre vagues de chaleur et mortalité, pour mieux appréhender la situation. Ce n’est que le 13 août, à la suite des publications des données de mortalité hospitalière de l’APHP (Assistance publique-Hôpitaux de Paris), qu’on comprend qu’une surmortalité sans précédent est en train de frapper la France. Les chiffres sont également appuyés par les données des Pompes Funèbres générales (PFG) qui enregistrent une activité en hausse de 25%. D’autres enquêtes sont lancées pour mesurer la surmortalité « brute » en France métropolitaine et évaluer les conséquences sanitaires de la vague de chaleur. Les premiers résultats parviennent au Ministère de la Santé le 20 août et font un bilan de 11 435 décès en excès sur la première quinzaine d’août. Au bilan de l’été, dès le 4 août plus de 400 décès en excès étaient recensés, puis 3 900 le 8 août, 10 600 le 12 août et 14 800 le 20 août (InVS, 2003).

2.3.3 L'été de 2015

La période estivale de 2015 se classe au second rang des étés les plus chauds, à égalité avec 2017, et après 2003, sur la période 1950-2017. Quand 2003 dépassait de 3.2°C les moyennes saisonnières (moyenne sur 1981-2010), l'été 2015 a vu ses températures supérieures aux normales de +1.5°C. En Figure 2.10 on peut visualiser jour à jour les écarts à la moyenne historique, en global sur la France entière. Le début de l'été est sec et chaud, et est marqué successivement par 2 vagues de chaleurs sur le mois de juillet. Les sols sont extrêmement secs, en particulier au Nord-Est du pays. Le mois d'août se rafraîchit et apporte quelques précipitations, à l'exception du Nord de la France qui reste plus sec et chaud que la normale. Sur l'ensemble de la période, l'ensoleillement a été excédentaire de 10% sur presque l'ensemble du territoire (MÉTÉO FRANCE, s. d.[a]).

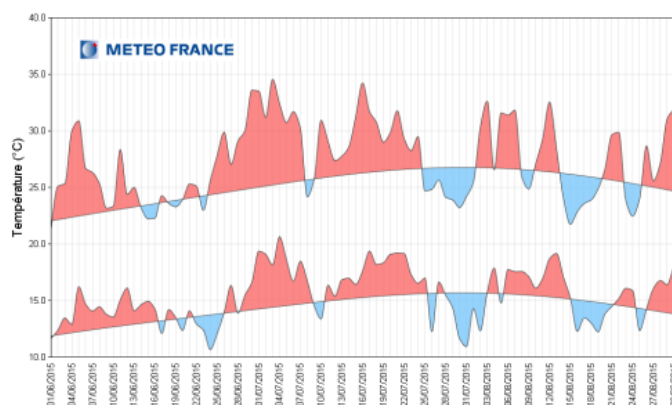


FIGURE 2.10 : Évolution des températures moyennes minimales et maximales quotidiennes en France du 1^{er} juin au 31 août 2003, écart à la moyenne historique (MÉTÉO FRANCE, s. d.[a]).

En vision départementale, 4 périodes ont dépassé les seuils départementaux sur 3 jours glissants :

- Du 29 juin au 8 juillet sur 42 départements, majoritairement sur le Nord-Est et Centre-Est,
- Du 11 au 26 juillet sur 24 départements, sur le Centre-Est et le Sud-Est,
- Du 4 au 14 août sur 17 départements de l'Est,
- Du 28 au 31 août sur le Puy-de-Dôme et le Rhône.

Sur ces vagues caniculaires, la vigilance orange du PNC¹ a été déclenchée, mais les alertes sont restées localisées à l'Est du territoire, à Paris et sa petite couronne et au Sud-Est du pays (INVS, 2015).

¹Plan National Canicule

Évaluation de la surmortalité : Au total, une cinquantaine de départements ont été touchés par des canicules, et plus d'une vingtaine par au moins deux canicules. Sur ces départements, 45 présentent une surmortalité qui engendra environ 1 700 décès en excès, dont la majeure partie provient des plus de 75 ans suivie de la tranche des 45-75 ans. Les départements les plus touchés sont l'Yonne et la Haute-Saône avec une surmortalité 49,4% et 49,0% pour 100 et 111 décès en excès (Figure 2.11).

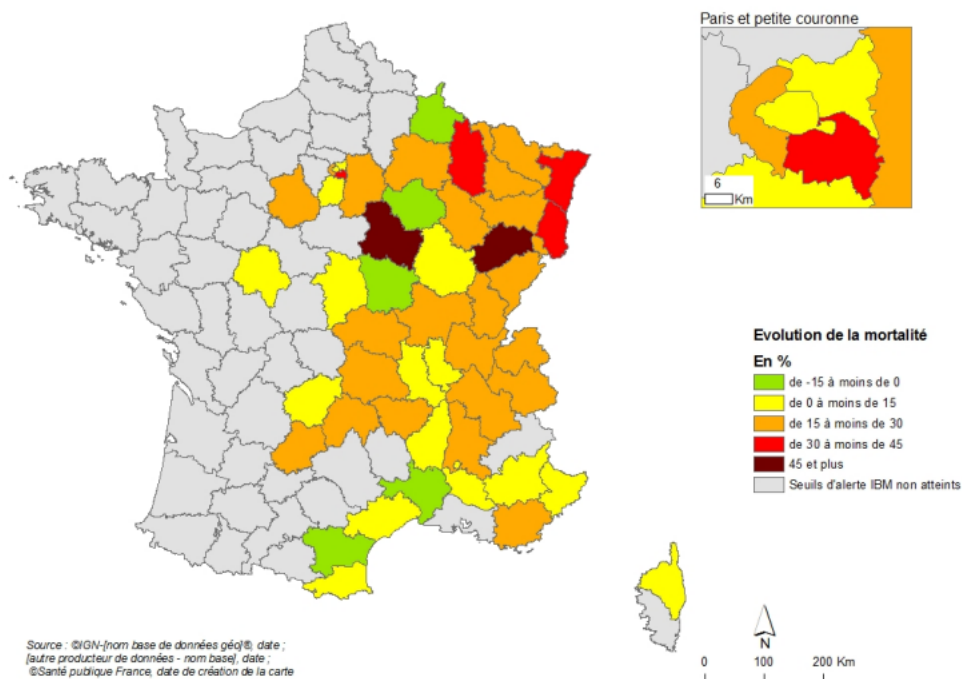


FIGURE 2.11 : Évaluation de la surmortalité par département, été 2015 (SANTÉ PUBLIQUE FRANCE, 2019b).

2.3.4 Conclusion et comparaison

Ces 3 canicules présentent chacune des singularités et les impacts ne sont pas du tout les mêmes. Au-delà de la relation température mortalité, d'autres facteurs sont à prendre en compte et notamment la période d'évaluation. D'un point de vue météorologique, 1976 en moyenne sur l'été entier est moins chaud que 2003 et 2015. Mais cette année est surtout impactée par un déficit en précipitation qui entraîna une énorme sécheresse. Les températures ont été très hautes courant juillet, sur une époque où la prévention et l'information des populations étaient largement moins développées. L'absence de prévention et de protection des populations est également un facteur aggravant de 2003, et qui impliquant qu'aujourd'hui une telle situation ne serait pas reproductible.

Pour comparer les décès en excès sur ces 3 années, on peut soit se ramener à une vision globale sur juin, juillet et août en cumulés, ou sur la période caniculaire uniquement. D'une part, en vision estivale, on va retenir tous les plus petits dépassements de seuils, puisqu'on sait que même de très légères hausses de températures entraînent une surmortalité associée. D'autre part, en vision par vague, la durée va fortement influencer sur le nombre de décès en excès retenus, et ne prendra pas en compte un éventuel effet moisson, avec une sous-mortalité dans les jours suivant l'exposition.

Sur l'été entier de 1976, avec les données récoltées auprès de l'INSEE, le nombre de décès excédentaires est estimé à 5 194, contre 18 431 pour 2003 et 2 063 pour 2015. La surmortalité est estimée comme écart à la moyenne historique sur les 5 années précédentes. Avec cette méthode, une évaluation quantitative en terme de décès est calculée et permet quelques comparaisons. Un calcul réalisé uniquement sur la durée instantanée de la canicule ne prendra pas en compte les effets observés avec un décalage temporel. D'une part les longues expositions peuvent influencer sur des pathologies cardiaques et les conséquences surviennent alors plusieurs jours après la vague. D'autre part un rattrapage sous forme de sous-mortalité lié à l'effet moisson survient dans les jours suivant le pic de chaleur.

Année	Population	Taux de décès pour 1 000		Nombre de décès journalier	
		Historique	Pendant la vague	Historique	Pendant la vague
1976	53.4m	9.37	+ 3.45	1 389	+491.4
2003 -07	58.9m	8.27	+ 0.99	1 353	+ 192.8
2003 -08			+ 6.7		+ 1 146
2015	64.2m	7.98	+ 0.99	1424	+ 178.5

Année	Nombre de décès en excès	
	Pendant la vague	Pendant l'été
1976	5 897	5 194
2003 -07	1 567	18 431
2003 -08	13 749	
2015	1 249	2 063

TABLE 2.5 : Surmortalité observée pendant les vagues de chaleur de 1976, 2003 et 2015.

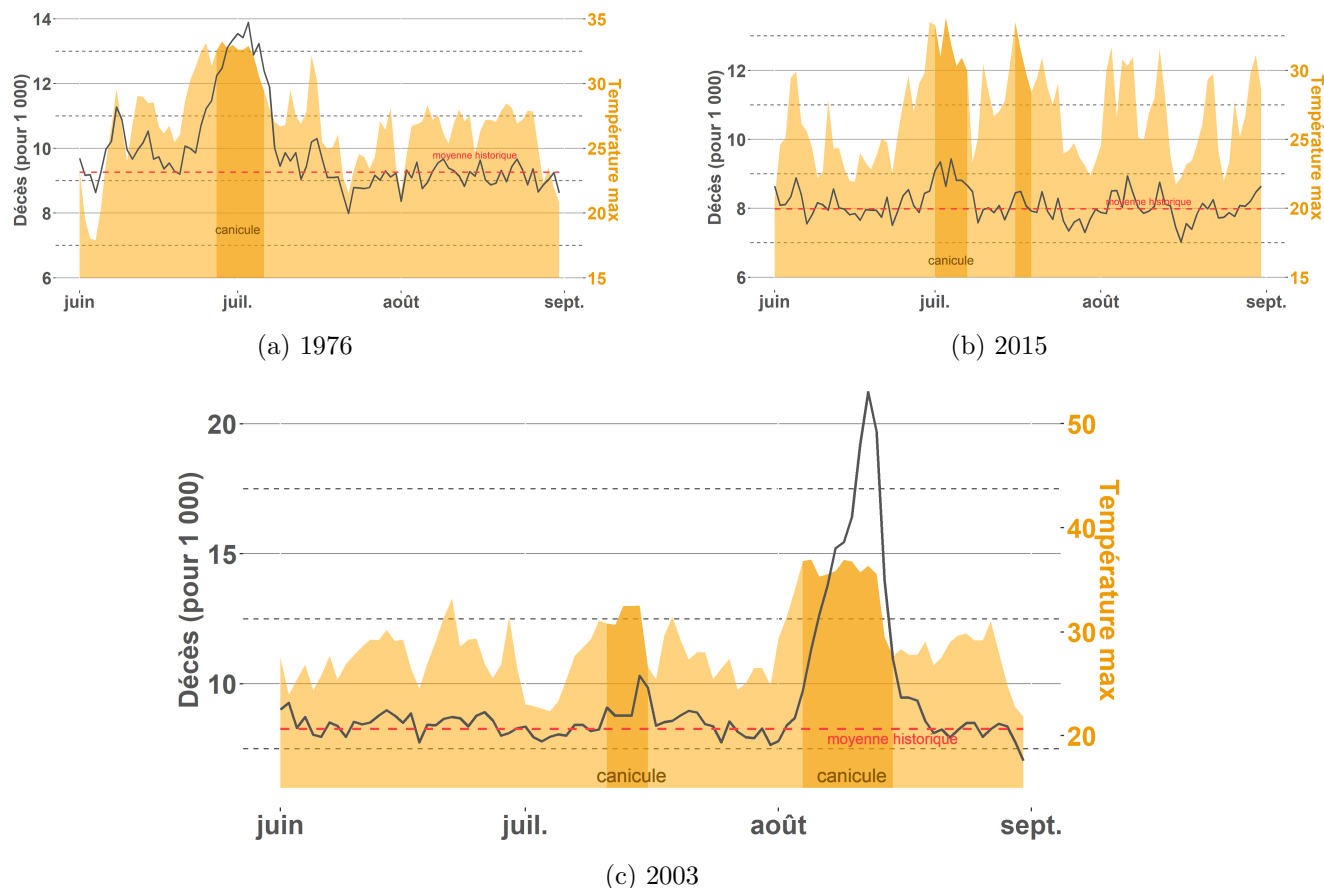


FIGURE 2.13 : Taux de décès journaliers annualisé, pour 1 000 habitants, et températures maximales journalières sur les années 1976, 2003 et 2015. La courbe grise correspond au taux de décès, l'aire en orange représente la température moyenne, l'aire en orange foncé : les périodes de canicules, la ligne rouge : la moyenne des taux de décès sur les 5 années précédentes. Données INSEE et GHCN.

Les 3 étés cités ci-dessus sont imagés en Figure 2.13 la température maximale (orange), le taux de décès journaliers pour 1 000 en annualisé (gris), et la moyenne historique sur 5 ans (rouge). La corrélation entre décès et température maximale est frappante : les courbes suivent les mêmes dynamiques et ce même en dehors des périodes caniculaires. La corrélation en été est positive (hausse de température entraînant une hausse de décès) et négative en hiver (baisse des températures entraînant une hausse des décès), corrélations qui découlent du lien température-mortalité.

Depuis 2004, le Plan National Canicule a montré son efficacité, et une situation comme 2003, comparable à une épidémie, ne serait pas reproductible. Pourtant, depuis 2017, chaque année le plan d'alerte est déclenché. Les températures sont de plus en plus extrêmes et les projections climatiques prévoient des étés similaires à 2003 récurrents. En 2019, la vigilance rouge du PNC a été déclenchée pour la première fois face à des épisodes intenses mais de courte durée. Depuis 2015, les canicules sont atypiques, étendues et intenses ce qui entraîne chaque année une surmortalité et morbidité conséquente.

Face au défi du changement climatique et à l'exposition grandissante des populations aux canicules, il est nécessaire de mettre en place de nouvelles mesures de prévention et protection et d'anticiper les impacts futurs sur la population de canicules toujours plus longues et extrêmes.

Chapitre 3

Modélisation des effets températures sur la mortalité

Les effets biologiques engendrés par les températures sont observables même après plusieurs jours passés. Tout comme les conséquences de la pollution atmosphérique ou l'effet d'un médicament sur le corps humain l'impact réel et total n'est pas immédiatement visible au premier jour. C'est pourquoi on utilise ici un modèle qui va prendre en compte les effets immédiats et différés. Il est primordial de regarder les effets futurs dans une étude de mortalité liée aux températures extrêmes, en particulier dans le cas des vagues de chaleur. Lors d'une canicule les premiers impactés sont les personnes extrêmement vulnérables et très âgées. On observe une hausse de mortalité immédiate chez ce groupe d'individus suivie d'un rattrapage, c'est à dire d'une période de sous-mortalité. Il s'agit d'un effet typique des canicules observable sur ce type de population qui, d'un point de vue médical ou temporel serait très probablement décédé dans un futur proche. Leur décès sont alors précipité par les températures, c'est ce qu'on appelle l'effet moisson. Autrement dit, il s'agit de décès anticipés, occasionnés par une variable extérieure, sur des personnes dont le décès dans un futur proche était attendu. Au global, en observant sur une plus large période, cet effet n'a pas de conséquence majeure puisqu'il est immédiatement rattrapé. Une modélisation avec une prise en compte des effets futurs permet de compenser une surmortalité importante immédiate face aux hautes températures avec une sous-mortalité en $t + L$ qui s'explique simplement par un rattrapage de ces décès prématurés.

3.1 Modèle CSDL - Constrained Segmented Distributed Lag Model

3.1.1 Présentation générale du modèle

Les effets liés aux températures sur les décès sont reproduits dans le modèle biométrique présenté ci-dessous (MUGGEO, VMR, 2010). Ce modèle propose une prise en compte de contraintes et de retards pour modéliser les effets de températures sur la mortalité. En prenant $\mathbb{E}[D_t] = \lambda_t$ le nombre de décès attendu pour le jour $t = 1, 2, \dots, T$, z_t est la température moyenne du jour t , et x_t^\top un vecteur de variables explicatives supplémentaires telles que l'année, le jour de la semaine ou le mois. Il est supposé que le nombre de décès $D_t \sim Pois(\lambda_t)$ avec $\lambda_t = E_t \times \mu_t$ où E_t est l'exposition au risque et μ_t la fonction de hasard

$$\ln(\lambda_t) = \mathbf{x}_t^\top \boldsymbol{\delta} + \sum_{l_1=0}^{L_1} \beta_{1l_1} (z_{t-l_1} - \psi_1)_- + \sum_{l_2=0}^{L_2} \beta_{2l_2} (z_{t-l_2} - \psi_2)_+, \quad (3.1)$$

avec $(z - \psi_1)_- = (z - \psi_1) \mathbb{1}_{(z < \psi_1)}$ et $(z - \psi_2)_+ = (z - \psi_2) \mathbb{1}_{(z > \psi_2)}$. Cette partie permet de prendre en compte les effets des hautes températures lorsqu'on se trouve au-dessus du seuil de chaleur, et

respectivement des faibles températures lorsqu'on se retrouve en dessous du seuil de froid. Les seuils ψ_1 et ψ_2 peuvent être regroupés en un unique seuil ψ qui est théoriquement égale au MMT¹.

Le vecteur, $\beta_2 = (\beta_{20}, \beta_{21}, \dots, \beta_{2l_2}, \dots, \beta_{2L_2})^\top$ peut alors être interprété comme l'effet retard du log risque relatif pour une hausse de température proportionnelle à l'écart au seuil de chaleur ψ_2 , il s'agit du risque provenant des jours $0, 1, \dots, l_2, \dots, L_2$ précédent. De même, on aura $\beta_1 = (\beta_{10}, \beta_{11}, \dots, \beta_{1l_1}, \dots, \beta_{1L_1})^\top$ l'effet retard du log risque relatif pour une baisse de température proportionnel à l'écart au seuil de froid ψ_1 . En résumé, β_1 et β_2 modélise la courbe de décalage d'effet du chaud et du froid. Ces deux courbes sont approximées par des B-splines.

3.1.2 Regression des courbes β par B-splines

Les deux courbes $\beta_1 = (\beta_{10}, \beta_{11}, \dots, \beta_{1l_2}, \dots, \beta_{1L_1})^\top$ et $\beta_2 = (\beta_{20}, \beta_{21}, \dots, \beta_{2l_2}, \dots, \beta_{2L_2})^\top$ modélisent la relation entre température et mortalité pour le froid (1) et le chaud (2). Ce lien est ensuite appliqué proportionnellement à l'écart à la température seuil ψ_1 ou ψ_2 entre le jour t , jour de l'exposition et $t + L_j$, L_j jours après l'exposition à la température z_t . Les paramètres β_j sont une combinaison linéaire de B-splines telle que :

$$\beta_1 = Cb_1 \quad \text{et} \quad \beta_2 = Hb_2,$$

avec $C = [C_1, \dots, C_{P_1}]$ et $H = [H_1, \dots, H_{P_2}]$ deux bases de B-splines cubiques (pour le froid et pour le chaud). Ces bases sont de taille P_1 et P_2 , il s'agit du nombre d'intervalles pour diviser la plage $[0, 1, \dots, L_1]$ et $[0, 1, \dots, L_2]$ (par défaut² P_1 et P_2 sont pris égaux à $L_1/3$ et $L_2/3$, où L_1 est le lag froid et L_2 le lag chaud) et (b_1, b_2) leurs deux vecteurs de coefficients respectifs. Dans une régression classique de m points (x_i, y_i) , par une base de n B-splines B_j , $j = 1, \dots, n$, cela revient à minimiser la somme S :

$$S = \sum_{i=1}^m \left\{ y_i - \sum_{j=1}^n b_j B_j(x_i) \right\}^2,$$

avec ici y_i le nombre de décès et x_i l'écart entre la température et le seuil ψ . Estimer une courbe par B-splines s'avère sensible au degré des splines et au nombre de noeuds (intervalles d'estimation), un des problèmes majeur rencontré sur ce type de régression est l'obtention d'une estimation qui présente beaucoup de petites fluctuations. Ce problème peut être limité en appliquant une pénalité sur les différents coefficients adjacents b_j aux B-splines (EILERS et MARX, 1996),

$$S' = \sum_{i=1}^m \left\{ y_i - \sum_{j=1}^n b_j B_j(x_i) \right\}^2 + \lambda \sum_{j=k+1}^n (\Delta^k b_j)^2.$$

où Δ^k est l'opérateur différence, soit $\Delta^k b_j = b_j - b_{j-k}$. En écriture matricielle et sur le modèle CSDL faisant intervenir une approximation par B-splines pour chacune des deux courbes β_1 et β_2 cela revient à appliquer la pénalité :

$$J(\lambda) = \lambda_1 b_1^\top D_1^\top b_1 + \lambda_2 b_2^\top D_2^\top b_2,$$

avec D_1 et D_2 les matrices de différence. Le modèle CSDL étant un GAM Poisson il faut utiliser la log-vraisemblance pénalisée, s'écrivant comme $l(\delta, b_1, b_2) - J(\lambda)$ avec $l(\cdot)$ la log-vraisemblance de Poisson et δ le paramètre issu du premier terme du modèle $(\mathbf{x}_t^\top \boldsymbol{\delta})$. Une seconde pénalité est appliquée aux coefficients pour favoriser l'approche à zéro des courbes β (impact du chaud et du froid), le

¹Le Minimum Mortality Temperature ou optimum thermique est la température relative au plus faible taux de décès sur une année.

²La fonction *tempeff()* sous **R** permet dans ses paramètres d'adapter au besoin le nombre de noeuds pour l'obtention de base de B-splines.

but étant de réduire les effets tardifs. Pour ce faire une pénalisation ridge linéaire est appliquée avec $\Upsilon_1 = (l_1, \dots, l_{L_1}) = \text{diag}(0, 1, 2, \dots, L_1)$ et $\Upsilon_2 = (l_1, \dots, l_{L_2}) = \text{diag}(0, 1, 2, \dots, L_2)$ de telle sorte que la mesure variable soit $\sum_{i=1}^{L_1} \beta_1^2 l_1$ et $\sum_{i=1}^{L_2} \beta_2^2 l_2$ respectivement pour le froid et pour le chaud. Cette pénalisation peut, en fonction des besoins et des données, être choisie quadratique (cubique ou autre), la mesure est alors $\sum_{i=1}^{L_1} \beta_1^2 l_1^4$ et $\sum_{i=1}^{L_2} \beta_2^2 l_2^4$. La pénalité complète devient :

$$J(\lambda) = \lambda_1 b_1^\top D_1^\top b_1 + \lambda_2 b_2^\top D_2^\top b_2 + \omega_1 b_1^\top C^\top \Upsilon_1 C b_1 + \omega_2 b_2^\top H^\top \Upsilon_2 H b_2.$$

Les facteurs de lissages $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \omega_1, \omega_2)^\top$ sont déterminants dans l'estimation des paramètres du modèle, et tout particulièrement pour les β_1 et β_2 . La procédure d'estimation de ces 4 facteurs est itérative et appliquée sur les différents coefficients des splines, pour pallier aux problèmes liés à la segmentation du modèle, le package *segmented* (MUGGEO, VMR, 2021) est utilisé en maximisant la log-vraisemblance pénalisée $l(\delta, b_1, b_2) - J(\lambda)$.

3.1.3 Disponibilité du modèle sous R dans le package *modTempEff*

Le package *modTempEff* propose un ensemble de fonctions permettant d'estimer les paramètres du modèle CSDL à partir d'une régression log-linéaire de Poisson (MUGGEO, VMR, 2014). Le modèle est donc assimilable à un modèle additif généralisé (GAM). La calibration du modèle se fait à partir de la fonction *tempeff()*, avec à minima en arguments : les variables explicatives du terme \mathbf{x}_t^\top , les valeurs initiales des seuils ψ et le nombre de jours de retard L à prendre en compte. D'autres paramètres peuvent être ajoutés comme le nombre maximal d'itérations à réaliser avant d'obtenir une convergence dans le calcul des seuils ψ ou encore l'application d'une pénalité sur les coefficients β les plus éloignés du jour d'observation initiale (cela permet de lisser les effets à long terme et les rapprocher de zéro). Cette pénalité est appliquée lors de l'estimation des courbes β_1 et β_2 par bases B-splines, le détail de l'application de cette pénalité se trouve ci-dessus. La fonction *tempeff()* crée un objet de type *modTempEff* contenant tous les paramètres d'un objet de type *gam* (du package *mgcv* (WOOD, 2021)) et des paramètres supplémentaires spécifiques au modèle CSDL.

3.1.4 Estimation du paramètre δ

Le terme δ est un vecteur de coefficients calculé pour chacune des variables explicatives contenues dans le terme \mathbf{x}_t^\top , il est estimé avec la fonction interne *gam.fit()* du package *mgcv* (WOOD, 2021), cette estimation est réalisée en interne dans la fonction *tempeff()*. Dans ce mémoire les variables explicatives utilisées sont l'année, le mois et le jour de la semaine.

3.1.5 Estimation des paramètres ψ_1 et ψ_2

Les seuils ψ_1 et ψ_2 sont estimés par itération en minimisant la déviance du modèle. Au préalable il faut choisir une valeur initiale dans les paramètres de la fonction *tempeff()*. Pour accélérer la convergence, il est possible d'établir un nombre maximal d'itérations. Ces seuils peuvent être identiques pour le chaud et pour le froid, on a alors $\psi_1 = \psi_2$. Cela permet de prendre en compte les effets liés à chaque température. Si la température est inférieure au seuil ψ , elle sera traitée avec les β_1 , courbe du froid, et si elle est supérieure au seuil ψ , elle sera traitée avec les β_2 , courbe du chaud.

3.1.6 Modèle CSDL par âge et par sexe

Pour rendre compte des différentes sensibilités à la température liées à l'âge et au sexe, la modélisation est réalisée sur chaque groupe d'individus. On a donc $D_{s,x,t} \sim \text{Pois}(\lambda_{s,x,t})$ avec $\lambda_{s,x,t} = E_{s,x,t} \times \mu_{s,x,t}$ où $E_{s,x,t}$ est l'exposition au risque des individus d'âge x et de sexe s et $\mu_{s,x,t}$ la fonction de hasard des

individus d'âge x et de sexe s . Pour chaque jour t , on a alors :

$$\ln(\lambda_{s,x,t}) = \mathbf{x}_t^\top \boldsymbol{\delta}_{s,x} + \sum_{l_1=0}^{L_1} \beta_{1s,x,l_1} (z_{t-l_1} - \psi_1)_- + \sum_{l_2=0}^{L_2} \beta_{2s,x,l_2} (z_{t-l_2} - \psi_2)_+ \quad (3.2)$$

Pour la suite de l'étude, ce modèle et plus particulièrement la somme modélisant l'impact des températures au-dessus du seuil ψ_2 (chaleur), sera utilisée pour réaliser des projections à l'horizon 2070 par sexe et par tranche d'âge. Deux méthodes différentes sont proposées et théoriquement détaillées mais une seule sera mise en oeuvre. La première consiste à intégrer un facteur température dans un modèle prospectif Log-Poisson. La seconde applique des chocs résultant des trajectoires climatiques sur une table de mortalité prospective, c'est cette méthode qui est ici utilisée pour évaluer l'impact des canicules à l'horizon 2070.

3.2 Intégration d'un facteur de température sur un modèle de mortalité prospectif

Les taux de mortalité prospectifs tels que proposés par l'INSEE (INSEE, 2016) sont des extrapolations des tendances passées. Le réchauffement climatique et l'évolution des températures pourraient induire une dérive qu'il serait intéressant d'évaluer. En s'inspirant du modèle CSDL, en particulier de la partie mettant en relation température et nombre de décès, il est possible d'ajouter aux modèles de mortalité prospectives classiques un terme supplémentaire permettant la prise en compte d'indicateurs climatiques tels que les températures.

3.2.1 Modèle log-Poisson intégrant un facteur de température

Le modèle Log-Poisson (BROUHNS et al., 2002) est une adaptation du modèle de Lee-Carter, visant à pallier l'hypothèse peu réaliste d'homoscédasticité des taux de mortalité (constance de la variance des erreurs). L'idée de ce modèle est de considérer que pour chaque âge x , la fonction de hasard μ_x est constante sur $[x, x + 1[$. Sous cette hypothèse, le nombre de décès D_x est estimé en suivant une loi de Poisson de paramètre $\lambda_x = E_x \times \mu_x$ avec E_x l'exposition au risque. Ainsi, pour chaque année n l'expression du taux de décès instantané est identique à celle du modèle de Lee-Carter, $\mu_{x,n} = e^{\alpha_x + \beta_x \times k_n}$. Ce type de modèle permet la prise en compte de l'effet du temps sur les taux de mortalité, classiquement de la façon suivante :

$$D_{x,n} \approx P(E_{x,n} \times \mu_{x,n}) \text{ avec } \ln(\mu_{x,n}) = \alpha_x + \beta_x \times k_n. \quad (3.3)$$

En intégrant w_n , une variable explicative supplémentaire dépendante du temps et de l'âge telle qu'un facteur intégrant le lien décès-température comme celui du modèle CSDL et en l'annualisant, cela devient :

$$\ln(\mu_{x,n}) = \alpha_x + \beta_x \times k_n + w_n. \quad (3.4)$$

En sommant sur tous les âges, $D_n = \sum_x D_{x,n}$ et suit une loi de Poisson telle que :

$$D_n \approx P\left(\lambda_n = \sum_x E_{x,n} \times \mu_{x,n}\right). \quad (3.5)$$

Mais

$$\sum_x E_{x,n} \times \mu_{x,n} = \sum_x E_{x,n} \times e^{(\alpha_x + \beta_x \times k_n + w_n)} = \sum_x E_{x,n} \times e^{(\alpha_x + \beta_x \times k_t)} \times e^{w_n}. \quad (3.6)$$

En notant : $u_n = \ln(\sum_x E_{x,n} \times e^{(\alpha_x + \beta_x \times k_n)})$, et alors $\ln(\lambda_n) = u_n + w_n$.

Et en repartant de la spécification du modèle CSDL distinguée par âge x on a pour chaque jour t :

$$\ln(\lambda_{x,t}) = \mathbf{x}_{x,t}^\top \boldsymbol{\delta} + \sum_{l_1=0}^{L_1} \beta_{1x,l_1} (z_{t-l_1} - \psi_1)_- + \sum_{l_2=0}^{L_2} \beta_{2x,l_2} (z_{t-l_2} - \psi_2)_+ \quad (3.7)$$

On note $u_{x,t} = \mathbf{x}_{x,t}^\top \boldsymbol{\delta}$ et $w_{x,t} = \sum_{l_1=0}^{L_1} \beta_{1x,l_1} (z_{t-l_1} - \psi_1)_- + \sum_{l_2=0}^{L_2} \beta_{2x,l_2} (z_{t-l_2} - \psi_2)_+$.

Il faut ensuite annualiser l'expression. Le nombre de décès $D_{x,n}$ est alors approximé de la façon suivante :

$$D_{x,n} \approx \sum_t \ln(\lambda_{x,t}) = \sum_t u_{x,t} + w_{x,t}. \quad (3.8)$$

Cette expression est bien analogue à la précédente avec : $u_n = \sum_x u_{x,n}$ et $w_n = \sum_x w_{x,n}$.

La spécification CSDL est donc cohérente avec un modèle Log-Poisson classique, dans l'hypothèse où le terme $\mathbf{x}_n^\top \boldsymbol{\delta}$ rend compte des effets de structure par âge et de dérive tendancielle de mortalité.

L'ajout d'un nouveau terme explicatif au modèle log-Poisson nécessite une recalibration des termes composants $\ln(\lambda_{x,n})$ pour isoler les effets températures et les contenir uniquement dans w_n . En suivant cette démarche d'estimation des taux prospectifs par un modèle Log-Poisson intégrant un terme supplémentaire, les termes α_x, β_x , et k_n devront alors être re-calibrés.

3.2.2 Intégration d'un scénario de température à une table de mortalité prospective

Une autre démarche possible consiste en l'intégration d'un choc applicable directement aux taux de mortalité des tables prospectives, toujours en partant du modèle CSDL présenté ci-dessus. C'est cette démarche qui est mise en oeuvre dans ce mémoire. Le terme $\ln(\lambda_{x,n})$ est constitué de deux composantes : la première, $\mathbf{x}_n^\top \boldsymbol{\delta}$ pour rendre compte des effets de structure par âge et de dérive tendancielle de mortalité et la seconde w_n pour contenir les effets d'un scénario de température. Le scénario « central » correspond à une trajectoire climatique suivant le même rythme que son évolution passée. Il correspond par construction au modèle avec $w_n = 0$. En d'autres termes la dérive de mortalité de référence incluse dans $\mathbf{x}_n^\top \boldsymbol{\delta}$ correspond à $w_n = 0$.

Le modèle CSDL donne pour chaque âge x et année n :

$$\ln(E_{x,n} \mu_{x,n}) = \mathbf{x}_n^\top \boldsymbol{\delta} + w_{x,n} \Rightarrow \mu_{x,n} = \frac{e^{\mathbf{x}_n^\top \boldsymbol{\delta}}}{E_{x,n}} e^{w_{x,n}}. \quad (3.9)$$

Le terme $\frac{e^{\mathbf{x}_n^\top \boldsymbol{\delta}}}{E_{x,n}}$ est donc homogène à une force de mortalité. Et la seconde partie : $e^{w_{x,n}}$ peut être interprétée comme un choc issu d'une trajectoire climatique applicable à l'âge x pour l'année n .

Par ailleurs, le lien entre $\mu_{x,n}$ la force de mortalité et $q_{x,n}$ le taux de mortalité est le suivant : $\mu_{x,n} = -\ln(1 - q_{x,n})$ sous l'hypothèse peu restrictive d'une fonction de hasard constante selon l'âge et l'année.

Intégrer l'impact d'un scénario de température à une table prospective existante peut se résumer aux étapes suivantes :

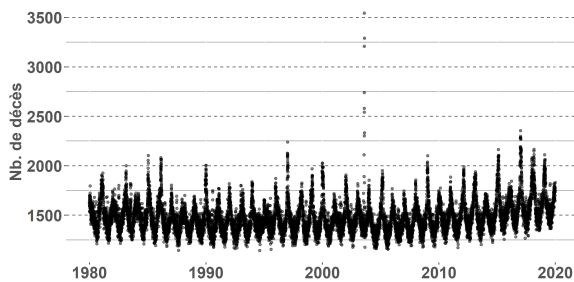
- À partir des $q_{x,n}$ de la table de référence (ici INSEE 2070), calcul des $\mu_{x,n}$,
- Calibration des courbes $\beta_{1x,n}$ et $\beta_{2x,n}$ avec le modèle CSDL sur les plages d'âges x pertinentes,
- Calcul des $w_{x,n}$ à partir d'une trajectoire de température,
- Calcul des $\mu_{x,n}^{sc} = \mu_{x,n} \times e^{w_{x,n}}$ la force de mortalité intégrant les effets climatiques,
- Création de tables « choquées » avec $q_{x,n}^{sc} = 1 - e^{-\mu_{x,n}^{sc}}$.

En fonction du scénario climatique retenu et de la table « choquée » calculée, on en déduit les espérances de vie associées et le nombre de décès liés aux températures.

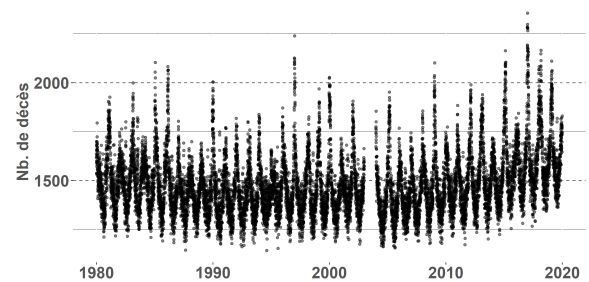
3.3 Mise en place et comparaison des variables explicatives

3.3.1 Données utilisées

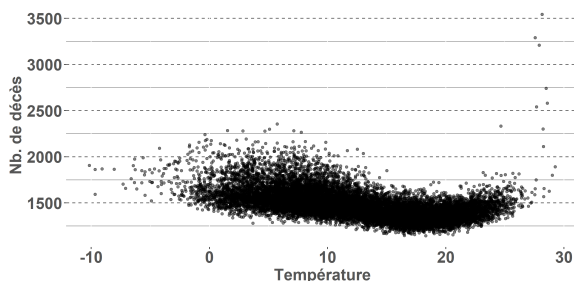
À ce niveau, une première calibration est réalisée ainsi qu'une évaluation du modèle sans faire de distinction par âge ou par sexe. Avec la fonction *tempeff()* du package *ModTempEff* on construit un modèle CSDL à partir des données disponibles. Sont utilisés les relevés de températures moyennes journalières issues de la base GHCN ainsi que les décès journaliers provenant de l'INSEE. La plage temporelle couvre la période de 1980 à 2019 en prenant soin de retirer l'année 2003, année marquée par une canicule atypique qui empêche une bonne calibration du modèle. L'hypothèse de retirer l'année 2003 de l'étude n'est pas aberrante dans le sens où aujourd'hui, si l'on se plaçait dans des conditions climatiques similaires à 2003, les décès ne seraient pas aussi importants qu'ils ont pu l'être, notamment grâce à l'éducation et la prévention effectuées auprès des populations (incidence du Plan National Canicule).



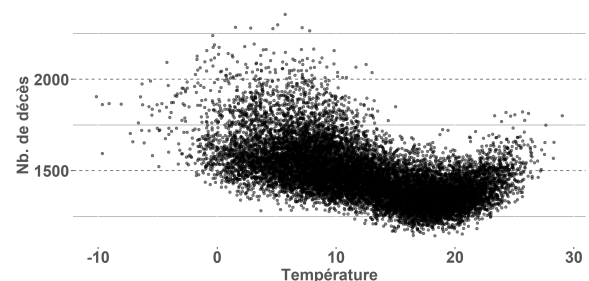
(a) Décès journaliers entre 2000 et 2019



(b) Décès journaliers entre 2000 et 2019 sans 2003



(c) Décès en fonction de la température



(d) Décès en fonction de la température (sans 2003)

FIGURE 3.2 : Nombre de décès journaliers et nombre de décès en fonction de la température moyenne. Données INSEE.

Le pic atteint en 2003 est exceptionnel et n'a aucun équivalent sur la période 1980-2019. Un maximum de 3 543 décès a été recensé le 12 août 2003. C'est pourquoi une telle année va fortement influencer dans la calibration du modèle. Pour la suite de l'étude cette année sera retirée de la projection dite centrale, et conservée pour une projection qui pourra être considérée comme une borne supérieure. Finalement, l'échantillon de données contient 14 215 observations. Par la suite le nombre d'observations sera encore réduit pour ne conserver que la période 2000-2019 (sans 2003), les raisons de ce choix sont expliquées dans la suite du chapitre.

3.4 Critère de qualité

Pour évaluer la qualité d'un modèle et identifier les bons paramètres il est usuel d'utiliser des critères de qualité. Conventionnellement, on explique une variable cible par différentes variables explicatives, plus elles sont nombreuses, plus le modèle sera proche de la cible mais plus le modèle sera complexe. Pour arbitrer entre les deux, différents critères permettent de mesurer la qualité, le biais et le nombre de paramètres.

Le critère d'information d'Akaike (AIC) est un compromis entre qualité et parcimonie, autrement dit, il arbitre entre l'erreur et le nombre de paramètres. Il présente l'avantage de pénaliser les modèles sur-paramétrés. Il est défini par : $AIC = 2K - 2 \ln(L)$ avec k le nombre de paramètres (k correspond au nombre de degrés de liberté pour les Modèle additif généralisé) et L la vraisemblance maximisée.

L'UBRE, ou Un-biased Risk Estimator, aussi appelé scale AIC est un paramètre analogue au MSE (Mean Square Error). Le MSE est utilisé lors d'une régression linéaire classique. Dans le cas des modèles additifs généralisés, le critère équivalent est l'UBRE/ $_g$ AIC (Un-Biased Risk Estimator ou generalized AIC¹) (WOOD, 2021). On a alors :

$$MSE = \frac{1}{n - k - 1} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad {}_gAIC = \frac{1}{n} \{Dev + 2edf - n\},$$

avec n le nombre d'observations, k le nombre de variables indépendantes, y_i et \hat{y}_i la i ème valeur de sa prédiction, Dev la déviance, donnée par : $Dev = 2 \sum y_i \log(y_i/\hat{\mu}_i)$, et edf les degrés de liberté effectifs.

3.5 Étude de la sensibilité du modèle

Cette partie évalue la qualité d'ajustement et de prédiction du modèle CSDL en faisant varier les paramètres (seuil ψ et retard L) et les données de décès observées (période d'observation, séparation en groupe par sexe et par âge). Pour ce faire on calibre un modèle de référence avant de faire varier le paramètre voulu. Le modèle de référence est calibré de la façon suivante. Les variables explicatives qui ont été choisies pour composer le terme $\mathbf{x}_t^\top \boldsymbol{\delta}$ sont l'année, le mois, le jour de la semaine. Ces trois variables permettront de rendre compte d'une saisonnalité et des variations de populations annuelles. Dans la spécification du modèle CSDL (MUGGEO, VMR, 2010), la valeur retenue pour le retard L est de 60 jours. En observant les courbes β obtenues, on remarque que les impacts au-delà de 30 jours semblent très largement réduits. Les effets des températures sont donc évalués sur 30 jours (variable L). Le seuil ψ est unique ($\psi_1 = \psi_2$), c'est-à-dire qu'on regarde l'effet de toutes les températures et pas uniquement celles au-dessus du seuil de chaleur et en dessous du seuil de froid. La valeur initiale est de 18°C (valeur moyenne de l'optimum thermique issue de la littérature² et des observations faites

¹parfois noté scaled AIC

²Différentes valeurs du MMT sont avancées pour la France métropolitaine. Entre 17.2 et 20.2°C pour BESANCENOT (2000). De 17,5°C (1968-1981), à 17,8°C (1982-1998) et enfin 18,2°C (1999-2007) pour TODD et VALLERON (2015).

sur les données). Le seuil est estimé par itération en minimisant la déviance du modèle. La période d'observation est du 1^{er} janvier 2000 au 31 décembre 2019 sans l'année 2003.

3.5.1 Sensibilité à la période d'observation

Calibration sur la période 1980-2019, sans 2003

Pour évaluer la qualité de prédiction du modèle, la calibration est réalisée sur la période 1980-2014. Les années comprises entre 2015 et 2019 sont ensuite prédites et comparées aux observations réelles. On calcule les résidus tels que $\epsilon_t = D_t - \hat{D}_t$ avec D_t le nombre de décès à la date t comprise entre le 1^{er} janvier 2015 et le 31 décembre 2019. Les deux séries (observations réelles et prédictions) sont tracées en Figure 3.3.

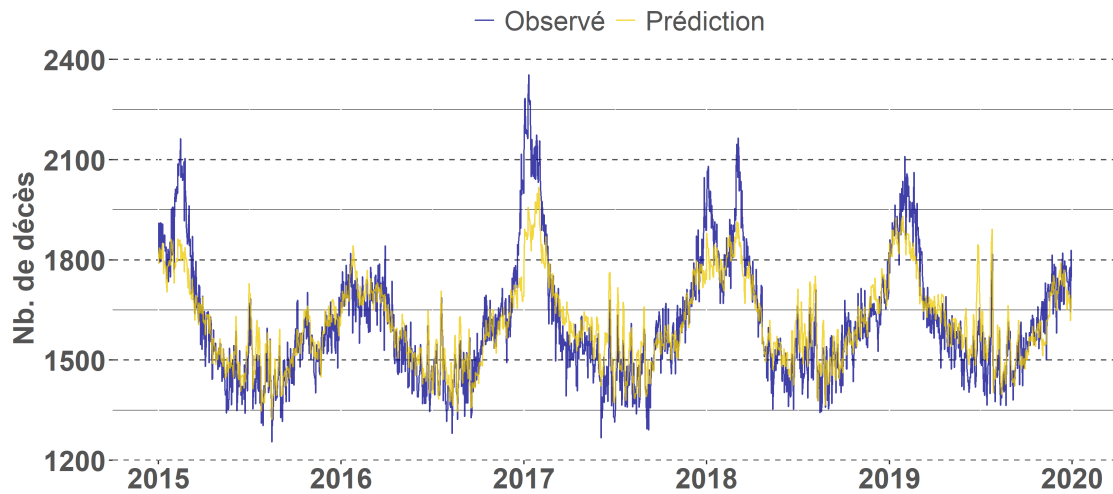


FIGURE 3.3 : Nombre de décès observés et prédits entre 2015 et 2019, calibration sur la période 1980-2014 (sans 2003).

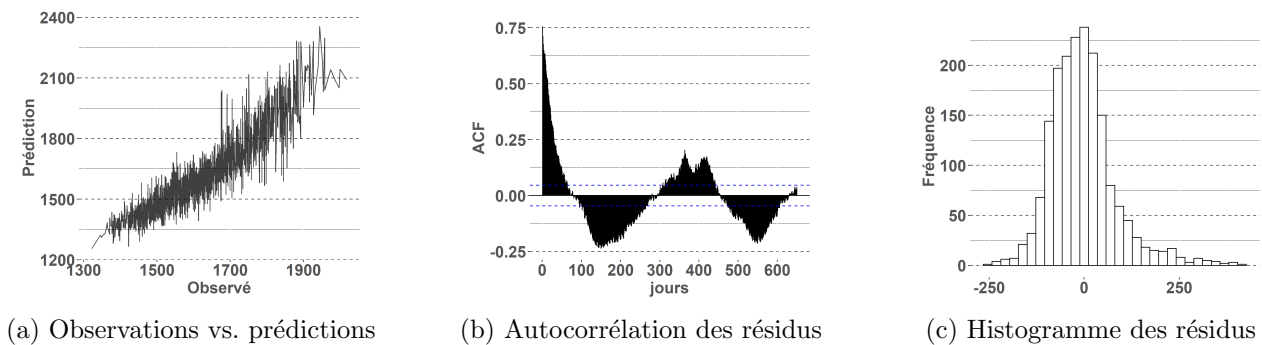


FIGURE 3.4 : Caractéristiques des résidus, calibration sur la période 1980-2014 (sans 2003).

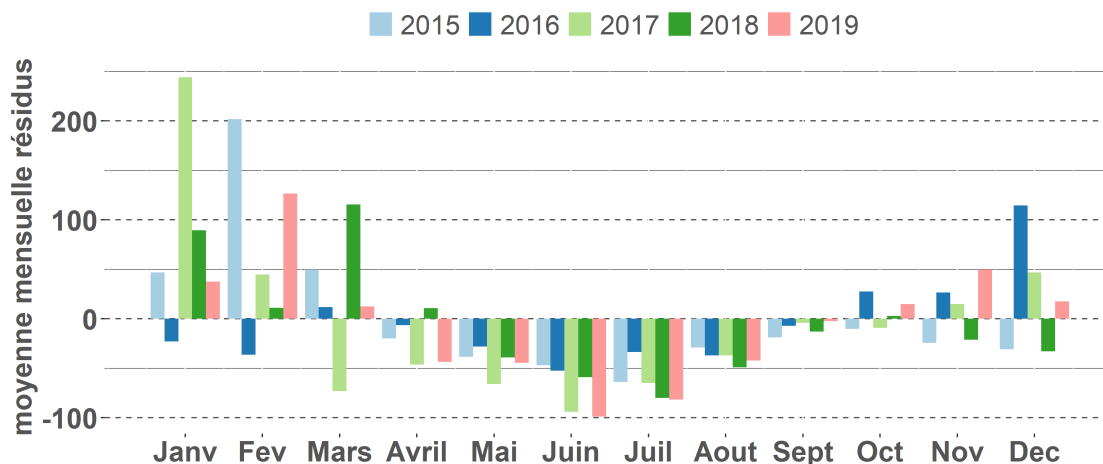


FIGURE 3.5 : Moyenne mensuelle des résidus, calibration sur la période 1980-2014 (sans 2003).

Des écarts assez significatifs entre le réel et la prédiction apparaissent en hiver. Cela s'explique en partie par les épidémies de grippe, celle de 2016-2017 a entraîné le décès de 14 400 personnes, l'écart entre la prédiction et la réalité est donc conséquente avec plus de 400 décès en écart par jour. En moyenne sur le mois de janvier 2017, le modèle sous-estimait les décès, et les observations réelles étaient supérieures de 12.87% (environ 250 décès supplémentaires par jour). En revanche en été, le modèle se place légèrement au-dessus des observations réelles (-3.06% de décès modélisés sur l'été 2015 par rapport aux observations réelles, -4.1% en été 2017 et -4.57% en 2019). Cela pourrait s'expliquer par un apprentissage sur les années où la sensibilité à la chaleur était plus importante (1980-2003) puisque les populations étaient moins averties et protégées. À titre d'exemple, l'année 2019 a subi une canicule intense (première alerte rouge du PNC) qui entraîna le décès d'environ 1 500 personnes. En se basant sur les observations passées, le nombre de décès attendus face à de telles températures aurait dû être plus important. Le modèle surestime de nombre de décès de 50 à 100 personnes par jour pour l'été de 2019, soit une hausse de 5.5% en moyenne sur juin et juillet 2019.

Calibration sur la période 2000-2019, sans 2003

Pour confirmer l'hypothèse selon laquelle une période de calibration trop ancienne surestime les prédictions de décès en été, le modèle est recalibré sur la période 2000-2019, les résidus sont étudiés de façon similaire.

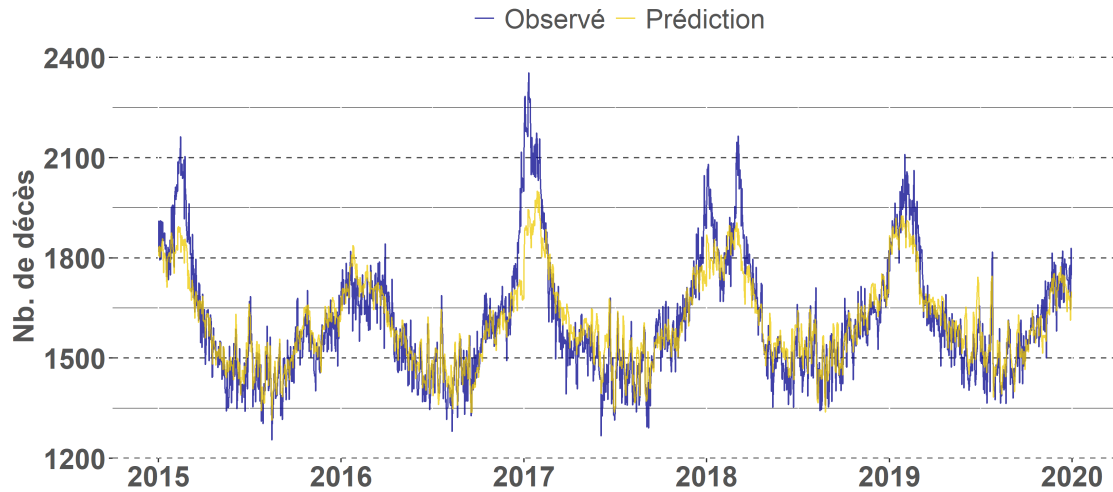


FIGURE 3.6 : Nombre de décès observés et prédits, calibration sur la période 2000-2014 (sans 2003).

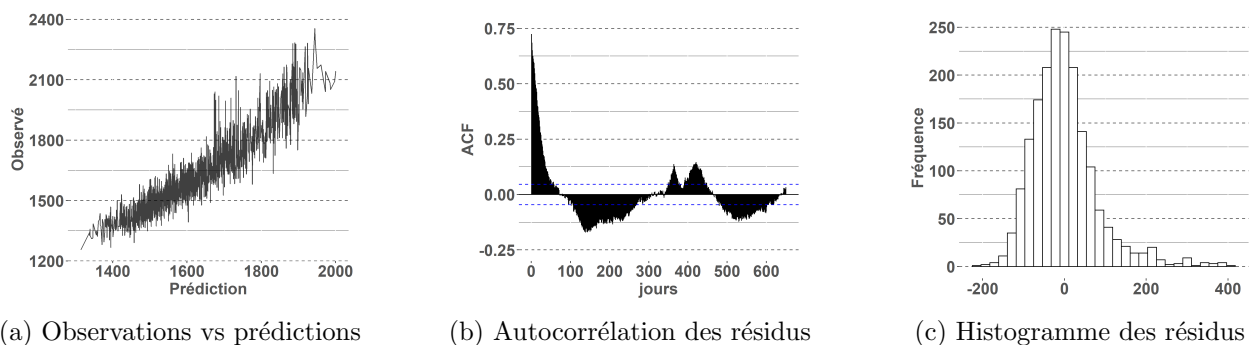


FIGURE 3.7 : Caractéristiques des résidus, calibration sur la période 2000-2014 (sans 2003).

En modifiant la période de calibration de 1980-2014 à 2000-2014 (toujours sans 2003), la sensibilité en hiver est globalement inchangée, les épidémies de grippe expliquent encore les écarts importants observés. Cependant, en été, les résidus sont diminués et la prédiction est plus proche de la réalité, néanmoins toujours en légère surestimation. En gardant 2019 comme année d'exemple, cette nouvelle calibration s'ajuste mieux à la réalité. Dans la précédente calibration, la surestimation des décès était de 5.5% en moyenne sur juin et juillet (environ +100 décès/jour en juin et de +80 décès/jour en juillet par rapport à la réalité), sur cette nouvelle calibration, la surestimation est abaissée à 3.23% (soit environ +60 décès/jour en juin et +40 décès/jour en juillet). Les prédictions sont proches de la réalité dans la mesure où le nombre de décès journalier n'atteint pas de pic atypique (Figure 3.7a). L'autocorrélation présente une saisonnalité annuelle qui s'explique par une surestimation du modèle en été et une sous-estimation en hiver (Figure 3.7b). L'histogramme des résidus montre une inégale distribution des résidus avec une plus large erreur à droite plutôt qu'à gauche, autrement dit plus de surestimation en nombre, mais pas en fréquence (hiver) et moins de sous-estimation importante, mais plus fréquente en nombre (été).

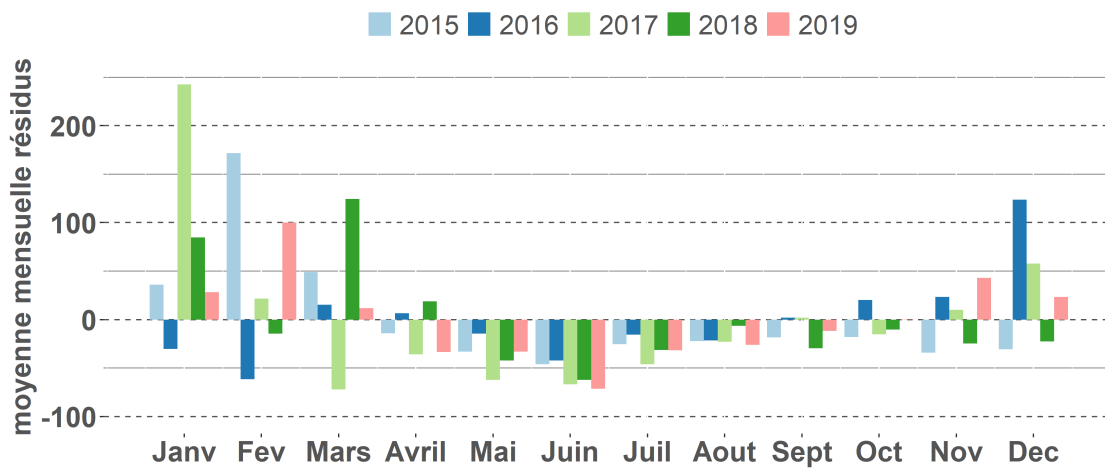


FIGURE 3.8 : Moyenne mensuelle des résidus, calibration sur la période 2000-2014 (sans 2003).

Calibration sur la période 2000-2019, avec 2003

Une dernière calibration est réalisée en joignant l'année 2003 à la période 2000-2019. L'ensemble des graphes de cette calibration se trouvent en annexe (Figure A.1). En Figure 3.9 on peut voir que globalement, on reste très proche des observations faites sur la calibration 2000-2019 sans 2003, la différence se place alors dans les extrêmes liés aux canicules. Les épisodes de 2018 et 2019 sont assez remarquables mais largement surestimés puisqu'ils sont basés en partie sur l'historique de 2003 (Figure 3.10). Les deux pics de 2019 sont visibles (fin juin-début juillet), correspondant aux deux vagues de chaleur. Le nombre de décès modélisé atteint presque 2 400 par jour et provoque une surestimation du nombre de décès de 3.52% sur le mois de juin (environ +62 décès/jour) et de 6.44% sur le mois de juillet (environ +115 décès/jour).

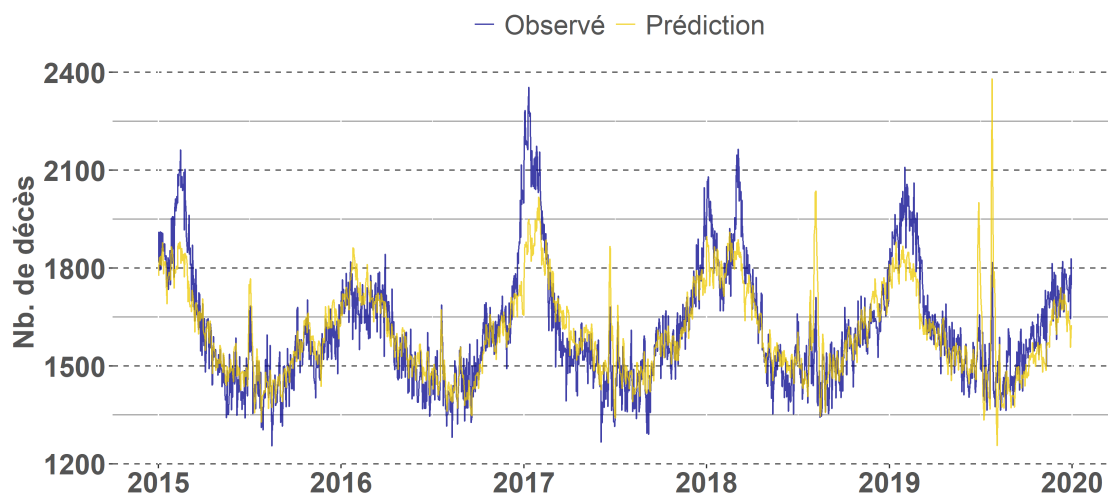


FIGURE 3.9 : Nombre de décès observés et prédits, calibration sur la période 2000-2014 (avec 2003).

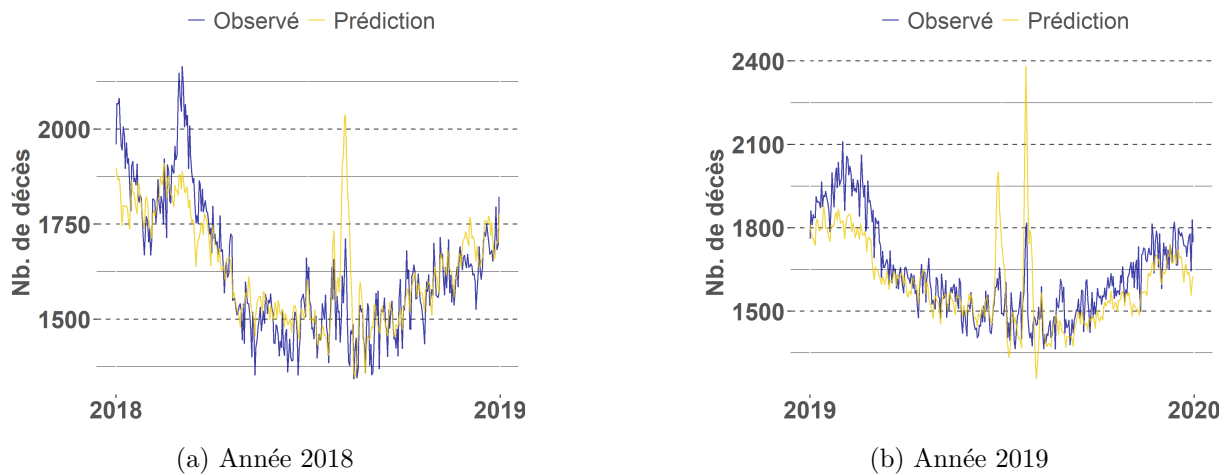


FIGURE 3.10 : Nombre de décès observés et prédits en 2018 et 2019, calibration sur la période 2000-2014 (avec 2003).

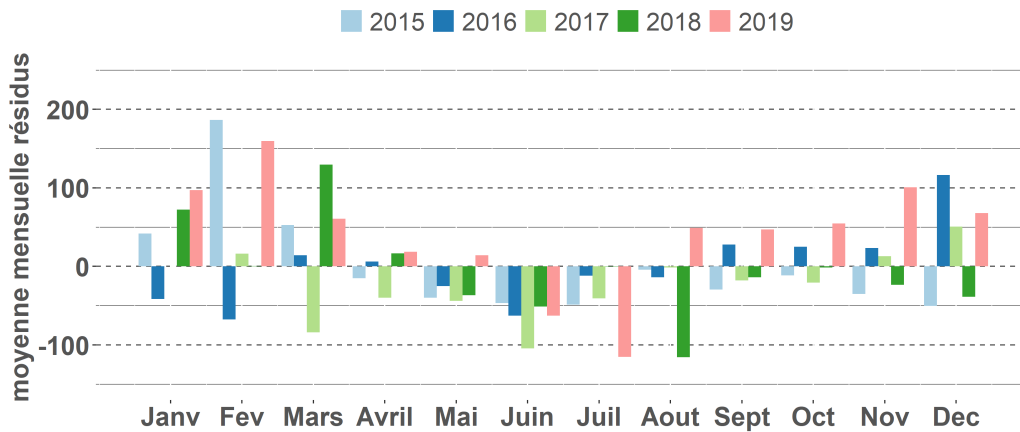


FIGURE 3.11 : Moyenne mensuelle des résidus, calibration sur la période 2000-2014 (avec 2003).

Bilan des observations sur les trois calibrations dépendant de la période

Le modèle CSDL se montre assez sensible à la période d'observation. Trois différentes époques ont été utilisées ici pour le calibrer. En variant ce paramètre, le nombre n d'observations est différent sur ces trois modèles, une comparaison avec les critères de qualité tels que l'AIC ou la déviance n'est pas possible. On s'intéresse ici à la qualité de prédiction sur les années 2015-2019 et la distribution des résidus associés. L'utilisation d'une période trop ancienne, ici 1980-2000, affaiblit la qualité de prédiction puisque les observations relatives à cette époque ne correspondent plus aux interactions actuelles entre température et mortalité, en particulier face à la chaleur. Il convient donc de réduire la période d'observation à 2000-2019. Un autre paramètre influant largement sur la qualité de prédiction du modèle est la prise en compte ou non de l'année 2003. Avec cette année présentant une canicule historique de plus de 15 000 décès, les prédictions estivales sont surestimées et les épisodes de canicules engendrent des décès largement supérieurs à ceux observés. En conclusion, cette année sera exclue de la calibration du modèle. La prise en compte de l'année 2003 fera l'objet d'une trajectoire supplémentaire qu'on interprétera comme une borne supérieure. Une autre piste d'amélioration serait la prise en compte des épisodes de grippe saisonnière, cela permettrait au modèle de mieux s'ajuster à la réalité.

3.5.2 Sensibilité aux paramètres du modèle CSDL

Plusieurs paramètres sont nécessaires pour calibrer le modèle CSDL. Le temps de retard L pour observer les effets à court-terme des températures Le seuil ψ qui délimite, à partir de la température, quelle courbe β utiliser. Il peut être unique ou double, avec un ψ pour le chaud et un pour le froid. En utilisant les critères de qualité tels que présentés en partie 1.3, on fait varier ces paramètres pour voir comment le modèle s'ajuste aux données. Le modèle de référence est calibré sur la période 2000-2019 sans 2003, avec un retard de 30 jours et un seuil ψ unique qui converge pour une valeur de 16.81°C. Plusieurs valeurs de retard sont testées (10, 30, 60 et 100 jours) et les périodes sont ajustées pour avoir le même nombre n de valeurs modélisées. Cela est nécessaire puisqu'en augmentant le retard L , la première valeur modélisée sera en $L + 1$, autrement dit sur le modèle de référence, il faut 30 jours d'observations pour évaluer l'impact des températures au 31^{ème} jour. Pour chaque modèle on a $n = 6840$ prédictions sur les mêmes dates (du 2 février 2000 au 31 décembre 2019). Ainsi on peut comparer l'AIC, la déviance et la g AIC.

	AIC	Déviance	g AIC	ψ
model_ref	81 880	18 571	1.70	16.81
model_lag60	81 344	18 277	1.68	16.94
model_lag100	80 826	18 104	1.67	17.22
model_lag10	84 452	20 978	2.04	17.91
model_psifixe18	81 901	18 594	1.71	18.00
model_psifixe16	94 737	28 084	2.88	16.00
model_psifixe20	92 486	25 833	2.57	20.00
model_psidouble	92 171	25 517	2.52	15.2/24.6
model_avec2003_sans2000	86 172	22 851	2.32	24.32

TABLE 3.1 : Critères de qualité du modèles CSDL en faisant varier les paramètres.

Plus le lag est important plus la déviance et l'AIC réduisent, c'est-à-dire que le modèle se rapproche mieux des observations réelles. La différence entre le lag 10 et le lag 30 est très importante et confirme qu'une prise en compte d'effet retard est primordiale dans une étude d'impact de la température sur la mortalité. Passer de 30 à 60 et même 100 jours n'améliore que légèrement l'adéquation aux données, complexifie le modèle, et augmente le temps de calcul. Choisir un ψ arbitrairement et le faire varier n'impacte pas énormément les critères de qualité. Le seuil à 16°C est celui qui approche les données au mieux, et celui à 20°C qui présente l'erreur la plus importante. Le choix de prendre deux ψ différents, un pour le chaud et un pour le froid semble également améliorer la qualité du modèle, mais de façon très légère. Une dernière sensibilité est étudiée par rapport à l'année 2003, en enlevant l'année 2000 et ajoutant 2003, le seuil calculé est beaucoup plus élevé et la déviance et l'AIC ont également beaucoup augmenté signalant une erreur importante. On peut ici réellement mesurer l'impact de la canicule de 2003.

3.5.3 Interprétation des sorties du modèle

Dans cette partie un modèle global est calibré sur la période 2000-2019 (sans 2003), sans distinction d'âge ou de sexe pour visualiser les sorties et les interpréter. Le seuil est fixé à 18°C.

Les courbes bêta

L'analyse des courbes bêta permet de comprendre les effets relatifs à la chaleur et au froid en fonction du retard. Les vecteurs, $\beta = (\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_l, \dots, \beta_L)^\top$ correspondent à l'effet retard du log risque relatif de décès (Figure 3.12).

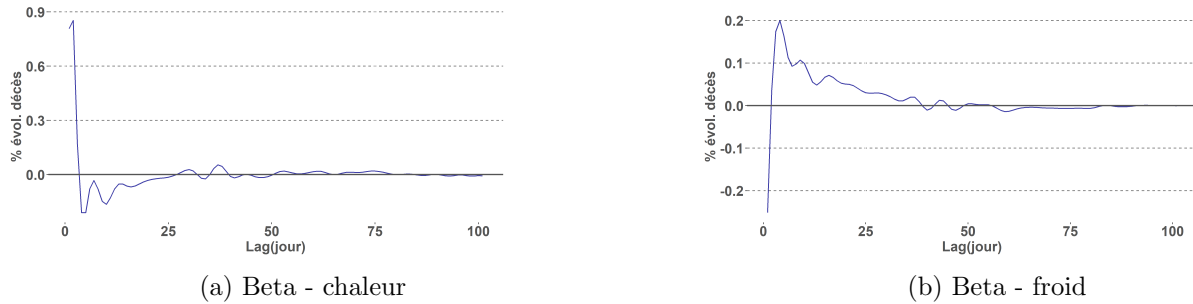


FIGURE 3.12 : % d'évolution sur le nombre de décès expliqué par la chaleur ou par le froid

Les effets liés à la chaleur sont visibles rapidement et sont plus conséquents sur une vision instantanée que ceux liés au froid. Entre $j = 0$ et $j = 4/5$ une forte évolution liée à la chaleur est captée par le modèle, elle est décroissante et rapidement négative, il s'agit alors d'un rattrapage. Autrement dit, il s'agit d'un effet moisson, une surmortalité soudaine et excessive suivie d'une sous-mortalité sur les jours suivants. Cette modélisation permet au global de ne pas surévaluer les décès liés à des changements sur les températures tempérées (supérieur au seuil défini dans le modèle, ici 18°C). Au global pour quantifier l'impact réel des températures sur l'ensemble de la période d'observation (de t à $t + L$) le net effet lié à la chaleur qui correspond à la somme des effets sur chaque jour t est de 0.49%. L'effet lié au froid est lui largement différent, visible uniquement à partir de $j = 2/3$, la surmortalité est plus faible mais durable et longuement décroissante avec un net effet lié au froid de 1.77%. Il faut tout de même nuancer le fait que le modèle tente d'expliquer chaque variation par les températures, d'autres variables non prises en compte ici pourraient biaiser légèrement les résultats, notamment des variables climatiques (le vent influant sur la température ressentie, l'humidité), les variables socio-comportementales (période de vacances) ou encore la présence de polluants atmosphériques (l'ozone augmente la mortalité en période de canicule).

Les décès liés aux températures

L'extraction des différentes composantes du modèle ($x^T \delta$ pour tout ce qui est hors température et w_t pour l'effet température), permet d'évaluer le nombre de décès totaux tel qu'évalué par le modèle, le nombre de décès liés aux températures et le nombre de décès sans composante température, c'est à dire à température constante au seuil, en revanche la variable mois présente dans le paramètre $x^T \delta$ permet à minima de modéliser une partie de la saisonnalité. Le nombre de décès est ici approximé par λ_t , paramètre de la loi de Poisson utilisé pour la répartition du nombre de décès. Les années 2015 et 2017 sont visualisées à titre d'exemple (Figures 3.13 et 3.14).

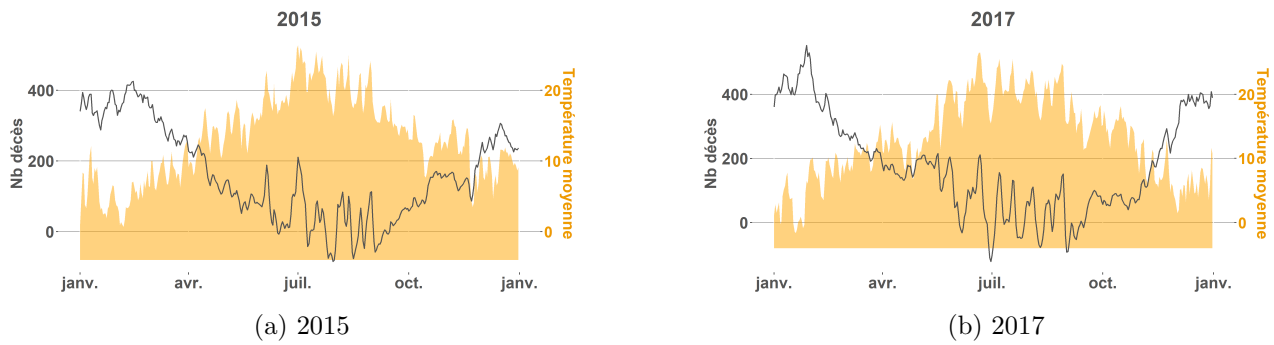


FIGURE 3.13 : Nombre de décès journaliers attribués aux températures sur l'année.

	Décès annuels réels	Modèle : Décès annuels	Part température	Part autre
2015	579 466	578 782	59 139	519 643 (0.89% × annuel)
2017	591 372	603 028	64 805	538 223 (0.89% × annuel)

TABLE 3.2 : Nombre de décès réels, et nombre de décès calculés et décomposés par le modèle CSDL, sur les années 2015 et 2017.

La courbe des décès liés aux températures suit logiquement la trajectoire de saisonnalité des décès détaillés en chapitre 1. Les maxima sont atteints en hiver avec plus de 400 décès journaliers considérés comme liés aux températures en période hivernale. Les décès totaux du modèle approchent ceux observés en réalité (Table 3.2). La partie « autre » correspond approximativement à 0.89% du nombre de décès annuel, ce chiffre est proche du facteur 0.88% utilisé par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS, 2014) pour évaluer le nombre de décès à l'optimum thermique. Une plus forte sensibilité est observée en période estivale, chaque variation de température se répercute immédiatement sur le nombre de décès liés. Pour mieux visualiser ce lien, un aperçu des mois de juin, juillet et août est présenté ci-dessous en Figure 3.14.

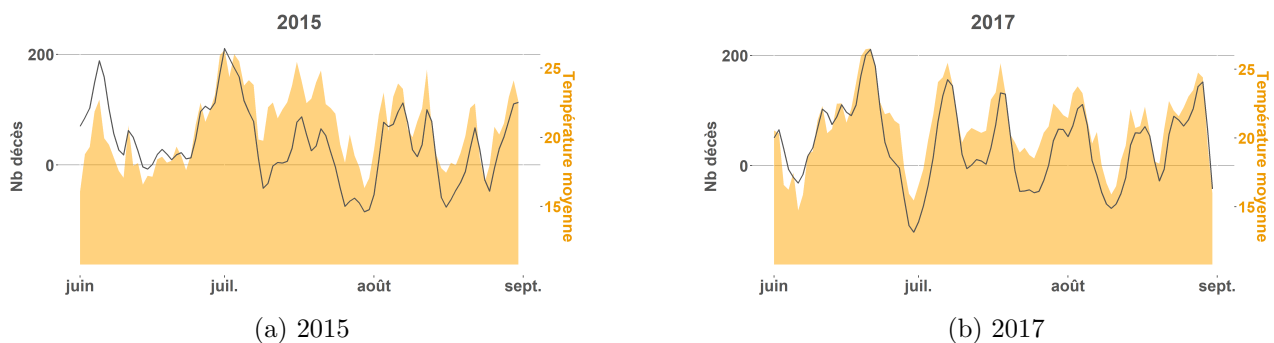


FIGURE 3.14 : Nombre de décès journaliers attribués aux températures sur l'été.

En 2015, la France métropolitaine enregistrait en été une moyenne de 1 446 décès par jour, le modèle estime cette perte à 1 472 dont 40 décès par jours attribués aux températures. Au total sur l'été, on compte 3 670 décès attribuables aux températures. En regardant plus spécifiquement la période de canicule (du 29 juin au 8 juillet soit 10 jours) 1 318 décès sont évalués par le modèle, à titre de comparaison sur cette canicule Santé Publique France a évalué les pertes à 1 367. Sur 2017, le nombre moyen de décès journaliers est légèrement surestimé par le modèle (1 521 contre 1 451 en réalité). Sur les 8 jours de la canicule de mi-juin 2017, environ 1 102 décès sont attribuables aux températures. Santé Publique France a fait état d'une surmortalité de 766 sur cette vague.

	Moyenne de décès journalier		Décès attribués aux températures	
	Réel	Modèle	Somme sur l'été	Moyenne journalière
2015	1 446 décès/j	1 472 décès/j	3 670	40 décès/j
2017	1 451 décès/j	1 521 décès/j	3 477	37 décès/j

TABLE 3.3 : Moyenne des décès réels, et part attribuée aux températures par le modèle CSDL sur les étés 2015 et 2017.

	Durée (en j.)	Modèle - Part température		Santé Publique France
		Somme	Moyenne journalière	Décès en excès
2015	10	1 318	131 décès/j	137
2017	8	1 102	1370 décès/j	766

TABLE 3.4 : Part des décès attribués aux températures par le modèle CSDL sur les canicules 2015 et 2017.

3.6 Comparaison des variables explicatives

Les variables choisies pour la calibration du modèle influent largement sur les sorties et la fiabilité de prédiction. Grâce aux critères de qualité, il est possible de comparer différents modèles et de choisir les paramètres permettant une adéquation maximale avec les observations. Dans la suite de la partie, différentes populations sont indépendamment étudiées par sexe ou encore par groupe d'âge.

Suite à l'étude de sensibilité, le modèle est calibré selon les paramètres suivants : années d'observation entre 2000 et 2019 sans 2003, seuil ψ unique et le lag sera variable entre 60 et 100 jours pour évaluer les effets tardifs.

3.6.1 Calibration en faisant varier la tranche d'âge

La sélection de la tranche d'âges est déterminante pour évaluer le lien entre température et mortalité dans la calibration des courbes de réponse à la chaleur et au froid. Plusieurs paramètres interviennent alors : la sensibilité de certaines plages d'âge face aux variations climatiques et les fortes variations du

nombre de décès et donc d'observations disponibles pour calibrer chaque modèle relatif à une tranche d'âge. Pour éviter d'avoir des groupes trop peu nombreux la séparation est effectuée par tranche de 5 ans en regroupant les moins de 49 ans ensemble ainsi que les plus de 90 ans. Pour chaque groupe un modèle CSDL est calibré sur les périodes 2000-2019 (sans 2003) en laissant la possibilité au modèle d'effectuer des itérations pour converger vers un seuil ψ unique. Les seuils obtenus sont variables et ne semblent pas dégager une règle en fonction de l'âge. Pour observer la totalité des effets tardifs des températures les lag sont augmentés à 60 jours. Les différences obtenues dans les critères de qualité comme l'AIC et la déviance dépendent du nombre d'observations n_{tot} (n étant le nombre de décès moyens journaliers observés sur la tranche d'âge x), ils ne sont donc pas comparables entre tranches d'âges. Ainsi, les modèles calibrés sur les tranches élevées ont des déviances et des AIC plus élevés que les autres puisqu'ils ont plus d'observations. En revanche la mesure ${}_g\text{AIC}$ est une erreur normalisée, on peut l'utiliser pour comparer la qualité des modèles entre eux.

	AIC	Déviance	${}_g\text{AIC}$	ψ	edf	n
0-49	51 609	7 627	0.12	17.2	48.3	95.9
50-54	46 106	6 925	0.02	14.9	49.9	47.4
55-59	48 493	7 211	0.06	16.7	51.1	63.9
60-64	49 897	7 150	0.05	16.2	49.5	79.4
65-69	51 410	7 316	0.08	17.1	51.4	96.9
70-74	53 137	7 388	0.09	17.3	60.1	122.9
75-79	55 785	7 733	0.14	18.9	55.0	172.1
80-84	59 471	9 252	0.36	16.4	62.9	233.8
85-89	61 642	10 612	0.56	18.3	67.6	267.7
90 et +	65 081	12 819	0.88	15.0	70.7	320.9

TABLE 3.5 : Critère de qualité et paramètre en fonction de la tranche d'âge.

Les tranches élevées sont les plus sensibles face aux variations de températures qu'elles soient basses ou élevées. Chaque tranche d'âges a sa propre réponse définie comme pourcentage d'évolution sur le nombre de décès, pour le froid (Figure 3.15) et pour le chaud (Figure 3.16). Il s'agit des courbes β_1 et β_2 . Pour mieux correspondre avec la réalité, une pénalité quadratique est ajoutée dans le modèle afin de lisser les courbes à long-terme (voir partie 3.1.2). L'effet température est également visualisé en impact net total lié au froid et au chaud, il est visualisé en Figure 3.21. Il s'agit de la somme des impacts observés depuis le premier jour d'exposition à la température z_t au dernier jour de prise en compte du retard, soit la somme des $\beta_{1,t}$ et $\beta_{2,t}$ avec $t \in \{1, \dots, 60\}$. Face aux températures hivernales les plus de 90 ans sont les plus touchés et l'impact reste visible même après 30 jours (Figure 3.15). L'exposition est de moins en moins intense sur le premier pic (4 à 6 jours de retard) en parcourant les tranches d'âge de plus en plus jeunes. Les tranches « 0-49 » et « 50-55 » ne présentent que très peu d'effets cumulatifs sur les 60 jours, celles-ci subissent une modification dans leur mortalité environ 4 jours après l'exposition et les effets s'estompent rapidement et peuvent éventuellement être suivi d'un rattrapage. Cet effet est également visible pour les décès attribués à la chaleur (Figure 3.16). Les tranches hautes sont celles qui présentent le plus d'effets à long terme, et contrairement au froid il s'agit ici d'une sous-mortalité. Cette remarque s'observe également et de façon décroissante sur les plages d'âge inférieures et correspond à l'effet moisson. Alors que le lien de l'impact du froid croit en fonction de l'âge, l'impact du chaud est finalement plutôt équivalent en fonction des âges (du moins en % d'évolution, il reste plus important en nombre).

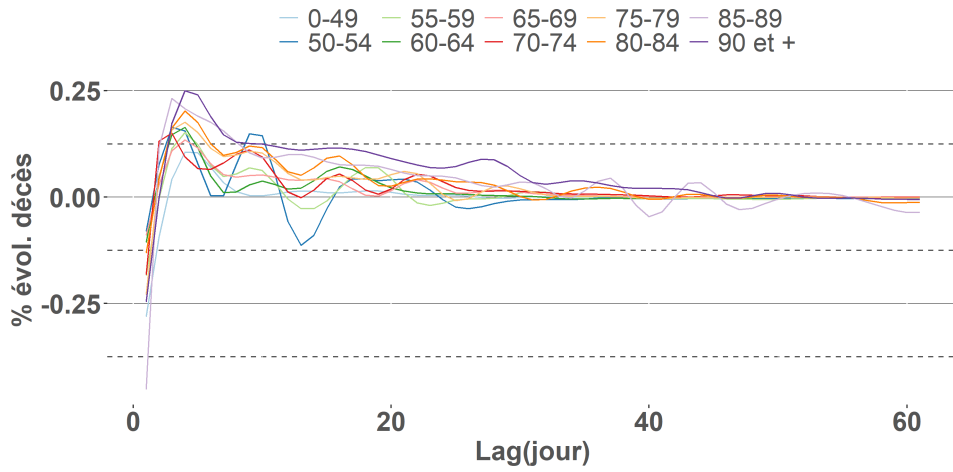


FIGURE 3.15 : % d'évolution sur le nombre de décès attribués au froid.

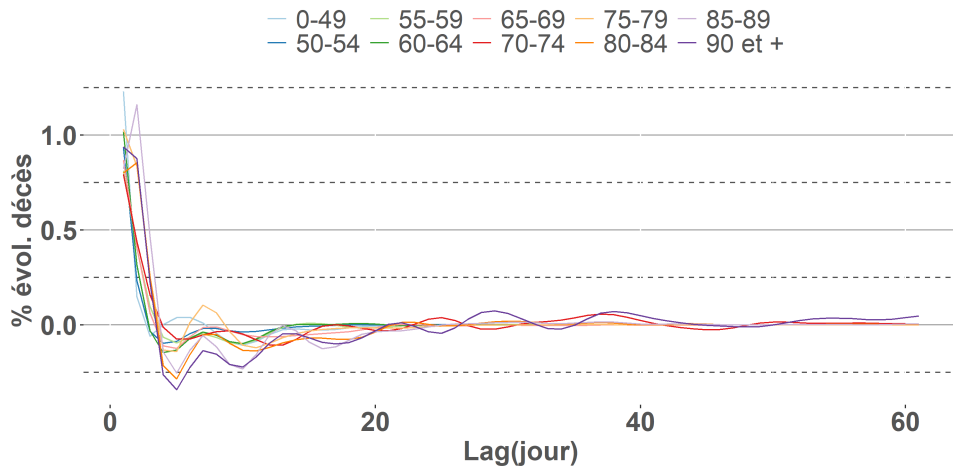


FIGURE 3.16 : % d'évolution sur le nombre de décès attribués à la chaleur.

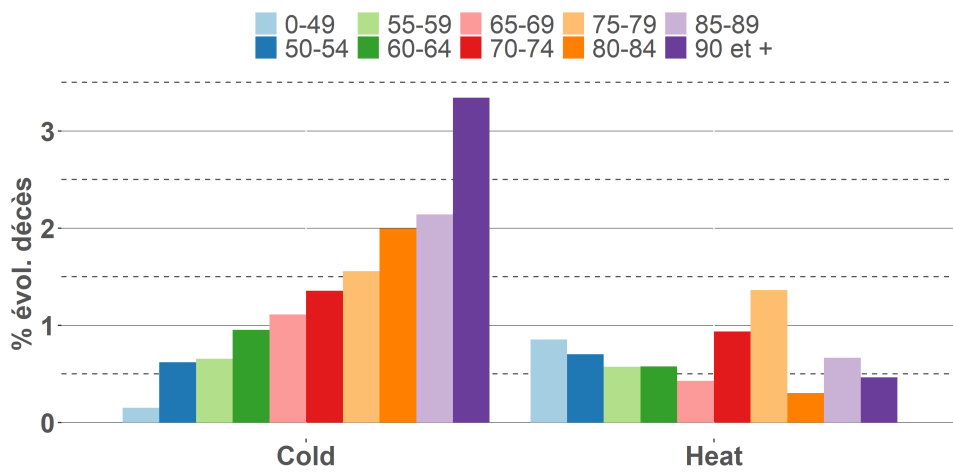


FIGURE 3.17 : % net d'évolution sur le nombre de décès attribués à la chaleur et au froid.

Comme pour les parties précédentes, les années 2015 et 2017 sont visualisées à titre d'exemple (Figure 3.18). Le nombre de décès attribués aux températures est très variable et plus conséquent en hiver. Plus les tranches sont hautes et plus le nombre de décès est important. Cette observation provient en partie du fait qu'en hiver les températures sont éloignées de l'optimum thermique (généralement entre 17 et 19°C). En été la variabilité journalière est importante mais moins marquée en nombre et suit toujours la même logique des tranches d'âge. Ce nombre peut parfois être négatif (sous-mortalité observée après un épisode de forte chaleur). Peu de variations sont observées en dessous de 60 ans : ces tranches d'âge sont moins sensibles aux variations climatiques et le nombre de décès total observé sur ces tranches est largement inférieur aux autres. Pour confirmer ce dernier point on trace le nombre de décès liés aux températures sur le nombre de décès totaux observés (Figure 3.19). Ainsi la part des décès liés aux températures se confirme être croissante en fonction des âges.

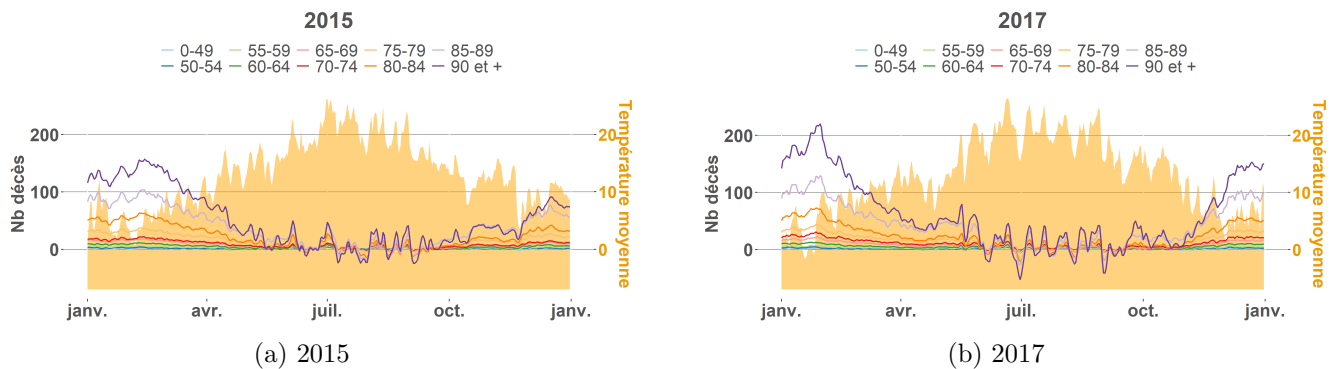


FIGURE 3.18 : Nombre de décès journaliers attribués aux températures les années 2015 et 2017 par tranche d'âge.

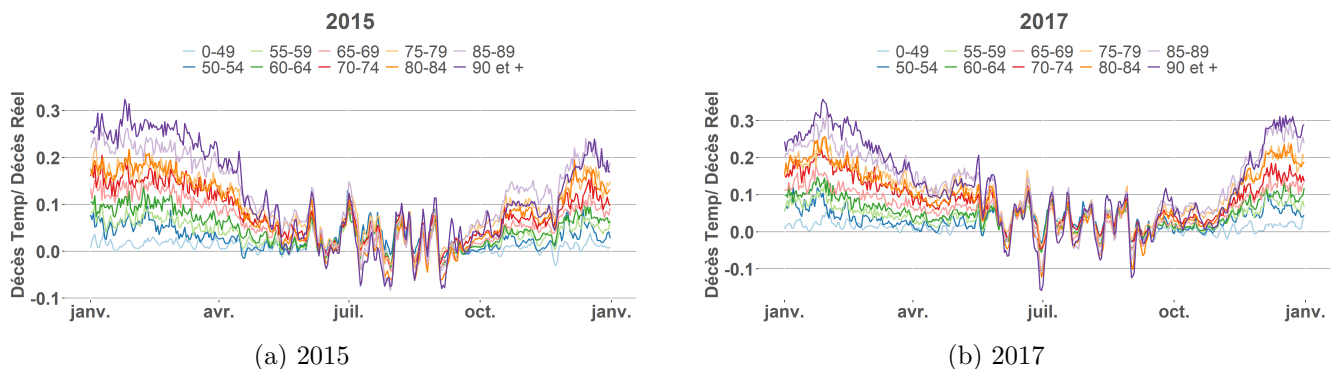


FIGURE 3.19 : Part des décès journaliers attribués aux températures les années 2015 et 2017 par tranche d'âge.

3.6.2 Calibration en faisant varier le sexe

La différence entre homme et femme en matière de décès est importante. En assurance-vie cette distinction est constamment prise en compte avec des tables de mortalité différenciées en fonction du sexe. De plus, comme présenté en section 1.3.2 ces deux populations sont inégalement touchées par les températures. Les taux de mortalité chez les femmes sont inférieurs à ceux des hommes, cette différence est d'autant plus significative en été et face aux températures élevées. La calibration suivante est réalisée sur la période 2000-2019 avec un seuil ψ calculé par itération en minimisant la déviance du modèle, le retard L est fixé à 100 jours pour bien observer les réponses à long terme.

	AIC	Déviance	$gAIC$	ψ	edf	n
Homme	69 187	11 144	0.65	18.0	70.0	759.9
Femme	71 916	14 049	1.08	15.2	82.2	740.8

TABLE 3.6 : Critère de qualité et paramètre en fonction du sexe.

Le modèle est plus conforme aux données historiques pour les hommes que pour les femmes. L'AIC et la déviance sont supérieurs alors qu'il y a moins de décès observés (Table 3.6). Les seuils ψ calculés sont différents, celui-ci est moins élevé chez les femmes avec $\psi = 15.2^\circ\text{C}$ contre 18.0°C chez les hommes. Concernant l'impact des températures, les femmes sont plus sensibles et présentent une plus ample variabilité de décès liés aux températures. Et cette variabilité est largement plus importante face au froid (Figure 3.20a) que pour la chaleur (Figure 3.20b). En revanche il ne semble pas y avoir de différence significative sur l'effet moisson en fonction du sexe.

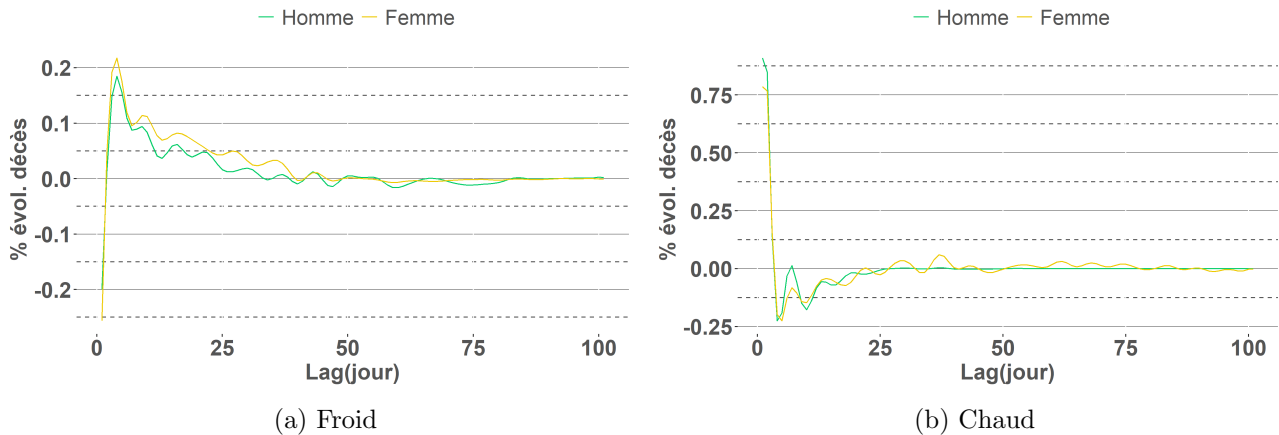


FIGURE 3.20 : % d'évolution sur le nombre de décès attribués au froid et au chaud.

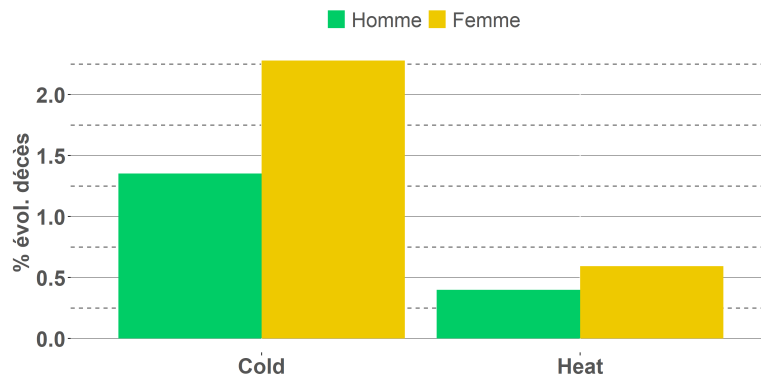


FIGURE 3.21 : % net d'évolution sur le nombre de décès attribués à la chaleur et au froid.

3.7 Choix des paramètres pour la calibration du facteur température

Tranches d'âge et distinction par sexe

Le lien température-mortalité varie très largement en fonction des âges observés, c'est pourquoi il est important de calibrer des facteurs $w_{s,x,n}$ en fonction de l'âge x ou d'une tranche d'âge. Pour éviter d'avoir trop peu d'observations pour certain âge x lors de l'estimation des paramètres contenus dans $w_{s,x,n}$ on décide de travailler sur des tranches de 5 ans (à l'exception des 0-49 ans qui sont regroupés ensemble ainsi que les plus de 90 ans). La sensibilité aux températures est différente en fonction du sexe (section 1.3.2). Alors que les taux de décès sont plus élevés chez les hommes, cette différence tend à se réduire en période hivernale. Inversement, en été la différence de mortalité entre les deux sexes est très marquée. C'est pourquoi, hommes et femmes sont étudiés indépendamment avec une calibration du facteur température pour chacun. Finalement, pour chaque tranche d'âge et sexe un facteur $w_{s,x,n}$ issu du modèle CSDL est calculé.

Période d'observation

Pour avoir un nombre raisonnable d'observations par tranche d'âge et obtenir un échantillon de données représentatif pour la calibration du modèle CSDL, la plage d'observation doit être assez importante. La calibration est initialement réalisée sur la période 1980-2019 (sans 2003) pour répondre à cette exigence. Cependant, la prise en compte d'années trop anciennes entraîne une erreur de prédiction sur les décès survenant sur les étés de 2015 à 2019 de l'ordre de +3.70% par rapport aux observations réelles. Réduire la période d'observation à 2000-2019, toujours sans 2003 abaisse cette erreur à +2.33%. On décide de privilégier une erreur de prédiction plus faible et de réduire le nombre d'observations. L'année 2003 présente une canicule exceptionnelle avec plus de 15 000 décès. Une telle situation ne serait pas reproductible aujourd'hui sachant que de nombreuses précautions, notamment en santé publique, ont été prises depuis. C'est pourquoi elle est retirée des périodes d'observations. Une calibration test a été réalisée sur 2000-2019 avec l'année 2003 pour évaluer son impact réel. L'historique de 2003 entraîne des erreurs de projection très importante face aux épisodes de canicules (comme celle de 2018 ou 2019) avec une erreur allant jusqu'à 6.44% sur le mois de juillet 2019. Dans les projections réalisés en chapitre 4 un scénario supplémentaire prenant en compte cette année est réalisé pour obtenir une borne supérieure.

Paramètres du CSDL

Pour calibrer un CSDL de nombreux paramètres sont à choisir. Le premier arbitrage concerne le choix des paramètres ψ_1 et ψ_2 . Le modèle laisse la possibilité de définir deux seuils délimitant la température à partir de laquelle sera appliqué le lien chaleur-mortalité et froid-mortalité. On s'intéresse ici uniquement à l'impact des températures élevées, c'est à dire qu'uniquement β_2 sera projeté. Le seuil est pris unique pour tous les âges, il est nécessaire de le choisir identique pour tous les âges afin d'éviter de calculer des impacts sur un groupe et pas sur un autre. Il est défini à 18°C, cette valeur est celle qui minimise au mieux les erreurs (Table 3.1). Le choix du paramètre L , période d'observation de retard est un arbitrage entre complexité du modèle et reflet de la réalité. Il a été fixé à 45 jours pour permettre de prendre en compte de la totalité de l'effet moisson sur la plage d'âge observée.

Chapitre 4

Évaluation prospective de la surmortalité résultant de canicule

Bien que l'incidence des canicules sur la mortalité puisse être considérée jusqu'à présent comme assez faible (hors année 2003) ces phénomènes restent tout de même la première cause de mortalité liée au climat dans le monde (WHO, 2017). Le rythme d'apparition des vagues de chaleur a déjà fortement augmenté au cours de ces vingt dernières années et les projections, même les plus optimistes, ne prévoient pas de ralentissement de cette tendance au moins jusqu'en 2050. Le vieillissement de la population et la forte augmentation des plus âgés en France accroît encore plus l'exposition du pays aux vagues de chaleur. Les impacts de tels phénomènes climatiques en matière de mortalité pourraient alors être largement plus conséquents à l'avenir. Ce chapitre détaille dans un premier temps les perspectives des modèles climatiques, ainsi que les projections de populations utilisées pour réaliser l'étude prospective. Avec ces nouvelles données, et selon différentes méthodes, un impact en terme de mortalité sera évalué à l'horizon 2070 grâce à plusieurs indicateurs tels que l'espérance de vie ou le nombre de décès attendus. Enfin une dernière partie s'attardera sur la prise en compte des risques climatiques en assurance ainsi que l'impact monétaire des vagues de chaleur.

4.1 Trajectoires climatiques et scénarios du GIEC

4.1.1 Contexte

L'incidence des activités humaines sur la planète est visible depuis les années 50. Pollution, réchauffement atmosphérique, acidification des océans, disparitions d'espèces, épuisement des sols... Les conséquences sont nombreuses et la responsabilité de l'Homme n'est aujourd'hui plus remise en question, il en est bien la première cause (GIEC, 2021). Dans ce contexte inquiétant, de nombreux acteurs ont sensibilisé les populations à la gravité de la situation et continuent leurs recherches pour imaginer ce que sera le monde de demain selon plusieurs scénarios. Le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), créée en 1988 par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) agit bénévolement pour informer et orienter les politiques dans la gestion environnemental de leur pays. Avec des études et analyses voulues les plus objectives et fiables possibles leurs travaux sont maintenant utilisés par de nombreux acteurs de la vie économique mondiale. L'EIOPA a lancé une première discussion en 2019, puis une seconde en 2020, sur l'inclusion de la prise en compte des risques climatiques dans l'élaboration des stress-tests des assureurs (EIOPA, 2019), (EIOPA, 2020). En France, l'ACPR a également lancé en 2020 un exercice climatique, non obligatoire mais fortement recommandé (ACPR, 2020).

4.1.2 Le 5ème rapport du GIEC

Publié en 2014, le 5ème rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) présente l'état actuel des recherches en matière de climat. En s'appuyant sur des milliers d'études à travers le monde, de nouvelles recherches, et les simulations climatiques futures, ce document à destination du grand public et des politiques se veut avant tout informatif. La première conclusion majeure à retenir de ce rapport est la responsabilité de plus en plus certaine de l'homme sur le réchauffement climatique.

”Il est extrêmement probable que l'influence de l'homme a été la cause principale du réchauffement observé depuis la moitié du XXe siècle. Les preuves s'en sont multipliées grâce à l'amélioration et à la prolifération des observations, à une meilleure compréhension des réactions du système climatique et à l'amélioration des modèles du climat. Le réchauffement du système climatique est sans équivoque et, depuis 1950, on observe dans ce système de nombreux changements sans précédent à une échelle temporelle allant de quelques décennies à plusieurs millénaires.”

5ème rapport du GIEC (GIEC, 2014)

Parmi les conclusions majeures de ce rapport, celles sur l'augmentation des températures atmosphériques sont particulièrement préoccupantes. Sur presque l'ensemble de la planète, une augmentation de 0.85°C a été enregistrée depuis 1880. Les records de chaleur s'enchaînent et l'apparition des canicules est de plus en plus fréquente, particulièrement en Europe, en Asie et en Australie. Alors qu'en Europe les températures ont déjà augmenté de plus d'1°C, la vitesse de réchauffement a été plus rapide que pour le reste du globe et l'exposition des populations au risque caniculaire est grandissante. L'augmentation des températures atmosphériques influe également sur la présence des pollens allergéniques et des maladies vectorielles. Un 6ème rapport est en cours d'élaboration et sera publié en 2022¹.

4.1.3 Les scénarios du GIEC

Pour établir les lignes directrices des projections climatiques, différents scénarios sont envisagés en fonction des profils représentatifs d'évolution de concentration appelés RCP (pour Representative Concentration Pathway). Ces trajectoires sont traduites en bilan radiatif, c'est à dire la différence entre l'énergie solaire reçue et celle diffusée par rayonnement infrarouge. Quatre profils d'évolution sont envisagés dans le 5ème rapport du GIEC. Le forçage radiatif s'exprime en W/m^2 , les trajectoires d'évolution sont schématisées en Figure 4.1.

Une première trajectoire prévoit sur une stricte atténuation des émissions de polluants atmosphériques (RCP 2.6) avec un réchauffement planétaire inférieur à 2°C horizon 2100. Deux scénarios sont intermédiaires (RCP 4.5 et RCP 6.0) avec une stagnation des émissions à niveau faible et moyen. Et enfin un dernier scénario avec des émissions élevées qui continuent d'augmenter au rythme actuel (RCP 8.5). Il s'agit du scénario le plus pessimiste aussi appelé « business as usual ».

¹Le rapport *Climate Change 2021 : the Physical Science Basis* du premier groupe de travail a été publié le 9 août dernier. Les travaux des deux autres groupes sont attendus pour février/mars 2022. Et une synthèse finale sera diffusée en septembre 2022.

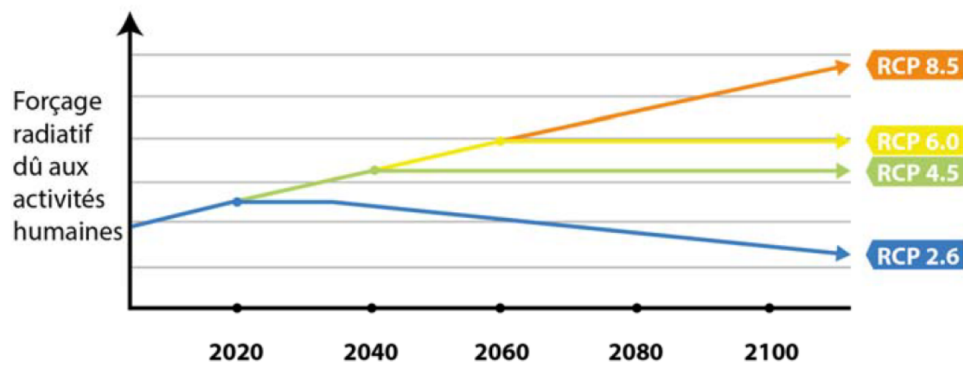


FIGURE 4.1 : Scénarios climatiques envisagés par le GIEC (CCR, 2018)

Pour tous les RCP, les projections prévoient une augmentation de l'acidification des océans jusqu'à la fin du XXI^{ème} siècle avec un rétablissement en milieu de siècle pour le RCP 2.6. Chaque scénario envisagé verra une diminution de la banquise, elle serait même sans glace en septembre 2050 pour le RCP 8.5. Il est fort probable que l'élévation du niveau de la mer s'accélère. Comparativement à la période 1986-2005, l'élévation attendue pour 2081-2100 est de 0.26-0.55m pour le RCP 2.6, et 0.45-0.82m pour le RCP 8.5. Concernant les températures, les émissions de gaz à effets de serre croissantes en scénario 8.5, se traduiraient par une hausse de 1.4°C à 2.6°C à l'horizon 2050 et 2.6°C à 4.8°C pour 2100 (CCR, 2018).

4.1.4 Les modèles climatiques

Avec l'émergence de la puissance de calcul, les modèles climatiques peuvent être de plus en plus complexes et détaillés. Contrairement aux anciens modèles de prévision numérique, ces nouveaux modèles appelés Modèles Atmosphère de Circulation Générale (MACG) ou General Circulation Model (GCM) en anglais forcent des variables climatiques futures vers des valeurs probables en moyenne mensuelle. Les modèles climatiques globaux intègrent différents blocs qui interagissent les uns avec les autres (dynamique des océans, de l'atmosphère, ou encore végétation). Contrairement aux modèles de prévisions météorologiques, leur objectif premier est de coller avec les observations passées en utilisant une plus large période historique de référence. À partir de cette calibration, le modèle évolue librement en suivant des hypothèses et formules de calcul. Le résultat obtenu résulte du quotient « énergie reçue – énergie perdue ». Le rayonnement solaire capté par l'atmosphère est l'énergie reçue, et l'énergie perdue est le rayonnement infrarouge cédé par l'atmosphère. Ce quotient est à la base même des scénarios RCP nommés en fonction de leur forçage radiatif, c'est-à-dire un changement dans le bilan radiatif, différence entre rayonnement entrant et sortant.

4.1.5 Résolution et maille des modèles climatiques

Modèles globaux

Deux modèles climatiques globaux existent en France, un premier développé par le CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques), et un second par l'IPSL (Institut Pierre-Simon Laplace). La différence majeure entre ces deux modèles est la composante atmosphérique, le CNRM utilise « Arpège-Climat », entité de prévisions météorologiques de Météo France pour l'étude climatique, alors que l'IPSL utilise le modèle « LMDZ » qui est développé pour coïncider entre autres avec les atmosphères planétaires (Terre, Mars, Vénus...). Ce sont d'ailleurs ces deux modèles globaux qui sont développés dans le 5ème rapport du GIEC :

- **CNRM – CM5, Météo France et CERFACS**, (VOLDOIRE et al., 2011),
- **IPSL - CM5, Institut Pierre Simon Laplace**, (DUFRESNE et al., 2010).

Comme ce sont deux GCM¹, le maillage est large (entre 100 et 300 km) et empêche un détail local précis. Pour pallier à cette limite des modèles régionaux sont également implémentés.

Modèles régionaux

Les modèles régionaux couvrent des zones plus restreintes. Ils permettent une résolution spatiale très fine (10 à 20 km) prenant en compte l'atmosphère et la végétation. Les caractéristiques océaniques n'y sont pas représentées mais extraites des modèles globaux les entourant (Figure 4.2. Les limites aux bords des RCM (Regional Climate Model) sont forcées par les modèles globaux.

Le modèle régional du CNRM est ALADIN-Climat. L'IPSL utilise les modèles WRF et MM5.

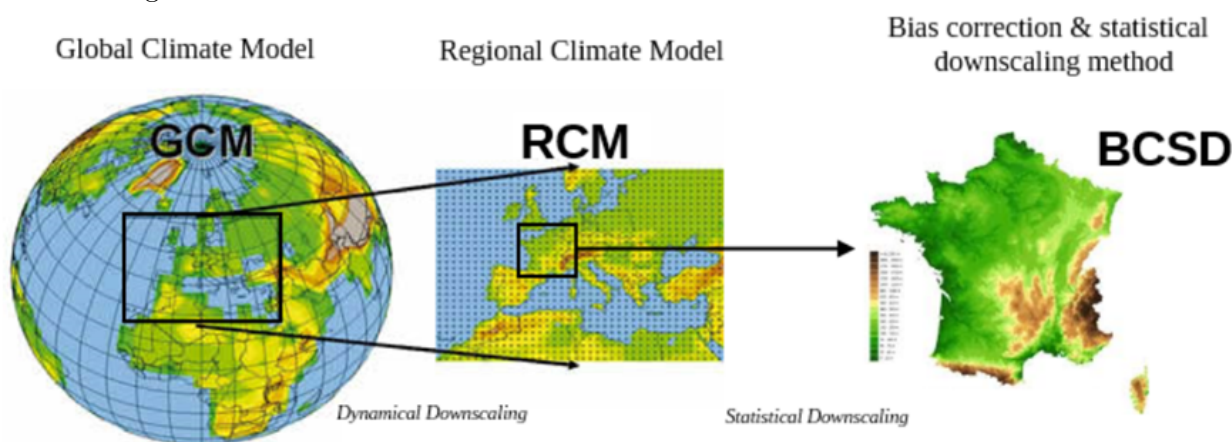


FIGURE 4.2 : Architecture des modèles climatiques (DRIAS, 2020)

4.1.6 Disponibilité des données

Dans le cadre du projet international CORDEX, projet visant à coordonner les recherches mondiales en termes de projection climatique, sa branche européenne Euro-CORDEX a mis à disposition en 2014 différentes simulations. Les sorties de ces simulations ont été améliorées et corrigées en 2020 et sont disponibles gratuitement grâce au portail DRIAS. Les données disponibles pour l'Europe ont une résolution de 7 à 10 km², avec différentes variables journalières comme la température moyenne, minimale, maximale, les précipitations totales ou encore la vitesse du vent. 42 simulations sont disponibles dont 12 sur la période historique, 12 pour le RCP 8.5, 10 pour le RCP 4.5 et 8 pour le

¹General Circulation Model

²En fonction des zones géographiques.

RCP 2.6. À partir des combinaisons GCM/RCM, les modèles couvrent l'Europe. Les résultats sont ensuite projetés sur une grille de 8 km par 8 et pour la France puis sont corrigés par la méthode ADAMONT (VERFAILLIE et al., 2017).

On décide d'utiliser une combinaison d'un modèle global et régional français. Le modèle global retenu est le « CNRM-CM5 », il a une résolution de 1.4° par 150 km et le modèle régional pour le compléter est le « ALADIN-Climat » d'une résolution de 0.11° par 12 km. La correction des biais et la descente d'échelle statistique (BCSD) est réalisée par la méthode ADAMONT pour obtenir une résolution finale de 8 km (134 * 143 points sur la grille SAFRAN¹).

Deux scénarios sélectionnés pour la suite de l'étude sont le RCP 8.5 (pire scénario) et le RCP 2.6 (le plus optimiste). Ce choix permet d'avoir deux évaluations d'impact des canicules futures, une dans le meilleur des cas et une dans le pire des cas. Une autre raison d'ordre pratique a motivé ce choix, le portail DRIAS ne met pas à disposition le scénario intermédiaire 6.0. Les données sont récupérées directement sur le portail DRIAS, il suffit de se créer un compte gratuitement pour avoir accès à l'ensemble des scénarios (DRIAS, 2020).

4.1.7 Comparaison des différents scénarios en fonction des modèles

Avec le portail DRIAS, il est possible de récupérer différentes données de températures journalières (moyennes, minimales et maximales) relatives à un scénario climatique et un modèle sélectionné. Du fait de la granularité très fine de la grille SAFRAN (134*143 points pour quadriller la France), de la quantité importante d'années à analyser (de 2020 à 2100), et de la limitation d'extraction du portail, il faut réduire la quantité de points sélectionnés. Pour rester cohérent avec les précédentes analyses, les informations sont relevées pour les 14 villes françaises² utilisées dans le mémoire. Cette approximation est conforme pour une étude de températures puisque le climat est évalué en moyenne sur la France et que les températures sont globalement homogènes. Il est peu probable voir impossible d'avoir une vague de chaleur importante extrêmement localisée, un épisode de canicule se ressentira sur une large partie du pays. En revanche une telle approximation ne serait pas cohérente avec une étude de précipitations : les épisodes de pluie intense sont locaux et les quantités d'eau apportées varient en fonction du territoire.

¹Le système SAFRAN est une méthode d'analyse de données météorologiques, il utilise une grille de résolution 8km pour des observations de surface (QUINTANA-SEGUÍ et al., 2008).

²Paris ; Brest ; Bordeaux ; Toulouse ; Perpignan ; Marseille ; Lyon ; Dijon ; Strasbourg ; Lille ; Caen ; Tours ; Clermont-Ferrand ; Nantes

Simulation CNRM-ALADIN63 – RCP 8.5

En utilisant les mêmes indicateurs qu’au chapitre 2 pour identifier une vague caniculaire avec les seuils les plus élevés, à savoir un seuil minimal de 18°C et maximal de 30°C sur 3 jours glissants. Pour rappel, la sévérité cumulée est la somme des écarts aux seuils, et l’intensité correspond aux écarts maximaux observés entre seuils et température du jour. Les vagues sont identifiées pour chaque scénario 8.5 (Figure 4.3) ou 2.6 (Figure 4.6).

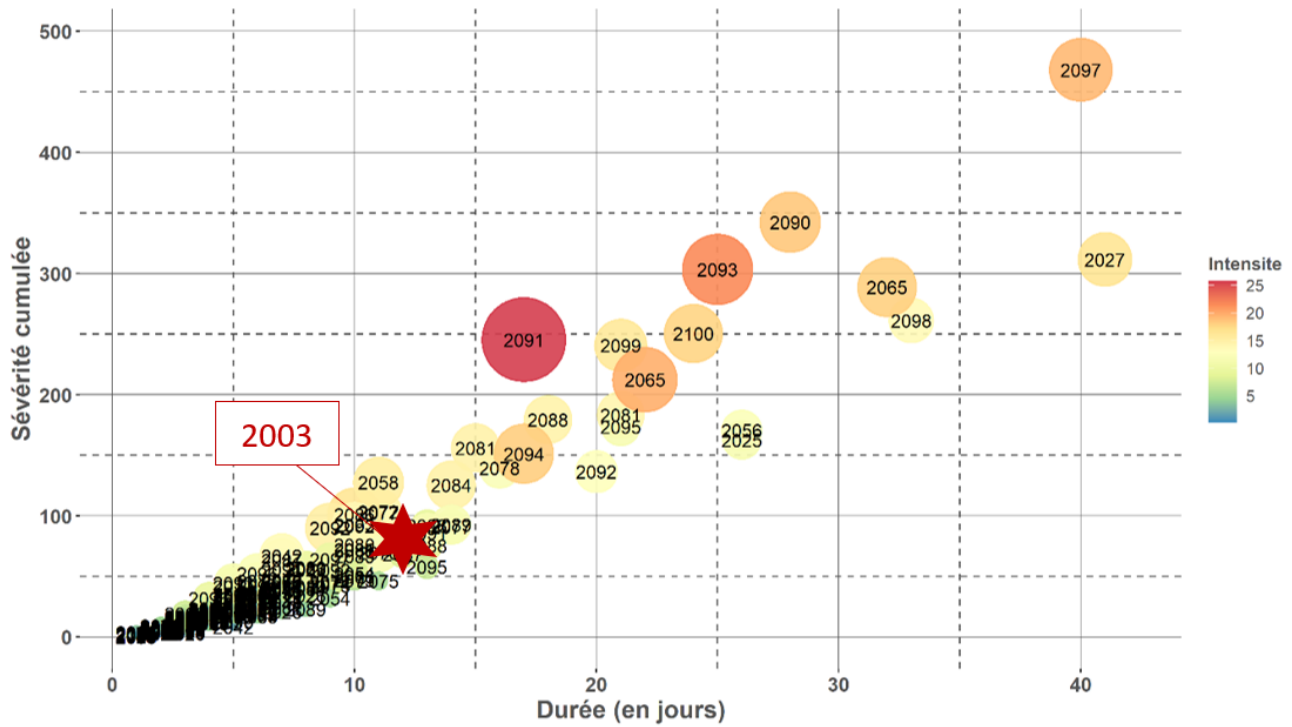


FIGURE 4.3 : Vagues caniculaires, modèle CNRM-ALADIN, RCP 8.5.

275 vagues sont identifiées sur 72 des 80 années étudiées (2020-2100). La plus longue est en 2027 avec 41 jours de canicule consécutifs. La plus intense est en 2091 avec en moyenne sur la vague une température maximale de 44.7°C, moyenne de 31.3°C et minimale de 20.9°C, le tout en moyenne sur la France métropolitaine. À titre comparatif avec ces seuils, la canicule de 2003 a duré 12 jours, pour une sévérité cumulée de 92 et une intensité de 9.2, elle se situe dans les canicules importantes mais fréquentes, 28 d’entre-elles ont duré plus longtemps. La Figure 4.4 présente le nombre de vagues identifiées sur l’année en fonction de leur durée moyenne en jour. Sur la période 2020-2050 il y a en moyenne 2.38 canicules par an qui durent en moyenne 5 jours. Après 2050 le nombre de vagues grimpe jusqu’à 4.4 par an avec une durée moyenne de 6.3 jours. Le détail du nombre de jours cumulés de canicule sur l’année est illustré en Figure 4.5.

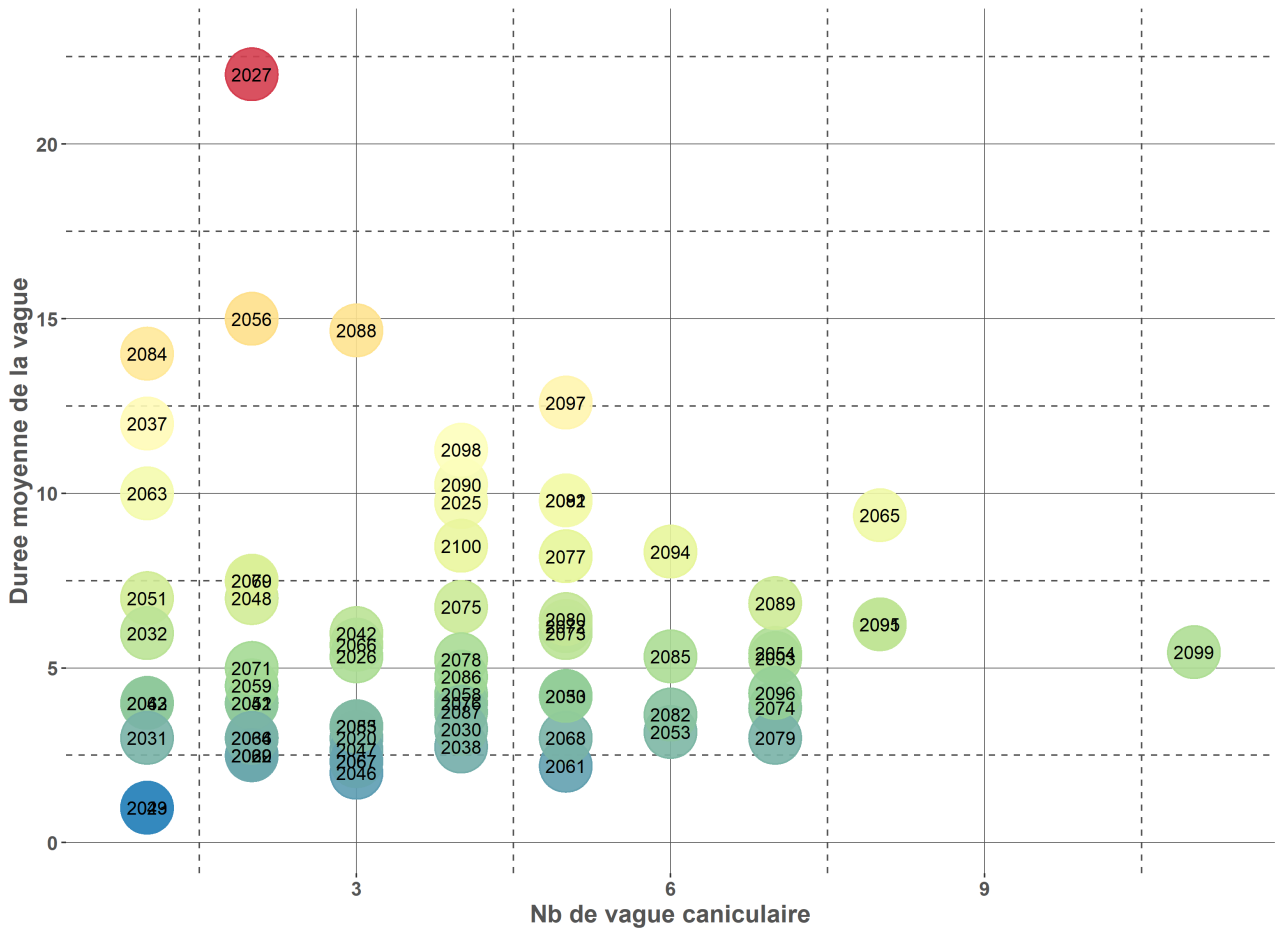


FIGURE 4.4 : Nombre de canicules moyennes et durée par année, modèle CNRM-ALADIN, RCP 8.5.

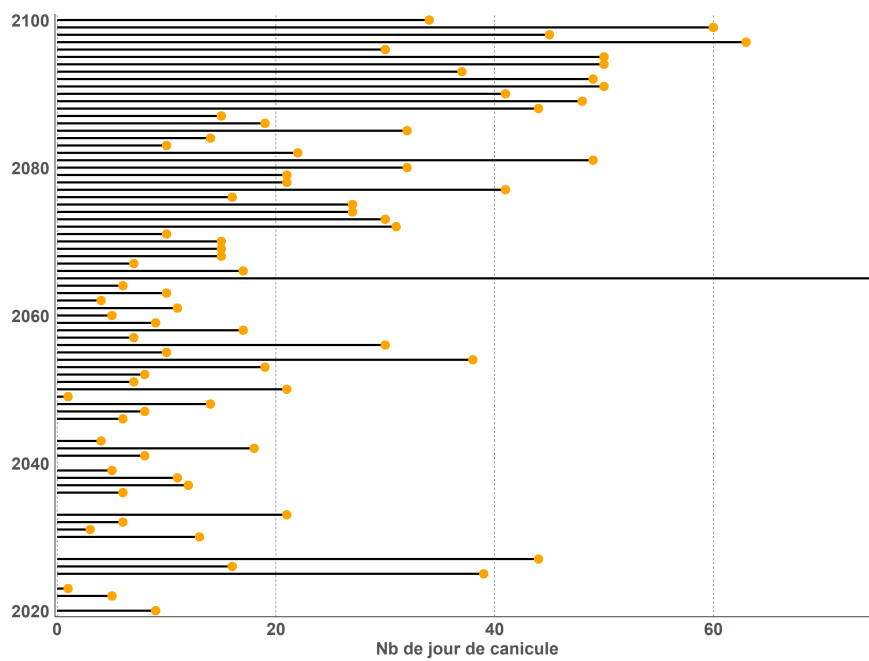


FIGURE 4.5 : Nombre de jours cumulés de canicule par année, modèle CNRM-ALADIN, RCP 8.5.

Simulation CNRM-ALADIN63 – RCP2.6

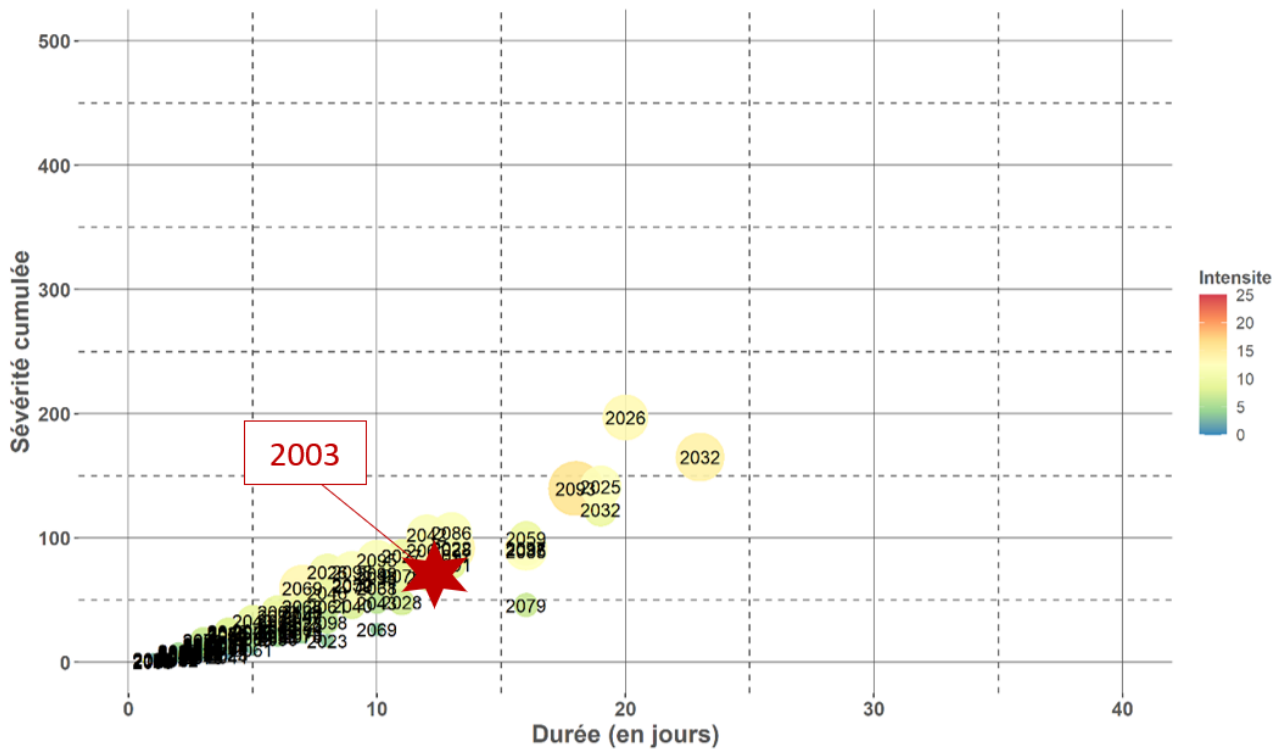


FIGURE 4.6 : Vagues caniculaires, modèle CNRM-ALADIN, RCP 2.6.

Le scénario RCP 2.6 se veut plus optimiste que le 8.5, avec de faibles émissions de gaz à effet de serre atteignant un point culminant en 2050 le tout suivi d'une décroissance des émissions et d'une réduction des températures prévoit moins de canicules importantes. 198 vagues sont identifiées sur l'ensemble de la période (Figure 4.6). Elles sont largement moins violentes que pour le RCP 8.5 avec une intensité moyenne de 4.9. La Figure 4.8 qui représente le nombre de vagues par année et leur durée atteste d'une baisse significative des épisodes caniculaires comparativement au scénario RCP 8.5. Elles durent en moyenne 4.7 jours contre 5.8 précédemment. 2003 fait alors partie des vagues les plus sévères. Seules 18 d'entre-elles ont une durée similaire ou plus longue. Ces vagues similaires sont réparties majoritairement sur la première moitié du XXI^{ème} siècle, entre 2020 et 2050 (Figure 4.8). Cette observation est logique avec le principe même du scénario 2.6 qui prévoit une trajectoire de forçage radiatif constante jusqu'au milieu de siècle puis en déclin jusqu'à 2100.

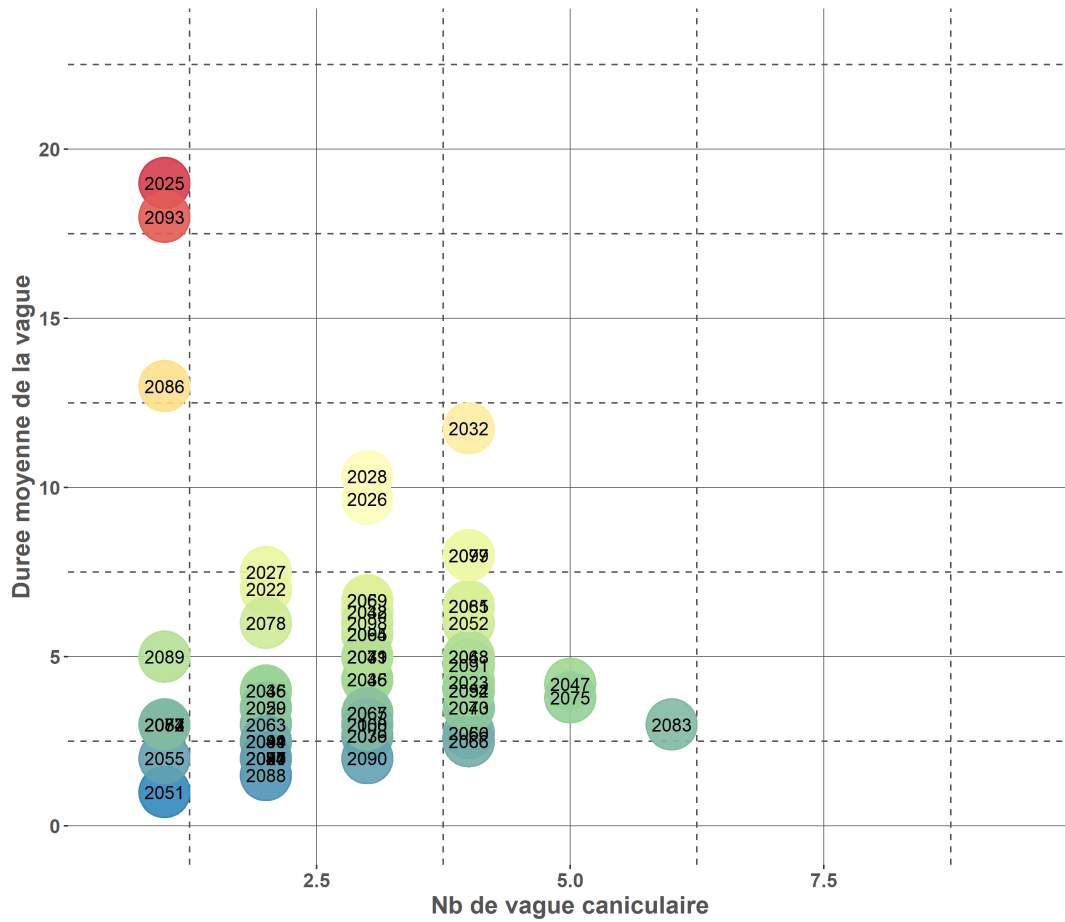


FIGURE 4.7 : Nombre de canicules moyenne et durée par année, modèle CNRM-ALADIN, RCP 2.6.

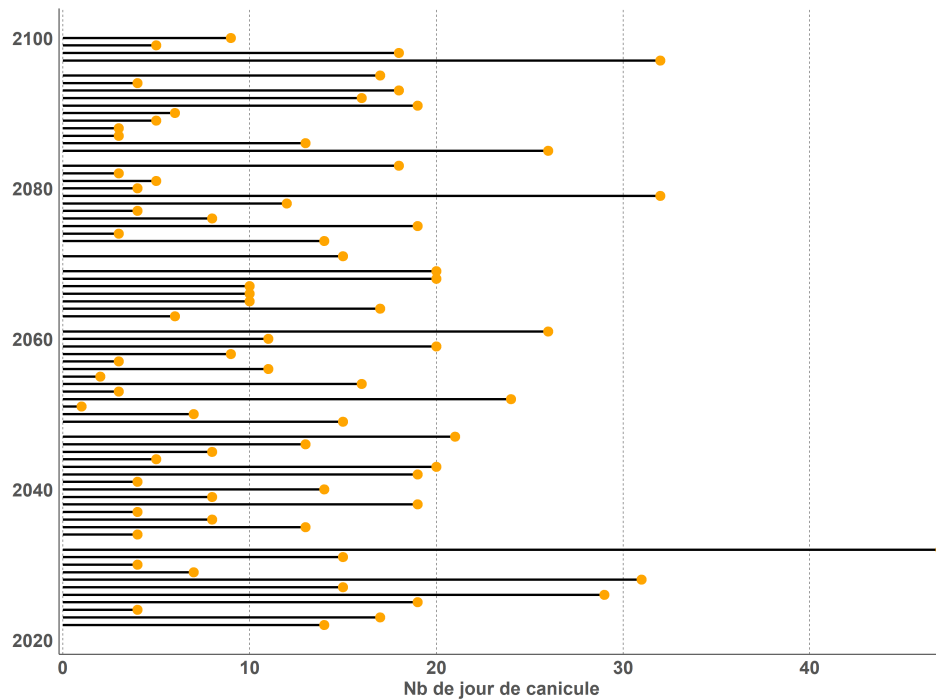


FIGURE 4.8 : Nombre de jours cumulés de canicule par année, modèle CNRM-ALADIN, RCP 2.6.

4.2 Modélisation prospective de la population

4.2.1 Projection de la population

Sous l'hypothèse que la tendance démographique telle qu'observable aujourd'hui se poursuive, la population française passerait de 67,4 millions ¹ à 76,5 en 2070 et cette augmentation toucherait essentiellement sur les plus de 65 ans. Sur les 10,7 millions d'habitants supplémentaires que compterait la France il y en aurait 10,4 de plus de 65 ans et 7,8 de plus de 75 ans (INSEE, 2016). Dans ce contexte l'INSEE a conçu des projections de la population française selon plusieurs hypothèses relatives à la fécondité, à la mortalité, ou encore au solde migratoire. Jusqu'à 2040 la part de personnes âgées dans la population devrait continuer de fortement progresser, et ce peu importe l'hypothèse retenue. Cela correspond à l'arrivée des générations baby-boom aux tranches d'âges élevés. Globalement le nombre de français en 2070 est assez variable en fonction des hypothèses retenues mais la structure de la population par âges est elle beaucoup moins sensible à ces choix. À l'horizon 2070, il y aurait deux actifs (20 à 64 ans) pour deux ou plus de 65 ans.

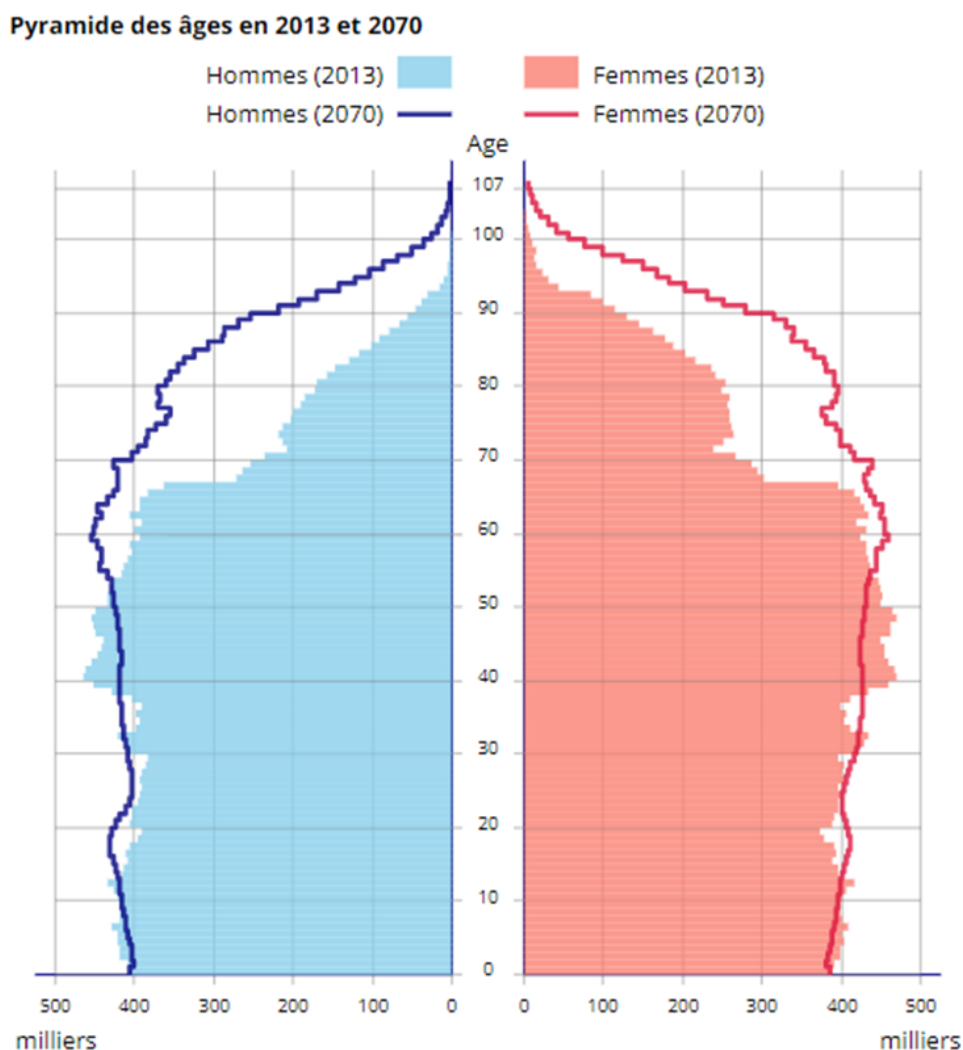


FIGURE 4.9 : Projection de la pyramide des âges en scénario central (INSEE, 2016).

¹au premier janvier 2021

Par rapport au dernier exercice qui faisait état de projections à l'horizon 2060, le scénario central intègre ici les dernières données disponibles et prévoit quelques modifications d'hypothèses notamment en tenant compte d'une fécondité plus importante, d'une espérance de vie plus élevée et d'un solde migratoire légèrement en baisse. La fécondité est identique pour les générations 1990-2007 avec [2.05 - 2.10] enfants par femme, mais revue à la baisse pour les générations plus récentes (1.95). L'espérance de vie à la naissance est passée de 86 ans en 2060 pour les hommes à 89 ans, et de 91 ans à 92 ans pour les femmes sur la même année.

Cette nouvelle répartition de la population évoluera dans un monde au climat incertain. Ces évaluations prospectives prennent uniquement en compte les tendances passées et plusieurs hypothèses démographiques, pourtant le changement climatique pourrait influencer sur ces dynamiques que ce soit en mortalité ou en flux migratoires liés au climat. La concentration de la population dans les classes d'âge élevées constitue un nouvel enjeu de santé publique. Ces tranches d'âge sont les plus à risque vis-à-vis des températures et l'apparition de nombreuses canicules qui seront plus longues et plus intenses. Le bilan humain risque alors d'être de plus en plus lourd à l'avenir.

4.3 Impact du risque canicule sur la mortalité

En utilisant le modèle CSDL et les paramètres de calibration tels qu'expliqué dans le chapitre 3, le lien entre température moyenne et surmortalité est contenu dans un facteur multiplicatif pour chaque tranche d'âge et sexe. Grâce aux sorties des modèles climatiques disponibles sur DRIAS deux trajectoires de températures journalières à l'horizon 2100 sont disponibles. Le principe de cette modélisation peut se résumer de la façon suivante (Figure 4.10).

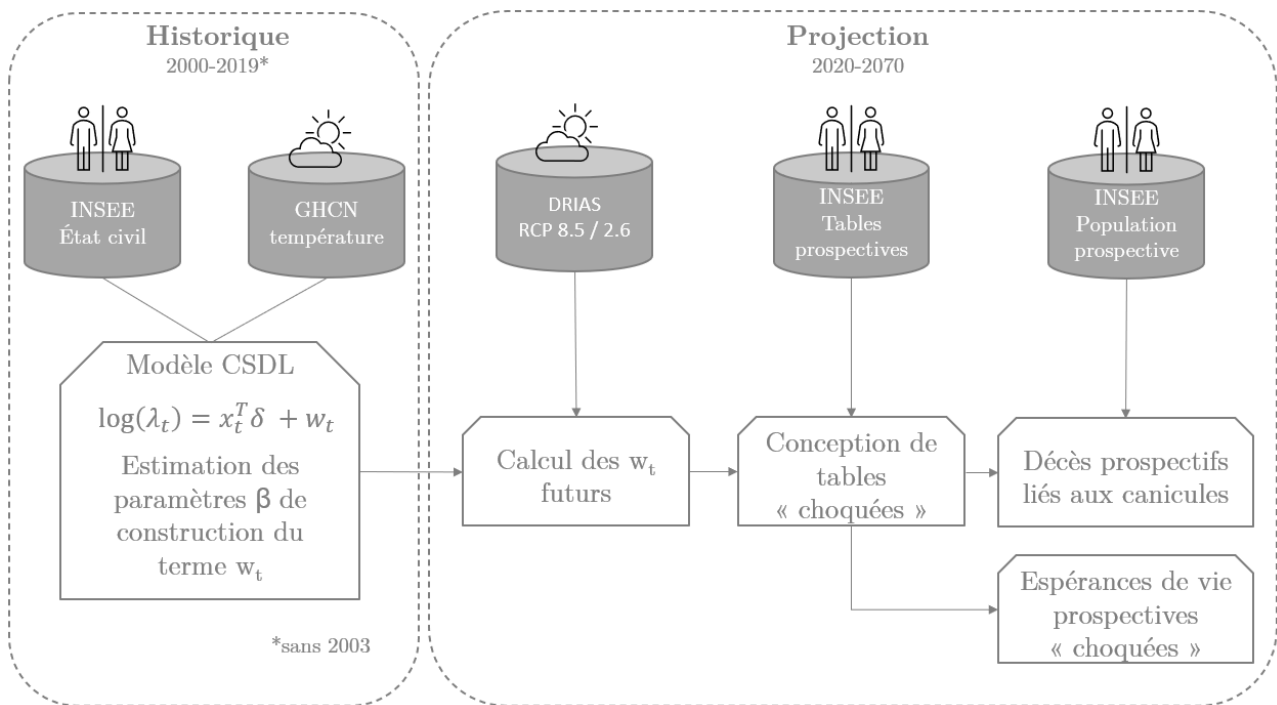


FIGURE 4.10 : Diagramme résumant le principe de modélisation et de projection.

4.3.1 Calibration des modèles CSDL sur l'historique

Pour chaque tranche d'âge et sexe un modèle CSDL est calibré sur la période 2000-2019¹ avec un seuil $\psi = 18^\circ\text{C}$, un lag= 45 jours et une pénalité quadratique appliquée pour lisser les effets tardifs.

La période d'étude est une importante source de variabilité. Les nombres de décès sont très segmentés (par tranche de 5 ans et par sexe), prendre une plus large période d'observation permet d'avoir un plus grand nombre de données. Mais en prenant des données trop anciennes, on surévalue l'impact des températures estivales sur la population (partie 3.5.1). Retirer l'année 2003 reste être un choix cohérent en gardant à l'idée qu'il serait très peu probable d'observer aujourd'hui un tel pic de surmortalité. Pourtant il s'agit d'un épisode de canicule atypique et durable comparable aux futures vagues de chaleur prédites par les modèles climatiques (aussi bien sur le RCP 2.6 que 8.5). En retirant 2003 de la calibration, on retire donc l'une des seules observations passées avec une durée importante.

Le seuil ψ est forcé à 18°C pour que l'ensemble des températures soit pris en compte sur les tranches d'âge. Laisser la possibilité au modèle d'ajuster le seuil en fonction de la tranche d'âge aurait créé une inégalité de traitement liée à l'âge. Si par exemple le seuil optimal pour les 80-85 ans est de 17.5°C et celui des 50-55 de 19.5°C , face à une température de 18°C aucun impact de chaleur ne sera calculé sur les 50-55 ans alors que les 80-85 ans auront une pénalité proportionnelle à $(18 - 17.5) = 0.5^\circ\text{C}$.

La prise en compte d'un retard sur 45 jours est un arbitrage entre quantité d'observations altérant la complexité du modèle et trop peu d'observations ne reflétant pas la réalité. Ce paramètre influe fortement sur l'impact net des températures chaudes en particulier chez les personnes âgées. Prendre un lag trop court ne comptabilise pas assez d'effet moisson. Prendre un lag plus long entraîne un impact net chez les plus âgés beaucoup plus faible puisque ces tranches d'âge ont des rattrapages plus élevés que chez les plus jeunes. Pour rappel l'impact net est la somme des effets températures entre $t = 1$ et $t = 45$ jours.

La pénalité quadratique est utilisée dans la regression des courbes β_1 et β_2 par B-splines, elle permet d'approcher les effets tardif à zéro et de lisser la courbe de réponse.

Ainsi, 20 modèles CSDL sont calibrés (10 par sexe). On obtient pour chacun une relation température-mortalité face à la chaleur et face au froid, visualisée en impact net en Figure 4.11. L'impact net du froid est égal à $\sum_{i=1}^{45} \beta_1$ et celui du chaud à $\sum_{i=1}^{45} \beta_2$

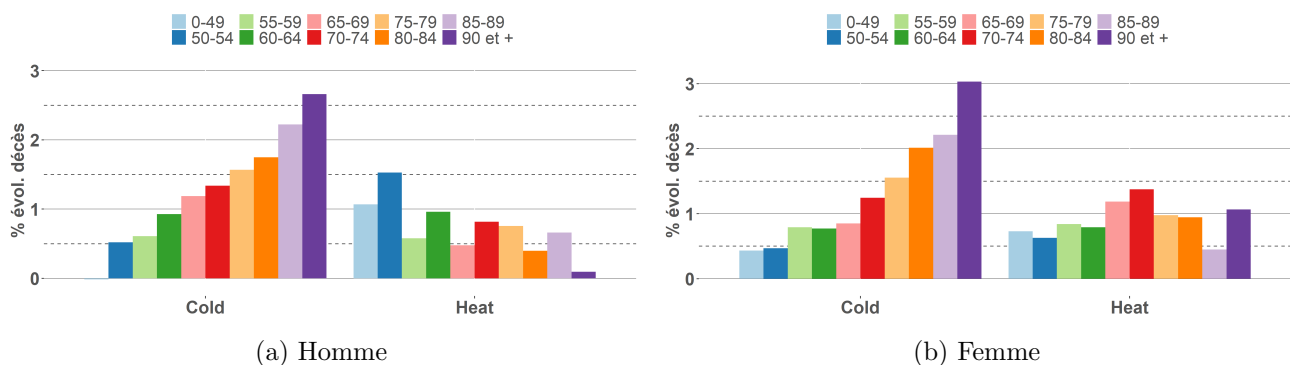


FIGURE 4.11 : Net impact en % d'évolution de la mortalité face au chaud et au froid pour les hommes et les femmes par tranches d'âge.

¹sans 2003

Le net impact lié au froid est croissant par âge et invariant par sexe, avec tout de même une différence d'impact quantitatif sur les femmes (il s'agit d'un facteur multiplicatif applicable à un nombre de décès, or sur une même tranche d'âge le nombre de décès chez les femmes est moins élevé que chez les hommes, la variabilité est donc plus importante). La chaleur présente elle en revanche des différences en fonction de l'âge ou du sexe, et ce sont d'ailleurs ces impacts qui varient assez largement en fonction de la calibration. Ce qui ne varie pas est l'impact chez les femmes qui est toujours plus important que chez les hommes, notamment aux âges élevés.

L'ensemble des graphes et tableaux de critères de qualité de ces modèles sont disponibles en annexe (courbe β de la chaleur en Figure A.2 et critère de qualité dans les tableaux A.2 et A.3).

4.3.2 Méthodologie de projections sur les RCP 2.6 et 8.5 et calcul d'indicateurs

Les deux trajectoires de températures journalières par scénario RCP sont disponibles jusqu'en 2070. Pour chaque trajectoire, les modèles CSDL sont projetés sur les 92 jours d'été uniquement. On ne prend en compte que l'effet lié à la chaleur, c'est-à-dire au dessus du seuil $\psi = 18^\circ\text{C}$ il est modélisé par la courbe β_2 qu'on appellera dans la suite β . Trois projections sont successivement réalisées :

- (a) Projection de l'impact « chaleur » sur les 92 jours d'été, partie 4.3.3,
- (b) Projection de l'impact « chaleur » sur les 92 jours d'été avec 2003 (calibration des $\tilde{\beta}$ avec prise en compte de 2003), partie 4.3.4,
- (c) Projection de l'impact « chaleur » sur les jours de canicule, partie 4.3.5.

On a alors pour chaque jour t par année n :

$$\begin{aligned}
 \text{(a)} \quad w_{s,x,RCP,t} &= \sum_{l=0}^{45j} \beta_{s,x,l}(z_{RCP,t-l} - 18^\circ\text{C})_+, \\
 \text{(b)} \quad w_{s,x,RCP,t} &= \sum_{l=0}^{45j} \tilde{\beta}_{s,x,l}(z_{RCP,t-l} - 18^\circ\text{C})_+, \\
 \text{(c)} \quad w_{s,x,RCP,t} &= \sum_{l=0}^{45j} \beta_{s,x,l}(z_{RCP,t-l} - 18^\circ\text{C})_+ \mathbb{1}_{t \in \{\text{canicule}\}} + \mathbb{1}_{t \notin \{\text{canicule}\}}.
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

avec s le sexe, x l'âge, t le jour de l'année n compris entre le 1er juin et le 31 août, RCP la trajectoire empruntée (2.6 ou 8.5), $z_{RCP,t-l}$ la température du jour $t-l$ et $\beta_{s,x,l}$ la courbe du modèle CSDL modélisant la relation chaleur-mortalité pour le groupe d'âge x et de sexe s . Le coefficient est ensuite annualisé de la façon suivante :

$$\text{coeff_norm}(s, x, RCP, n) = \frac{1}{N_n} \sum_{t=1}^{N_n} \mathbb{1}_{t \in \{\text{été}\}} e^{w_{s,x,RCP,t}} + \mathbb{1}_{t \notin \{\text{été}\}} = w_{s,x,RCP,n}, \tag{4.2}$$

avec N_n le nombre de jours dans l'année n . Il s'agit du log-facteur multiplicatif à associer aux forces de mortalité pour rendre compte des effets du climat sur la mortalité instantané.

Les facteurs $e^{w_{s,x,RCP,n}}$ calculés pour chaque trajectoire sont ensuite appliqués aux forces de mortalité $\mu_{s,x,n}$ calculés à partir des tables de mortalité prospectives INSEE 2070 (INSEE, 2016). En supposant la fonction de hasard constante selon l'âge et l'année on a : $\mu_{s,x,n} = -\ln(1 - q_{s,x,n})$. On calcule ensuite

$\mu_{s,x,n}^{85}$ pour le scénario RCP 8.5 et $\mu_{s,x,n}^{26}$ pour le RCP 2.6 de la façon suivante :

$$\mu_{s,x,n}^{85} = \mu_{s,x,n} e^{w_{s,x,n}^{85}} \quad \text{et} \quad \mu_{s,x,n}^{26} = \mu_{s,x,n} e^{w_{s,x,n}^{26}}. \quad (4.3)$$

On en déduit ainsi deux nouvelles tables de mortalité par sexe en scénario de stress climatique. Pour mieux se rendre compte des dommages, on visualise le nombre de décès correspondant. Les dernières projections démographiques de l'INSEE (INSEE, 2016) donnent accès au nombre d'habitants par sexe sur chaque année entre 2020 et 2070. On applique les taux de mortalité choqués sur ces expositions pour en déduire le nombre de décès sur chaque année (Figure 4.15). On peut ensuite visualiser la différence en nombre de décès entre le scénario central (non choqué) et les deux intégrant un impact climatique (Figure 4.16).

À partir de ces nouvelles tables, on calcule les espérances de vie résiduelles $e_{x,n}$ pour chaque année n à l'âge x pour la table INSEE (pour ne pas alourdir les notations on la note par la suite e_x). e_x^{85} étant l'espérance de vie issu de la table INSEE intégrant un facteur climatique relatif au scénario RCP 8.5 et e_x^{26} est issu de la table INSEE intégrant un facteur climatique relatif au scénario RCP 2.6. e_x est l'espérance de vie à l'âge x calculé à partir de sa table correspondante de la façon suivante (PLANCHET et THÉRON, 2006) :

$$e_x = \frac{1}{l_x} \int_0^{+\infty} l_{x+u} du \approx \frac{1}{L_x} \sum_{i=x}^{\infty} L_{x+i}, \quad (4.4)$$

où l_x correspond à la survie des individus d'âge x (survivants) à partir de l'année n . Le temps vécu par les individus de la cohorte d'âge x , entre x et $x+t$, noté ${}_tL_x$ se mesure comme : ${}_tL_x = \int_0^t l_{x+u} du$. On obtient alors les espérances de vie résiduelles brutes telles qu'envisagées par l'INSEE à l'horizon 2070, ainsi que celles sous stress climatique.

4.3.3 Projection de l'impact « chaleur » sur les 92 jours d'été

La première projection réalisée ici modélise l'impact total lié au climat estival sur les années comprises entre 2020 et 2070. Pour chacune de ces années, un facteur modélisant l'impact des températures sur la mortalité est calculé lorsque la température du jour t est supérieur au seuil à partir duquel on considère un impact notable sur la mortalité, soit 18°C. On obtient ainsi des facteurs multiplicatifs par âge, sexe et année (Figure 4.12 pour le RCP 2.6 et Figure 4.13 pour le RCP 8.5). Pour visualiser une évolution plus globale, les facteurs moyens par sexe et par année sont présentés en Figure 4.14.

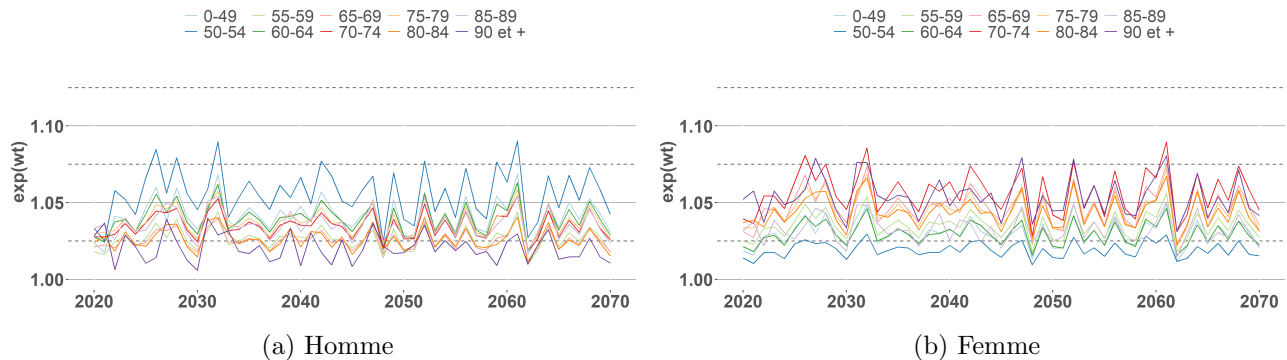


FIGURE 4.12 : Facteur e^{w_n} pour le scénario RCP 2.6 entre 2020 et 2070 pour les hommes et les femmes.

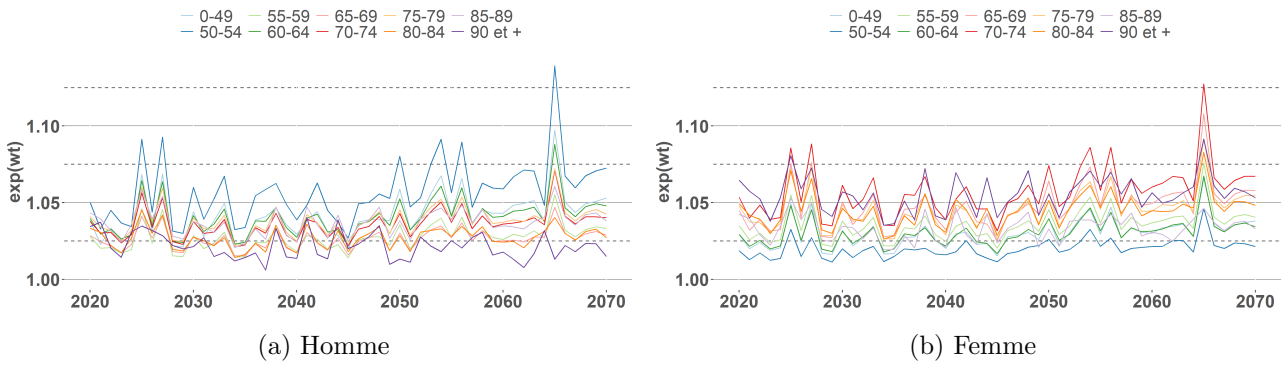


FIGURE 4.13 : Facteur e^{w_n} pour le scénario RCP 8.5 entre 2020 et 2070 pour les hommes et les femmes.

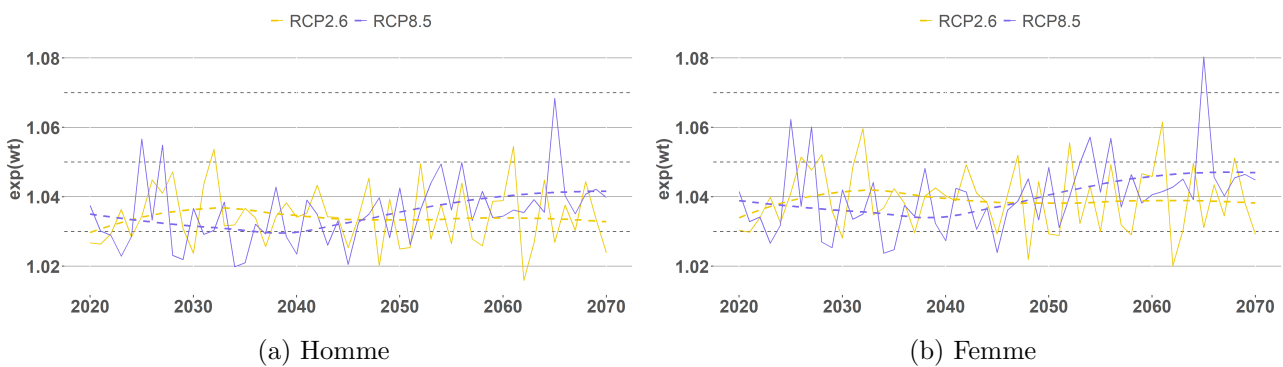


FIGURE 4.14 : Facteur e^{w_n} moyen (tous âges confondus) pour le scénario RCP 8.5 et 2.6 entre 2020 et 2070 pour les hommes et les femmes, les courbes en en pointillé représente la tendance des facteurs (méthode Loess).

La première observation importante est la différence d'impact entre les deux scénarios. Jusqu'en 2050, les facteurs sont similaires avec des pics relatifs aux années à températures estivales plus élevées que les autres. La trajectoire du scénario 2.6 présente même des températures plus élevées sur les 3 mois d'été que le 8.5. Cela était déjà visible dans la partie précédente sur la présentation des scénarios du GIEC et les canicules identifiées. Cette différence est difficilement interprétable dans la mesure où il s'agit d'une unique trajectoire. Si l'on se rapporte aux documentations de ces modèles, les températures moyennes entre ces deux RCP devraient suivre globalement la même tendance jusqu'en 2050 puis quand l'une sera en déclin (RCP 2.6), la seconde verra sa température moyenne augmenter (RCP 8.5). Sur la période 2050-2070, les facteurs restent stables pour la trajectoire 2.6 alors que le scénario 8.5 présente une hausse de l'impact des températures après 2050. Cela est cohérent avec les documentations des modèles. Une forte hétérogénéité réside au sein des groupes d'âge chez les hommes. La population des moins de 60 ans présente des facteurs plus importants que les autres. Chez les femmes, les facteurs sont ordonnés par âges : plus importants sur les tranches supérieures et moins importants sur les tranches inférieures.

Le nombre de décès annuel résultant des tables sous stress climatique est supérieur à la référence INSEE de l'ordre de 5 000 à 15 000 décès pour les hommes et 7 500 à 25 000 pour les femmes (Figure 4.15). Ce nombre n'est pas à interpréter comme des décès en excès mais correspond plutôt au nombre de décès considéré comme lié aux températures élevées. Dans le modèle classique CSDL le facteur w_t qui capte les effets températures sur les décès est appliqué à un nombre de décès modélisé à température constante par le terme $\mathbf{x}_t^\top \boldsymbol{\delta}$. Dans ce type de démarche qui consiste en l'application de pénalités sur des taux prospectifs, retravailler la composante température sur de tels taux s'avère délicat.

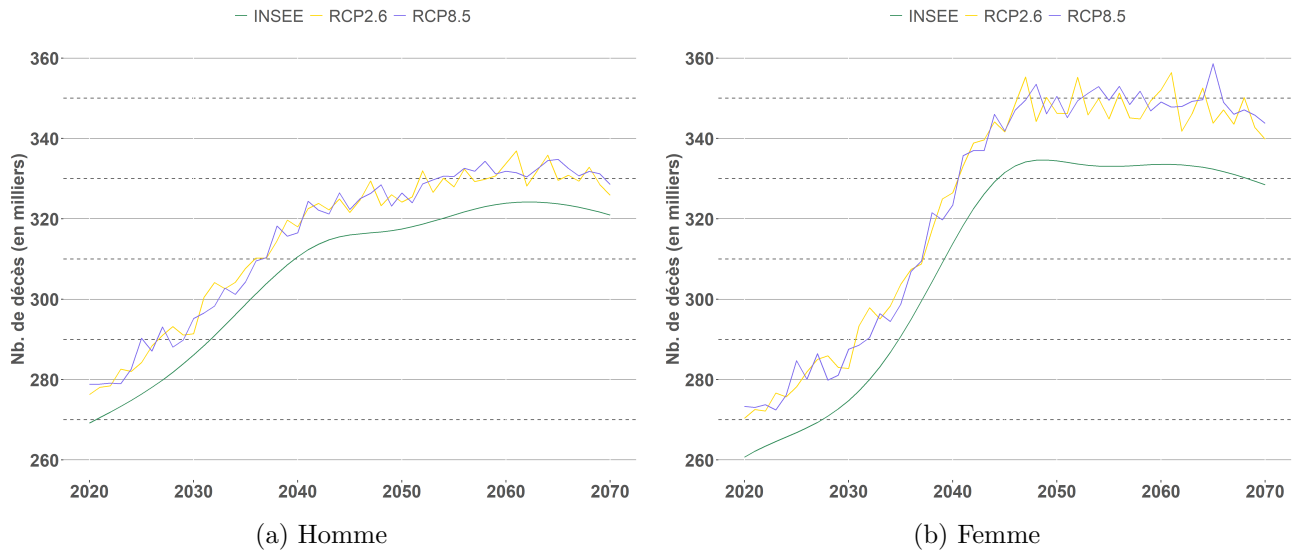


FIGURE 4.15 : Nombre de décès par année calibré avec prise en compte de l'année 2003, (projection sur l'été).

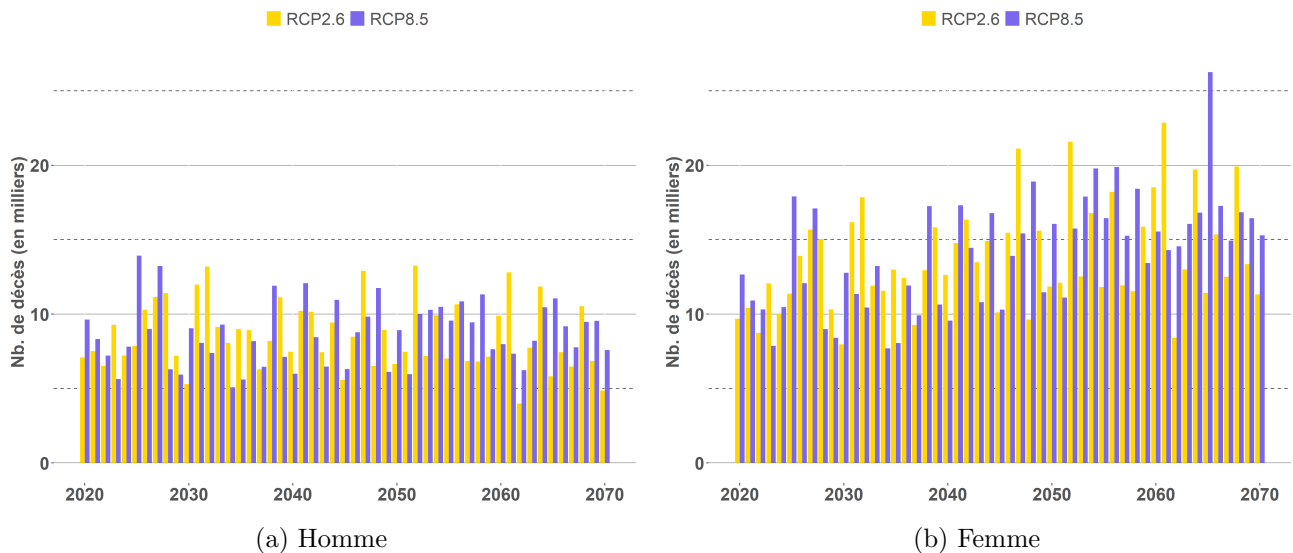


FIGURE 4.16 : Différence en nombre de décès par année entre le scénario central de l'INSEE et les deux trajectoires intégrant un facteur climatique, (projection sur l'été).

Le nombre de décès est un indicateur dépendant de la taille de la population, de l'âge moyen et de la répartition homme femmes. L'espérance de vie est de ce point de vue un indicateur plus précis. Après application des pénalités sur la tables prospectives on obtient les espérances de vie résiduelles sous stress climatique (Table 4.2). Elles sont comparées aux espérances de vie brutes telles qu'envisagées par l'INSEE à l'horizon 2070.

	Homme					Femme				
	INSEE	RCP2.6	RCP8.5	ecart26	ecart85	INSEE	RCP2.6	RCP8.5	ecart26	ecart85
2020	17.80	17.57	17.58	-0.23	-0.22	21.37	21.05	21.07	-0.32	-0.30
2030	19.15	18.93	18.95	-0.22	-0.20	22.22	21.90	21.90	-0.32	-0.32
2040	20.55	20.35	20.35	-0.20	-0.20	23.44	23.14	23.11	-0.30	-0.33
2050	21.66	21.49	21.46	-0.17	-0.20	24.33	24.05	23.98	-0.28	-0.35
2060	22.20	22.05	22.01	-0.15	-0.19	24.68	24.41	24.34	-0.27	-0.34
2070	22.30	22.15	22.10	-0.15	-0.20	24.74	24.47	24.40	-0.27	-0.34

TABLE 4.2 : Espérance de vie à 70 ans (projection sur l'été).

L'intégration d'un stress climatique, et ce peu importe le scénario envisagé, engendre des espérances de vie en 2020 en baisse de [0.22-0.23] ans chez les hommes et [0.3-0.32] chez les femmes. Cela provient du fait que les étés à venir devraient être chauds et régulièrement touchés par des épisodes de canicules. On observe une distinction entre les deux scénarios dès 2040. Le nombre d'années perdues chez les hommes comme chez les femmes diminue suite à l'amélioration du climat prévue à partir de 2050 pour le scénario 2.6. Ainsi l'espérance de vie serait en baisse de 0.15 année pour les hommes et 0.27 pour les femmes en 2070 quand en contrepartie celle-ci augmenterait de 4.5¹ années chez les hommes et 3.3² années chez les femmes tout autres causes confondues, depuis 2020. En revanche pour le scénario « business as usual » aucune amélioration n'est visible. Au contraire la situation se dégrade chez les femmes avec une perte de 0.34 année d'espérance de vie à 70 ans en 2070.

¹22.30 - 17.80

²24.74 - 21.37

4.3.4 Projection de l'impact « chaleur » sur les 92 jours d'été avec prise en compte de l'année 2003

La canicule historique de 2003 est la plus meurtrière qu'aït connu le pays avec plus de 15 000 décès. Prendre en compte cette vague de chaleur dans la calibration du modèle impacte grandement la relation chaleur-mortalité à travers la courbe des β . L'impact net lié au froid est inchangé mais celui lié au chaud est très fortement impacté et cette observation est d'autant plus visible chez les femmes (Figure 4.17).

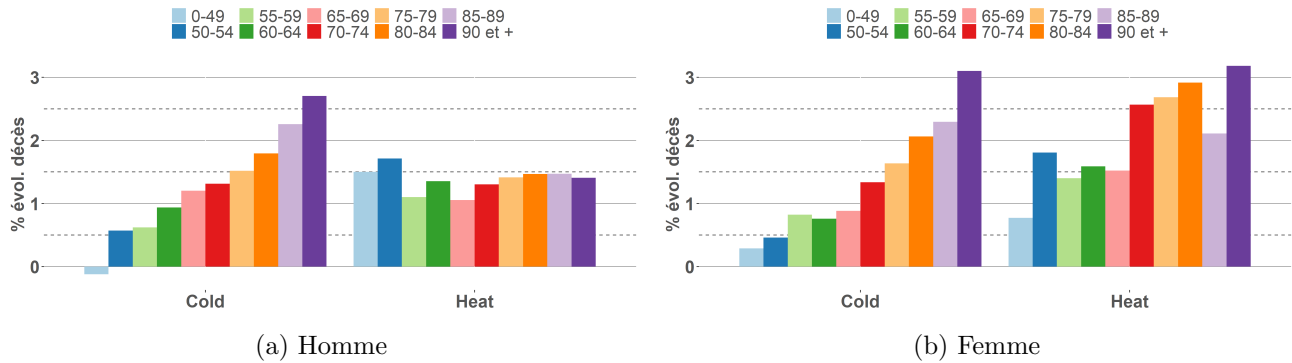


FIGURE 4.17 : Net impact en % d'évolution de la mortalité face au chaud et au froid pour les hommes et les femmes par tranches d'âge (calibration avec prise en compte de l'année 2003).

À partir de cette calibration les projections sur les deux scénarios du GIEC prévoient des facteurs d'impacts plus conséquents et plus variables (Figure 4.18). Alors que pour la modélisation de référence, les facteurs étaient en moyenne de [1.03-1.04] pour les hommes et de [1.035-1.05] pour les femmes, ils s'élèvent ici à [1.05-1.075] pour les hommes et [1.07-1.10] pour les femmes. Les variations sont également plus conséquentes : le pic de la canicule de 2065 atteint pour les femmes 1.17 contre 1.08 précédemment.

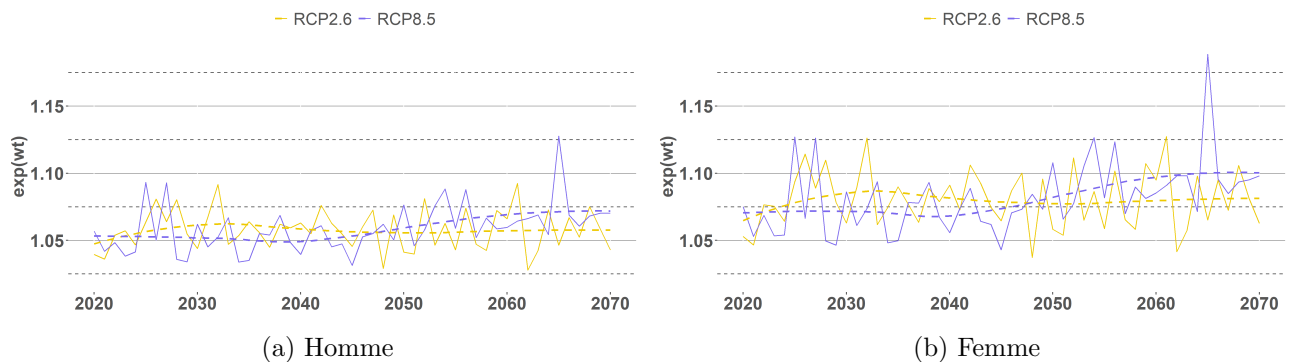


FIGURE 4.18 : Facteur e^{w_n} moyen pour le scénario RCP 8.5 et 2.6 entre 2020 et 2070 pour les hommes et les femmes (projection sur l'été et calibration avec prise en compte de l'année 2003).

L'espérance de vie à 70 ans entre ces deux calibrations est représentée en (Figure 4.19). En trait plein sont représentées les espérances de vie dans la calibration de référence (sans l'année 2003) et en pointillé la borne supérieure (calibration avec l'année 2003). En vert est représenté le scénario de référence, résultat des projections INSEE 2070. En jaune le scénario choqué sous le RCP 2.6 et en violet celui choqué sous la trajectoire RCP 8.5.

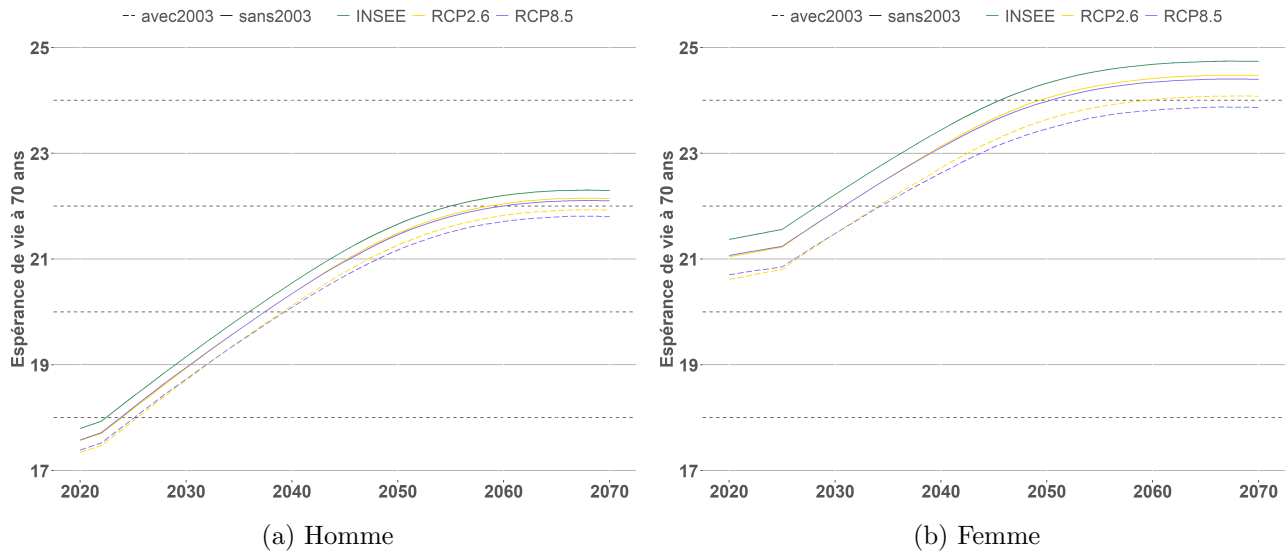


FIGURE 4.19 : Espérance de vie à 70 ans pour les hommes et les femmes (projection sur l’été et calibration avec prise en compte de l’année 2003).

4.3.5 Projection de l’impact « chaleur » sur les jours de canicule

Les précédentes projections calculaient pour chaque jour d’été (entre le 1er juin et le 31 août) un impact sur la mortalité lié à la température. Le facteur était ensuite annualisé pour l’associer aux taux de mortalité. Ce type de projection a pour inconvénient de surestimer le nombre de décès puisque le modèle va évaluer le nombre de décès en lien avec la température pour l’ajouter aux projections actuelles. Or les projections telles que celles de l’INSEE 2070 se basent sur les observations passées pour les extrapoler, et des décès liés aux températures ont toujours fait partie de l’histoire. Pour palier à ce souci de sur-évaluation et dans le cadre de cette étude qui s’intéresse aux impacts des canicules futures, on va utiliser les indicateurs définissant une vague de chaleur pour les identifier et calculer les décès associés à chaque vague.

On utilise la calibration du modèle de référence, c’est à dire une lag réponse de 45 jours, un seuil ψ de 18°C, une période d’observation entre 2000 et 2019 sans l’année 2003, le tout en distinguant les sexes et les tranches d’âges. Ainsi des facteurs de pénalité annuels sont calculés (Figure 4.20) en ne prenant en compte que les jours de canicule (trois jours glissants de température minimale au dessus de 18°C et maximale au dessus de 30°C).

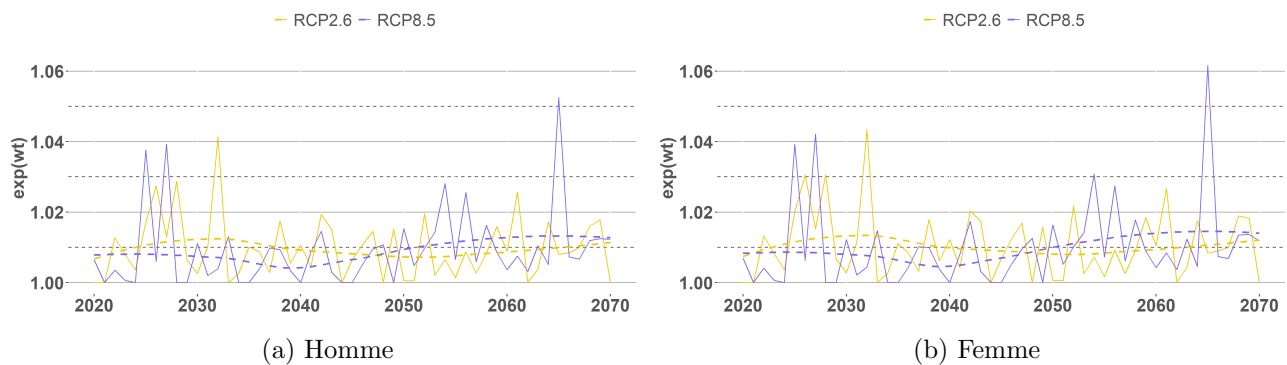


FIGURE 4.20 : Facteur e^{w_n} annuel moyen sur les canicules pour les hommes et les femmes.

On retrouve les pics tels que présentés dans les parties précédentes et résultant ici entièrement de l'intensité et de la durée de la vague de chaleur. Les deux canicules de 2025 et 2027 de la trajectoire extraite du scénario RCP 8.5 sont bien visibles. Avec une vague de plus de 40 jours l'année 2027 est la canicule la plus longue identifiée sur cette trajectoire. Celle de 2025 dure plus de 25 jours (plus de deux fois la durée de 2003). La trajectoire extraite du RCP 2.6 présente un grand nombre de canicules également, en particulier sur la période 2025-2035 avec 19 jours consécutifs d'alerte en 2032, et 2025, 20 jours en 2026 et 24 jours en 2032. La réelle différence entre ces deux scénarios n'est visible qu'après 2050 et d'autant plus après 2070 où les pires vagues de chaleurs sont attendues pour le RCP 8.5 (40 jours en 2097, 34 jours en 2098 et des températures beaucoup plus élevées avec une intensité de 25 en 2091, c'est à dire sur 3 jours glissants une température maximale de 42.5°C et minimale de 30.5°C en moyenne sur la France).

L'impact en matière de décès est attendu comme conséquent (même si l'ordre de grandeur reste largement inférieur par rapport aux précédentes projections). La Figure 4.21 présente le nombre de décès calculé à partir des tables INSEE 2070 (en vert). Cette même trajectoire est ensuite impactée par les canicules des deux scénarios du GIEC (en jaune pour le RCP 2.6 et en violet pour le RCP 8.5). On visualise ensuite en Figure 4.22 l'écart entre le nombre de décès du scénario central et les nombres de décès « choqués » pour les hommes et les femmes (cumulés).

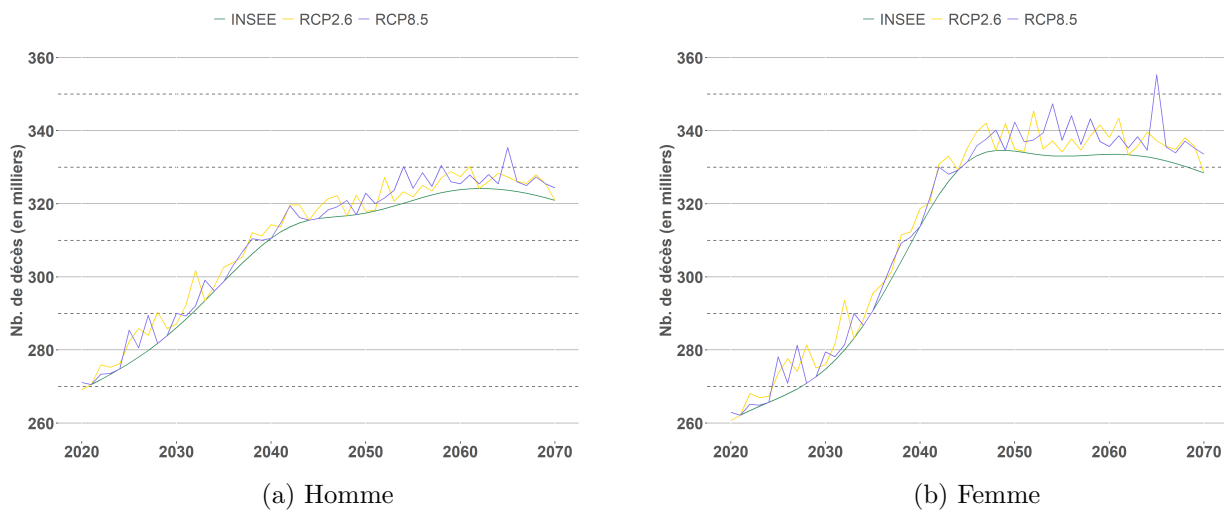


FIGURE 4.21 : Nombre de décès par année avec un impact uniquement lié aux canicules.

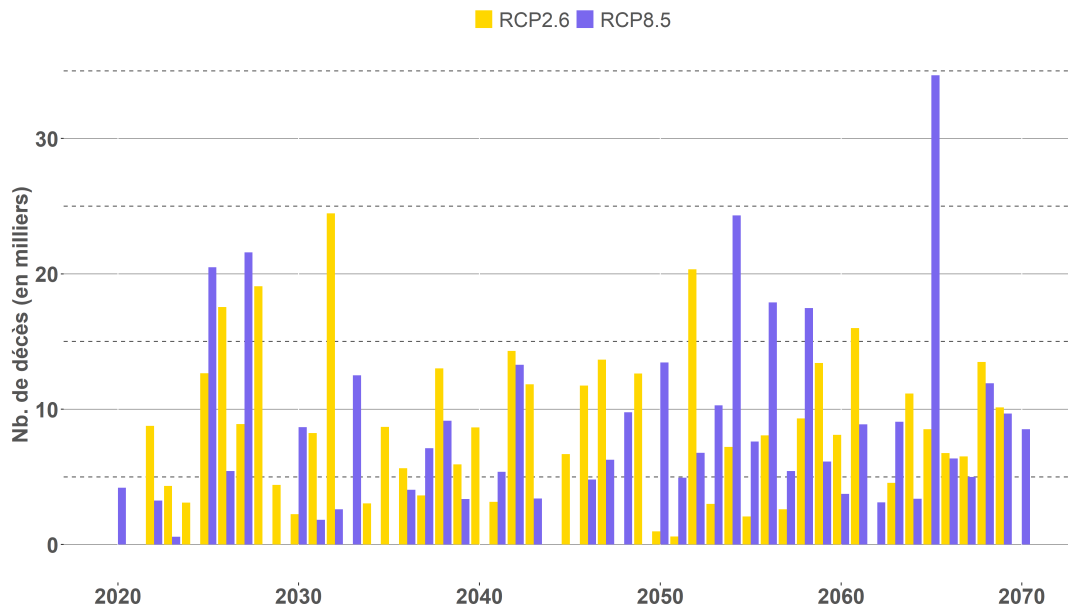


FIGURE 4.22 : Différence en nombre de décès par année entre le scénario central de l'INSEE et les deux trajectoires intégrant un facteur climatique lié uniquement aux canicules

En moyenne entre 2020 et 2070 les vagues de chaleur seraient responsables de 7 000 à 7 800 décès par an pour ces deux trajectoires. Cet ordre de grandeur est, pour les mêmes raisons que lors des précédentes projections, légèrement surestimé. D'autres travaux prévoient en Europe 27 000 décès¹ liés aux canicules sur la période 2011 - 2040 (WATKISS et al., 2009). On peut également citer les résultats de l'Organisation Mondiale de la Santé, elle estime le nombre de décès annuels liés aux vagues de chaleur en Europe de l'Ouest² à 6 261/an³ en 2030 et à 14 148/an⁴ en 2050 (OMS, 2014).

Dans ces projections, la part des femmes est plus importante avec 1 000 décès de plus que les hommes en moyenne. Le nombre de décès résultant du scénario RCP 2.6 est stable dans le temps. Sur la période 2020-2040, les décès liés aux températures sont estimés à 3 472 en moyenne par an chez les hommes et 4 211 chez les femmes ; après 2040, ils sont estimés à 3 145 décès chez les hommes et 4 416 chez les femmes. En revanche le nombre de décès attendus sur le scénario RCP 8.5 tend à croître dans le temps, il passe de 2 358 pour les hommes et 2 883 pour les femmes pour la période 2020-2040 à 3 550 pour les hommes et 5 167 pour les femmes après 2040. Des maxima lors des années caniculaires sont également atteints, notamment sur la troisième vague de chaleur de l'année 2065 (RCP 8.5) avec 18 760 décès et un total de 34 664 décès sur l'année entière. L'année 2032 (RCP 2.6) comptabilise 3 vagues, dont une de 16 jours avec 10 841 décès et une autre de 24 jours avec 12 765 décès. Ces chiffres peuvent sembler importants mais ils sont cohérents avec des durées de vagues de chaleur généralement supérieures à celles observées dans le passé. Le détail de décès en excès par vague de chaleur a été calculé pour chaque année (Figure 4.23). Toutes les informations relatives aux différentes vagues de chaleur sont disponibles (au complet en annexes A.4 - A.5, et un extrait des plus importantes vagues est présenté ci-dessous en Table 4.4). On peut ainsi voir pour chaque année le nombre de vagues, leurs durées, et leurs intensités. Certaines canicules durent plus d'un mois (en 2027 et 2065 sur le RCP 8.5), soit deux fois plus longtemps que la canicule de 2003. De même, les intensités sont toutes au-dessus de celle de 2003 qui était de 10.2. L'impact en nombre de décès est conséquent, en particulier lorsque les

¹La population française représente environ 15% de l'Union européenne : $27000 \times 15\% = 4050$ décès.

²France, Allemagne, Belgique, Espagne, Pays-Bas, Portugal, Grèce...

³[2 644-12 412]

⁴[8 942-25 840]

intensités sont élevées (une intensité de 10 correspond à 3 jours de température au dessus des seuils d’alerte de 10°C (seuil de nuit = 18°C et seuil de jour = 30°C). Il est également important de noter qu’en raisonnant en nombre de décès sur une large période d’observation il faut prendre en compte le fait que la population va augmenter et que sa structure d’âge va évoluer. La part des plus âgés au sein de la population sera beaucoup plus importante à l’avenir, il est donc normal d’observer un plus grand nombre de décès à l’horizon 2070.

Année	RCP	Num. vague	Durée (en jours)	Intensité	Nb. décès
2025	RCP2.6	1	19	12.1	12 659
2032	RCP2.6	2	23	14.2	12 765
2059	RCP2.6	2	16	9.7	11 237
2025	RCP8.5	4	25	11.6	13 080
2027	RCP8.5	1	41	16.4	21 078
2056	RCP8.5	2	26	12.3	15 306
2058	RCP8.5	4	11	15.4	13 052
2065	RCP8.5	3	32	18.1	18 760

TABLE 4.4 : Nombre de décès (supérieur à 11 000) par vague entre 2000 et 2070

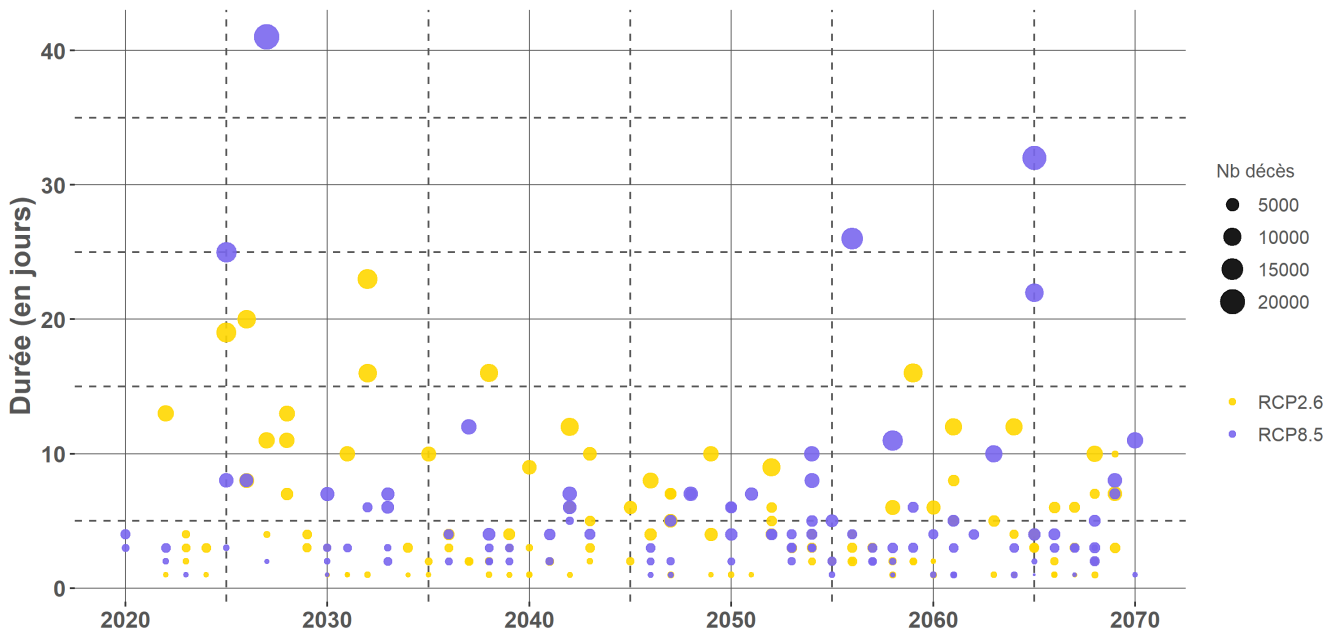


FIGURE 4.23 : Nombre de décès par vague de chaleur et par scénario RCP entre 2020 et 2070.

Au niveau de l'espérance de vie résiduelle cela représente au maximum 0.15 année de vie perdue (Table 4.6). En regardant l'espérance de vie à 70 ans, on peut voir que les hommes perdent moins que les femmes avec [0.06-0.11] année en moins contre [0.08-0.16]. La trajectoire extraite du scénario 8.5 est moins violente sur la période 2020-2050 que celle extraite du 2.6 ce qui explique un impact plus conséquent sur cette trajectoire. Mais alors que le nombre d'années de vie perdu diminue dans le temps sur le 2.6 (il passe de 17.70 années de vie à 70 ans en 2020 au lieu de 17.80 dans le scénario central à 22.23 années au lieu de 22.30 années chez les hommes, la perte n'est plus que de 0.05 année et de 0.09 année chez les femmes). Le scénario 8.5 détériore l'espérance de vie des hommes comme des femmes (la perte est doublée chez les femmes entre 2020 et 2070, elle passe de -0.08 à -0.16, et chez les hommes elle passe de -0.07 à -0.11).

	Homme					Femme				
	INSEE	RCP2.6	RCP8.5	ecart26	ecart85	INSEE	RCP2.6	RCP8.5	ecart26	ecart85
2020	17.80	17.70	17.73	-0.10	-0.07	21.37	21.26	21.29	-0.11	-0.08
2030	19.15	19.07	19.09	-0.08	-0.06	22.22	22.12	22.13	-0.10	-0.09
2040	20.55	20.48	20.47	-0.07	-0.08	23.44	23.34	23.32	-0.10	-0.12
2050	21.66	21.59	21.57	-0.07	-0.09	24.33	24.24	24.18	-0.09	-0.15
2060	22.20	22.14	22.11	-0.06	-0.09	24.68	24.59	24.53	-0.09	-0.15
2070	22.30	22.23	22.19	-0.07	-0.11	24.74	24.65	24.58	-0.09	-0.16

TABLE 4.6 : Espérance de vie à 70 ans avec l'impact des canicules par scénario.

4.3.6 Confrontation des résultats avec Fall (2021)

Très peu de travaux actuariels étudient le lien entre température et mortalité. Un mémoire a été publié en 2021 sur ce sujet (FALL, 2021). La démarche employée s'avère très différente de celle présentée ici. L'impact lié aux températures est directement intégré dans un modèle de mortalité, il s'agit d'une extension du modèle de Lee-Carter (CARTER, 1992) adapté pour prendre en compte de nouveaux facteurs liés aux températures :

$$\begin{aligned} \ln(\mu_{x,t}) = & \alpha_x + \mathbf{k}_t^{(1)} + (\bar{x} - \mathbf{x})\mathbf{k}_t^{(2)} + (\bar{x} - \mathbf{x})^+\mathbf{k}_t^{(3)} \\ & + \left[\mathbf{c}_{x(T^\circ\text{chaudes})} (\mathbf{x} - \mathbf{a}_{T^\circ\text{chaudes}})^+ \right]^2 \\ & + \left[\mathbf{c}_{x(T^\circ\text{froides})} (\mathbf{x} - \mathbf{a}_{T^\circ\text{froides}})^+ \right]^2 \mathbf{k}_t^{(4)} \mathbf{I}_t \theta + \gamma_{t-x} + \varepsilon_{x,t}, \end{aligned} \quad (4.5)$$

avec,

- $\mu_{\mathbf{x},t}$: la force de mortalité de l'âge x en année t ,
- α_x : le coefficient propre à l'âge,
- \mathbf{k}_t : les coefficients tendanciels en particulier $\mathbf{k}_t^{(4)}$ est le processus stochastique qui caractérise l'indice temporel d'évolution de la mortalité dans l'espace-temps et qui varie selon l'évolution de la température,
- $\mathbf{a}_{T^\circ\text{chaudes}}$: âge à partir duquel on peut considérer un impact des températures pour le chaud,
- $\mathbf{a}_{T^\circ\text{froides}}$: âge à partir duquel on peut considérer un impact des températures pour le froid,
- $\mathbf{c}_{x(T^\circ\text{chaudes})}$: coefficient de corrélation entre l'évolution des températures maximales et mortalité,
- $\mathbf{c}_{x(T^\circ\text{froides})}$: coefficient de corrélation entre l'évolution des températures maximales et mortalité,
- \mathbf{I}_t : un paramètre qui modélise la chronique d'évolution de la température moyenne,
- θ : le poids des causes de décès propres au changement climatique (coup de chaleur, déshydratation, hyperthermie...) au regard de l'ensemble des autres causes de décès capturées par le modèle.

Des projections sont réalisées sur différents scénarios de températures (+0.8°C, +1.1°C, et +1.3°C) jusqu'en 2038. Elles se traduisent par un excédent de mortalité de l'ordre de 0.0009% à 0.0037% pour les hommes de 75 ans et de 0.0005% à 0.0026% pour les femmes de 75 ans. En supposant l'exposition de la population française constante au niveau de 2017 cela représente entre 158 et 659 décès par an chez les hommes et entre 168 et 947 décès chez les femmes à l'horizon 2038, soit tous sexes confondus entre 326 et 1 606 décès par an.

En ajustant les taux de décès à un portefeuille d'assurance retraite avec une population ayant un âge moyen de 70 ans cela se traduirait, d'après ces travaux, par une perte de 0.8 année d'espérance de vie sur les 10 prochaines années et plus de 2 ans de perte sur les 20 prochaines années.

Ces résultats sont largement inférieurs par rapport aux 7 000 à 7 500 décès annuels évalués ici. FALL (2021) limite ses résultats et précise qu'ils sont potentiellement sous-estimés, notamment à cause de l'exposition supposée constante à l'année 2017. Par ailleurs l'estimation des paramètres se fait sur la période 1950-2017 (annuellement), quand ici seules les années récentes (2000 à 2019) sont observées. De plus, les périodes et scénarios de projection sont différents, une trajectoire d'augmentation des

températures moyennes pour ces travaux contre des projections de températures journalières permettant d'évaluer un impact uniquement sur les jours de canicules. Enfin, seule la part de décès liée à la chaleur est évaluée de notre côté. En utilisant une trajectoire climatique similaire les conclusions obtenues avec un modèle de type CSDL seraient nettement différentes. Pour mieux imaginer ces propos, une nouvelle projection simplifiée est réalisée à partir des trajectoires d'augmentation de température moyenne. On calibre un modèle CSDL sans distinction de sexe et d'âge, sur les années 2000-2014 et on le projette sur les années 2015-2019 en impactant les températures moyennes par $+0.8^{\circ}\text{C}$, $+1.1^{\circ}\text{C}$ et $+1.3^{\circ}\text{C}$. On visualise les résultats en % de décès en écart par rapport à la projection de référence ($+0^{\circ}\text{C}$) (Figure 4.24). Une augmentation des températures moyennes réduirait le nombre de décès liés aux températures de 1% ($+0.8^{\circ}\text{C}$) à 2% ($+1.3^{\circ}\text{C}$) pour presque l'ensemble des mois de l'année autres que l'été ou ceux-ci serait légèrement supérieurs par rapport à la projection de référence de $+0.5\%$ au maximum.

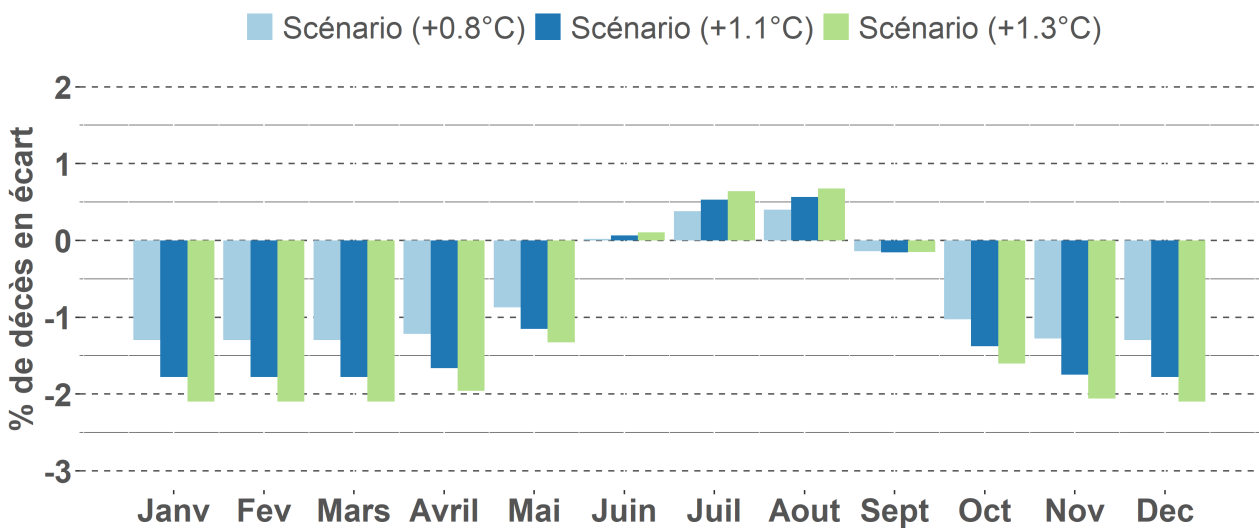


FIGURE 4.24 : % d'écart de décès en différence par rapport à la projection de référence ($+0^{\circ}\text{C}$) en moyenne sur les années 2015-2019.

Le modèle proposé par FALL (2021) pourrait être adapté en utilisant $c_{x(T^{\circ}\text{chaudes})}$ comme coefficient de corrélation entre la mortalité et l'évolution des températures chaudes (au-dessus d'un seuil par exemple) plutôt que des températures maximales, de même pour $c_{x(T^{\circ}\text{froid})}$. Cela permet d'avoir un coefficient de corrélation entre la mortalité et les températures basses qui est négatif et un autre coefficient pour les températures élevées qui est plus important en valeur absolue et positif.

4.3.7 Limites de l'étude

Ces résultats sont à prendre avec précaution. Les chocs applicables aux tables de mortalité prospectives sont sensibles à de nombreux paramètres (lag-réponse, années d'observation, seuil ψ). Le modèle CSDL tente de rendre compte des effets de structure d'âge et de dérive de la mortalité dans un premier terme $\mathbf{x}_t^\top \boldsymbol{\delta}$ à partir d'un GAM Poisson avec les variables : année, mois, et jour de la semaine, il est clair que cela ne suffit pas à reproduire avec exactitude la dynamique de survenance des décès. Typiquement les périodes d'épidémie de grippe ne sont pas prises en compte et cette information pourrait être ajoutée dans la liste des variables explicatives.

La période de calibration influe aussi très largement sur les réponses obtenues grâce au modèle. Idéalement il faudrait se concentrer sur les années les plus récentes qui reflète au mieux les conséquences des températures sur des taux de décès. Mais cela poserait le problème de la quantité de données disponibles pour la calibration. De plus, d'un point de vue climatique le passé n'est pas extrapolable et assez peu d'épisodes de canicule ont eu lieu en France (à peine une dizaine de plus de 5 jours depuis les années 2000). Beaucoup d'incertitudes résident encore sur la réaction de la population face à des canicules durables et intenses.

Les projections réalisées sont légèrement surestimées puisque lors des tests de qualité de prédictions du modèle sur la période 2015-2019, les décès estimés en été étaient supérieurs aux décès réellement observés de 2.33%. Cette erreur a pu être atténuée en réduisant la période d'observation, elle était initialement de 3.7%.

Une incertitude provient de l'utilisation d'une unique trajectoire de températures par scénario. Le portail DRIAS ne donnant pas accès pour un même modèle climatique à différentes trajectoires, il n'est pas possible d'évaluer avec une plus grande précision les risques d'apparitions des vagues de chaleur à l'avenir. Les projections réalisées ici dépendent largement des trajectoires empruntées pour chacun des deux scénarios. Il faudrait soit avoir accès à un plus grand nombre de sorties de ce modèle climatique, soit avoir des probabilités d'occurrence et d'intensité des vagues de chaleur par année. Il pourrait aussi être intéressant d'évaluer les impacts liés aux canicules simulées par d'autres modèles climatiques.

Enfin, l'amélioration de la technologie par le développement de l'air conditionnée ou l'éducation et l'aide aux populations avec des plans d'alerte comme le PNC participent à réduire l'impact des températures estivales sur le nombre de décès observés. Dans ces projections l'acclimatation des populations est supposée constante dans le temps or des études attestent d'une augmentation de l'optimum thermique en France (TODD et VALLERON, 2015). Cette nouvelle variable est parfois prise en compte dans certains travaux, différentes trajectoires en fonction de l'adaptation des populations sont présentées (OMS, 2014).

4.4 Perspectives en assurance

4.4.1 Exercice pilote climatique de l'ACPR

La responsabilité de l'Homme et des ses activités quant à leur impact sur le climat est désormais connue et acceptée. Ces répercussions s'annoncent dramatiques, tant humainement qu'économiquement. Pour le monde assurantiel, ces questions ont déjà fait l'objet de nombreux travaux, principalement en non-vie avec le risque catastrophe (tempêtes, grêles, inondations, sécheresses. . .) et son impact financier, mais peu en assurance vie concernant l'impact sur les personnes. En 2020, l'ACPR a lancé un exercice pilote climatique pour les établissements bancaires et d'assurances français. Après une session d'échange et revue des hypothèses avec les entités concernées, la version finale de l'exercice a été publiée en

juillet 2020, ACPR (2020). Les premiers résultats étaient attendus pour avril 2021. L'objectif de cet exercice, qui est actuellement facultatif, est de sensibiliser les acteurs économiques à leurs expositions climatiques et d'anticiper les impacts à long terme sur leur bilan. Les scénarios utilisés sont ceux du NGFS (Network for Greening the Financial System) à partir desquels ont été construites des projections macroéconomiques (prix de matières premières, évolution du PIB, taux de chômage, courbe des taux, etc.) à horizon 2050 avec un pas de temps de 5 ans. Pour les modélisations climatiques, les projections du GIEC sont utilisées.

4.4.2 Les scénarios du NFGS

Le NFGS (2020) a envisagé 4 scénarios de référence (ainsi que plusieurs scénarios alternatifs) pour encadrer les analyses et recherches en matière de risques climatiques par les banques centrales, les autorités de contrôle et autres institutions financières européennes. Ces scénarios sont articulés en fonction de l'atteinte ou non des objectifs climatiques et des trajectoires pour y parvenir.

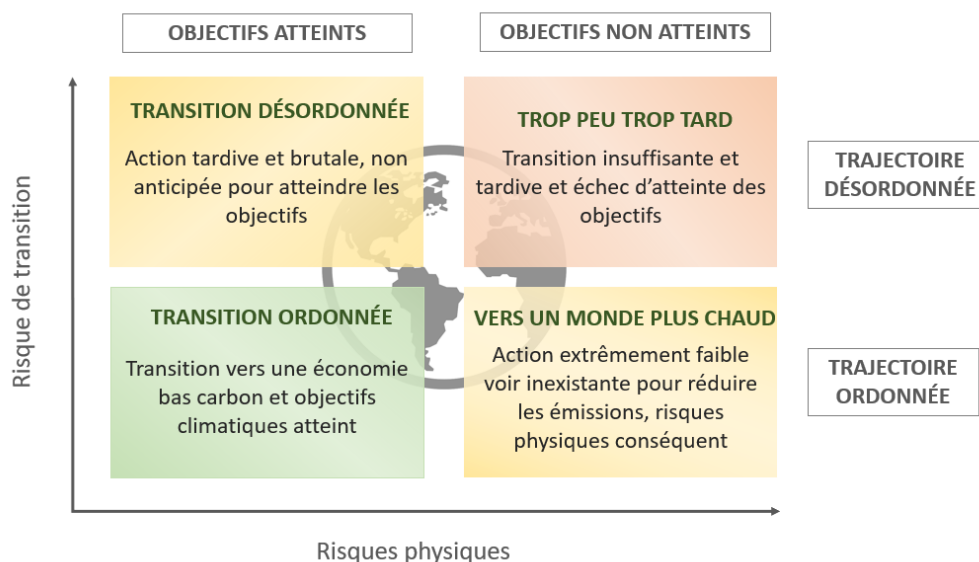


FIGURE 4.25 : Scénarios envisagés par le NFGS

Le mapping suppose 3 trajectoires :

- Ordonnée : les politiques climatiques sont rapidement mises en place et très efficaces. Avant 2070, le point de Zéro CO₂ net est atteint, et le réchauffement climatique reste inférieur à 2°C. Le risque de transition et le risque physique sont modérés.
- Désordonnée : les politiques climatiques ne sont pas introduites avant 2030, avec une efficacité retardée par des nouvelles technologies qui peinent à émerger. Les réductions d'émission sont tardives mais efficaces et brutales, ce qui implique un risque de transition important.
- « Hot house world » : uniquement les politiques climatiques actuellement en vigueur sont conservées, les émissions continuent d'augmenter jusqu'à 2080. Une hausse de 3°C est irréversible et implique des changements majeurs comme la hausse du niveau des océans. Le risque physique est alors prédominant.

L'ACPR pour son exercice pilote retient 3 des 4 scénarios de référence du NFGS : transition ordonnée, désordonnée et « vers un monde plus chaud » qui correspond à un scénario « business as usual ».

4.4.3 Le risque de transition

Le risque de transition mesure les tendances comportementales des agents économiques face à une situation donnée (politique climatique drastique, progrès technologiques), affectant notamment les prix des actifs financiers. Il dépend fortement des trajectoires (ordonnées/désordonnées) prises par les institutions politiques en matière climatique. Il résulte également des adaptations nécessaires à réaliser par chaque secteur d'activité pour correspondre aux nouvelles normes ou nouveau climat (agriculture, énergie, etc.).

4.4.4 Le risque physique

Le risque physique mesure le lien entre le changement climatique et son impact sur les personnes (pandémies, canicules, maladies chroniques, etc.) ou sur les biens (dommages pour cause d'inondations, sécheresses, tempêtes, etc.). Il peut être divisé en deux sous-familles de la façon suivante :

- **les risques chroniques** liés à une aggravation constante d'un indicateur. Par exemple l'augmentation des températures, la montée des océans ou encore les concentrations de particules fines et polluants atmosphériques qui à l'horizon 2041-2050 ont des impacts sur les décès +0.03%, frais de soin +1.65%, et arrêts de travail +0.13% (AON, 2020).
- **Le risque d'occurrence et sévérité** des catastrophes météorologiques, engendrant des dégâts matériels et humains, et parfois une rupture des activités économiques. L'exercice pilote mesure uniquement ce dernier risque sur le scénario RCP 8.5 du GIEC.

4.4.5 Autres perspectives en assurance : l'impact monétaires des effets sanitaires des canicules

Historiquement, les canicules ont fait l'objet de nombreuses études et recherches en matière d'impact sanitaire (mortalité principalement) mais très peu évaluent les effets sous un angle économique. Une récente publication évalue ces impacts en France entre 2015 et 2020 (ADÉLAÏDE et al., 2021). Les impacts sanitaires des vagues de chaleur peuvent être monétarisés en prenant en compte différentes conséquences des canicules :

- Les recours aux soins (passages aux urgences, avec et sans hospitalisation, consultations SOS Médecins). À titre indicatif voici quelques valeurs retenues pour l'évaluation des coûts des frais de soins, à savoir que les estimations sont basées sur les maladies les plus fréquemment observées face aux vagues de chaleur : - passage aux urgences sans hospitalisation (151€); - passage aux urgences avec hospitalisation (3 866€); - Consultations SOS médecin (48€).

- L'excès de mortalité qui peut être évalué à travers la monétarisation d'une vie humaine ou le coût du nombre d'années de vie perdu. L'évaluation économique de la vie est un domaine sensible d'un point de vue éthique, en France la VVS (Valeur d'une vie statistique) telle que recommandée par l'évaluation socioéconomique des dépenses publiques est estimée à 3.17 millions d'euros en 2017 (CGSP, 2013).

- La perte de bien-être est estimée à 43€ par journée d'activité restreinte (alerte rouge du PNC). Il s'agit des effets liés aux symptômes aux très fortes chaleurs (fatigue, crampe, baisse de l'attention...). De telles alertes conduisent à des recommandations telles que le télétravail, réduire les activités physiques, les déplacements extérieurs, voir l'annulation d'événements.

Ainsi, en fonction des méthodes et des évaluations budgétaires retenues, le coût des vagues de chaleur entre 2015 et 2020 est évalué entre 22 et 37 milliards d'euros dont la majeure partie découle des décès en excès (16 milliards d'euros si le coût est exprimé en nombre d'années de vie perdu contre 30 milliards avec la valorisation VVS). L'impact financier des journées à activités restreintes est lui évalué à 6 milliards d'euros bien que le déclenchement de l'alerte rouge canicule ne soit intervenu que sur 2 années (2019 et 2020). Cette évaluation est conséquente à cause notamment de l'exposition importante de la population (2 jours d'alerte rouge en 2019 avec 27 millions de personnes concernées et 4-5 jours en 2020 avec 20 millions de personnes).

L'impact des vagues de chaleur sur l'économie est réel et présente de nouvelles problématiques qui n'étaient jusque-là que très peu prise en compte.

Conclusion

Le climat et les saisons rythment la survenance des décès sur l'année. La température et la mortalité sont deux variables étroitement liées avec une relation en forme de «U» ou de «V». Face à une augmentation des températures en été, le nombre de décès croît alors qu'en hiver ces deux variables évoluent en sens inverse. Ce lien est reproduit dans un modèle généralisé additif à contraintes et retard (CSDL). Il reproduit d'une part le lien chaud-mortalité et d'autre part le lien froid-mortalité. L'impact total lié au climat n'est visible qu'après plusieurs jours. Les effets liés aux températures estivales sont quasi-immédiats, mais présentent, notamment chez les plus âgés, un rattrapage appelé effet moisson. En hiver, les effets sont plus tardifs et se caractérisent généralement par l'apparition de maladies (pulmonaires ou cardiovasculaires) entraînant des décès plusieurs jours après l'exposition. C'est pourquoi le modèle utilisé pour reproduire l'impact des températures sur la mortalité prend en compte les effets retardés (lag-réponse).

La survenance de canicules est la première cause de mortalité liée au climat dans le monde. Sur la dernière décennie elles sont devenues beaucoup plus fréquentes, durent plus longtemps et enregistrent des températures toujours plus élevées. Ces phénomènes extrêmes ne sont pas sans impact sur la population. Face à de tels épisodes, les conséquences sont nombreuses : passages aux urgences, hospitalisations, et décès. Les projections climatiques telles qu'évaluées par le GIEC ne prévoient pas d'amélioration en ce sens jusqu'en 2050 même dans les scénarios les plus optimistes.

Le portail DRIAS met à disposition les projections climatiques réalisées dans les laboratoires français (CNRM, CERFACS et IPSL). Sur les données climatiques issues des scénarios RCP 8.5 (pessimiste) et 2.6 (optimiste) les vagues de chaleur s'avèrent de plus en plus fréquentes et intenses jusqu'en 2050 pour les deux scénarios. Après 2050, les trajectoires divergent, les vagues de chaleur sont renforcées sur le 8.5 et plus éparpillées sur le 2.6.

Avec le modèle CSDL faisant lien entre température et mortalité, et en identifiant les périodes caniculaires d'après la définition donnée par Météo France, on en déduit l'impact sur la mortalité prospective associée aux canicules à l'horizon 2070. Entre 2020 et 2070, il y aurait entre 7 000 et 7 800 décès par an liés aux températures. Ce nombre passerait à plus de 8 700 décès par an en moyenne après 2040 sur le pire scénario. En termes d'espérance de vie, la perte est évaluée à moins d'un dixième d'année en 2020 à 70 ans. Cette perte s'atténue pour le scénario 2.6, mais passerait à 0.16 années chez les femmes et 0.11 pour les hommes en 2070 sur le scénario 8.5.

Ces résultats dépendent fortement des trajectoires climatiques simulées par le modèle climatique sélectionné. Pour obtenir des résultats plus fiables, il faudrait avoir une estimation probabiliste (avoir à disposition un échantillon complet et représentatif de différentes trajectoires en sortie du modèle climatique choisi). Sur la base de tels scénarios, il demeure une incertitude provenant de la méthode utilisée pour déterminer, en réponse, le nombre de décès supplémentaires attendu. La période d'étude est également déterminante dans la réponse obtenue, elle doit être assez récente

pour correspondre aux effets actuels des températures sur la mortalité mais assez conséquentes pour avoir un spectre d'observation suffisant. Le faible historique d'épisodes caniculaires intenses en France est une limite importante dans la calibration d'une réponse face aux vagues de chaleur à la fois sévères et durables. De plus, l'acclimatation n'est ici pas prise en compte. Celle-ci résulte d'une part du progrès technologique : la population est de plus en plus protégée avec des habitations mieux isolées ou disposant de climatisation. D'autre part, l'acclimatation induite par des mécanismes physiologiques pourrait également atténuer les pertes engendrées par les canicules.

Le risque de mortalité et l'élaboration de tables prospectives précises sont des problématiques centrales en actuariat. La modélisation de la mortalité permet aux assureurs d'évaluer leurs engagements futurs (produits de d'assurance-vie, de prévoyance, de retraite, etc.). Le changement climatique pourrait avoir des répercussions notables sur les projections de mortalité actuelles. Un premier éclairage est donné par ce mémoire mais des approfondissements sont nécessaires devant ce problème complexe. La prise en compte d'une composante climat pour l'étude du risque de mortalité semble justifié. Le risque issu des canicules concerne d'une part une surmortalité associée et d'autre part une augmentation des recours aux soins (passages aux urgences, hospitalisations, consultations médicales, etc.). Ces répercussions ne sont par ailleurs pas sans frais. Le coût des canicules est estimé entre 22 et 37 milliards d'euros pour les années comprises entre 2015 et 2020 (ADÉLAÏDE et al., 2021). Ces répercussions auraient des impacts sur les frais de soins et les arrêts de travail. À ce jour, ces frais exceptionnels ne sont pas pris en compte par les instituts de prévoyance et les mutuelles. Il s'agit de nouveaux axes de réflexion qui nécessiteraient d'être plus précisément quantifiés.

Bibliographie

- ACPR (2020). Scénarios et hypothèses principales de l'exercice pilote climatique. Rapp. tech. 4, place de Budapest, 75436 Paris Cedex 09 : Autorité de Contrôle Prudentiel et de Résolution, Direction d'études et d'analyse des risques – 66-2770.
- ADÉLAÏDE, L., CHANEL, O. et PASCAL, M. (2021). Évaluation monétaire des effets sanitaires des canicules en France métropolitaine entre 2015 et 2020. *Bulletin Épidémiologique Hebdomadaire*.
- AON (2020). Conséquences du changement climatique sur la pollution de l'air et impact en assurance de personnes. Rapp. tech. Y. Drif, P. Messina et P. Valade.
- BENMARHIA, T. et BEAUDEAU, P. (2018). Les villes et la canicule : se préparer au futur et prévenir les effets sanitaires des îlots de chaleur urbains. *Santé Publique France*.
- BESANCENOT, J.-P. (2000). La mortalité selon le contexte thermique. Réalité présente et scénarios pour le XXIème siècle. Le cas de la France. Rapp. tech. Convention Medias n°9/00. Université de Bourgogne : programme "Gestion et Impacts du Changement Climatique" (GICC), (2ème tranche).
- BROUHNS, N., DENUIT, M. et VERMUNT, J. (2002). A Poisson log-bilinear regression approach to the construction of projected lifetables. *Insurance: Mathematics and Economics* 31.
- CARTER, L. (1992). Modelling and forecasting the time series of US mortality. *Journal of the American Statistical Association*, 659–671.
- CCR (2018). Conséquences du changement climatique sur le coût des catastrophes naturelles en France à horizon 2050 - version complète. URL : <https://www.ccr.fr/-/etudeclimatique2018versionlongue>.
- CGSP (2013). Commissariat général à la stratégie et à la prospective. Rapport de mission présidée par Quinet E. L'évaluation socioéconomique des investissements publics. Rapp. tech. Commissariat général à la stratégie prospective.
- CHOLEZ, L.-A. (2021). Les famines liées au changement climatique se multiplient dans le monde. *Reporterre*.
- CLIMATE DATA RECORD (CDR) PROGRAM (2018). Climate Algorithm Theoretical Basis Document (C-ATBD), Global Historical Climatology Network-Monthly (GHCN-M) Mean Temperature - Version 4. Rapp. tech. Global Historical Climatology Network.
- COLETTE, A., SCHUCHT, S., BESSAGNET, B. et SZOPA, S. (2013). Evaluation des Stratégies de lutte contre la pollution de l'AIR à longue distance dans le contexte du changement climatique. Rapp. tech. INERIS.
- D. GUHA-SAPIR (s. d.). EM-DAT, CRED. URL : www.emdat.be.
- DRIAS (2020). Projet DRIAS. Données corrigées DRIAS-2020. URL : <http://www.drias-climat.fr/>.
- DUFRESNE, J.-L., FOUJOLS, M.-A., DENVIL, S., CAUBEL, A., MARTI, O. et AUMONT, O. (2010). Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5. Rapp. tech. Institut Pierre Simon Laplace.
- E. LE ROY LADURIE ET D. ROUSSEAU (fév. 2009). Impact du climat sur la mortalité en France, de 1680 à l'époque actuelle. *La Météorologie* n°64, p. 43-53.
- EILERS, P. et MARX, B. (1996). Flexible Smoothing with B-splines and Penalties. *Statistical Science* 11.n°2.

- EIOPA (juill. 2019). Discussion Paper on Methodological principles of insurance stress testing. Rapp. tech. EIOPA.
- EIOPA (juin 2020). 2nd Discussion Paper on Methodological principles of insurance stress testing. Rapp. tech. EIOPA.
- FALL, P. C. (2021). Intégration de facteurs liés à la température dans la modélisation du risque de mortalité, p. 90. Mém. de mast. IRM, Institut du risk management.
- FAO, FIDA, UNICEF, PAM et OMS (2020). Résumé de L'État de la sécurité alimentaire et de la nutrition dans le monde 2020. Transformer les systèmes alimentaires pour une alimentation saine et abordable.
- FILLEUL, L., CASSADOU, S., MÉDINA, S. et AL. (sept. 2006). The Relation Between Temperature, Ozone, and Mortality in Nine French Cities During the Heat Wave of 2003. *Environmental Health Perspectives* Vol. 114.n°9.
- FOLKERTS, M. A., BRÖDE, P., BOTZEN, W. J., MARTINIUS, M. L., GERRETT, N., HARMSSENS, C. N. et DAANEN, H. A. M. (mars 2020). Long Term Adaptation to Heat Stress: Shifts in the Minimum Mortality Temperature in the Netherlands. Rapp. tech. *Frontiers in Physiology*.
- FRANCK C. CURRIERO AND AL. (2002). Temperature and Mortality in 11 Cities of the Eastern United States. *American Journal of Epidemiology* Vol. 155.n°1, p. 80-87.
- GIEC (2014). Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer]. Rapp. tech. 161 p. Genève, Suisse.
- GIEC (2021). Groupe de travail I : Climate Change 2021: the Physical Science Basis. Rapp. tech. Genève, Suisse.
- GIRON, S., FOURNET, N., FRANKE, F. et BROTTET, E. (2020). Bilan de la surveillance des arboviroses en 2019 : transition vers une surveillance des cas confirmés de Chikungunya, dengue et d'infection à virus Zika en France métropolitaine. *Santé Publique France*.
- GIS (2014). Changement climatique et santé, Actes de la conférence internationale, Paris-Meudon, 2 et 3 octobre 2014. Rapp. tech. p. 16-18. GIS Climat-Environnement-Société, Groupe d'Intérêt Scientifique.
- GRIGNON-MASSÉ, L. et BINET, G. (2020). La climatisation des logements résidentiels : laisser faire ou encadrer intelligemment ? *Equilibre des énergies*.
- HÉMON, D. et JOUGLA, E. (2004). Surmortalité liée à la canicule d'août 2003 : suivi de la mortalité (21 août - 31 décembre 2003), causes médicales des décès (1 - 20 août 2003). 76 p., tableaux, graphiques, cartes. fihal-01571621f. Rapp. tech. Institut national de la santé et de la recherche médicale (INSERM).
- HYNDMA, R., ATHANASOPOULOS, G., BERGMEIR, C. et CACERES, G. (2021). forecast: Forecasting Functions for Time Series and Linear Models. URL : <http://CRAN.R-project.org/package=forecast>.
- INRS (2021). Dossier : Travail à la chaleur - page 8. Rapp. tech. Institut National de Recherche et de Sécurité.
- INSEE (nov. 2016). Projections de population à l'horizon 2070. Deux fois plus de personnes de 75 ans ou plus qu'en 2013. *INSEE Première* 1619.
- INSEE (2020). 3.6 Espérance de vie - Mortalité. *Tableaux de l'économie française*, p. 30.
- INSEE (2021). Démographie - Taux de mortalité mensuel, annualisé (décès pour 1000 habitants) - France métropolitaine. URL : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/000436395>.
- INSTITUT DE VEILLE ET DE SÉCURITÉ SANITAIRE (2018). Guide d'instruction Grand Froid 2018-2019. Rapp. tech. Ministère des solidarités et de la santé.
- INVS (2003). Impact sanitaire de la vague de chaleur d'août 2003 en France. Rapp. tech. Institut de veille sanitaire.

- INVS (2004). Froid et santé : Eléments de synthèse bibliographique et perspectives. Rapp. tech. Institut de veille sanitaire.
- INVS (2014). Monoxyde de carbone : Analyse des perceptions, connaissances, et comportements des référents de ménages intoxiqués durant la saison de chauffe 2013-2014. Rapp. tech. Institut de Veille Sanitaire.
- INVS (2015). Bilan au 15 septembre 2015 des épisodes de canicules survenus à l'été 2015. Rapp. tech. Insitut de veille Sanitaire.
- IPCC (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Chap1. Rapp. tech. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IRDR (2014). Peril Classification and Hazard Glossary, DATA Project Report No. 1. Rapp. tech. Integrated Research on Disaster Risk.
- KEATING, W. R., DONALDSON, G. C., CORDIOLI, E., MARTINELLI, M, KUNST, A. E., MACKENBACH, J., NAYHA, S et VUORI, I (2000). Heat related mortality in warm and cold reions of Europe: observational study. *BMJ* 321.
- LAAIDI K. (2012). Rôle des îlots de chaleur urbains dans la surmortalité observée pendant les vagues de chaleur. Rapp. tech. Institut de veille sanitaire.
- LACRESSONNIÈRE, G. (2012). Etude par modélisation numérique de la qualité de l'air en Europe dans les climats actuel et futur. Thèse de doct. Toulouse INPT, École doctorale Sciences de l'univers, de l'environnement et de l'espace (Toulouse).
- LAMY, K. (2019). Projection Climatique du Rayonnement Ultraviolet au cours du 21ème siècle : impact de différents scénarios climatiques. Thèse de doct. Université de la Réunion.
- LECOEUR, E. (2013). Influence de l'évolution climatique sur la qualité de l'air en Europe. Thèse de doct. Université Paris-Est.
- LIKHVAR, V., PASCAL, M, MARKAKIS, K, COLETTE, A, HAUGLUSTAINE, D, VALARI, M et KLIMONT, Z (mai 2015). A multi-scale health impact assessment of air pollution over the 21st century. Rapp. tech. Climate change & health.
- MARKAKIS, K., VALARI, M., COLETTE, A. et SANCHEZ, O. (juill. 2014). Air quality in the mid-21st century for the city of Paris under two climate scenarios; from the regional to local scale. Rapp. tech. IPSL.
- MOLHO, S., GAUTIER, A., PATY, M.-C. et JESTIN, C. (2018). Représentations et comportements de prévention des arboviroses en France Métropolitaine : Baromètre Santé 2016. *Santé Publique France*.
- MÉTÉO FRANCE (s. d.[a]). Bilan climatique de l'été 2015. URL : <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/bilans-climatiques/bilan-2015/bilan-climatique-de-l-ete>.
- MÉTÉO FRANCE (s. d.[b]). Bilan de la canicule d'août 2003 adressé par Météo-France au ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement et de la Mer le 20 août 2003. URL : <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/evenements-remarquables/retour-sur-la-canicule-daot-2003->.
- MÉTÉO FRANCE (s. d.[c]). Le réchauffement climatique observé à l'échelle du globe et en France. URL : <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/le-rechauffement-observe-a-l-echelle-du-globe-et-en-france>.
- MUGGEO, VMR (2010). Analyzing Temperature Effects on Mortality Within the R Environment : The Constrained Segmented Distributed Lag Parameterization. *Journal of Statistical Software*.
- MUGGEO, VMR (2014). modTempEff: Modelling temperature effects using time series data. URL : <http://CRAN.R-project.org/package=modTempEff>.
- MUGGEO, VMR (2021). segmented: Regression Models with Break-Points / Change-Points Estimation. URL : <http://CRAN.R-project.org/package=segmented>.
- NFGS (juin 2020). NGFS Climate scenarios for central banks and supervisors. Rapp. tech. Network for Greening the Financial System, June.

- NICOLLE-MIR, L. (2016). S'adapter à un monde plus chaud, jusqu'où l'Homme peut-il aller? *Year Book 2017*. John Libbey Eurotext.
- NOS GESTES CLIMAT (2020). Privilégier l'isolation active (en cas de forte chaleur). URL : <https://nosgestesclimat.fr/actions/plus/logement/climatisation/rduction>.
- OMS (2014). Quantitative risk assessment of the effects of climate change on selected causes of death, 2030s and 2050s. *WHO - World Health Organization Library Cataloguing-in-Publication Data*.
- PAM NATIONS UNIES (2021). Alerte famine: la faim, la malnutrition et la réponse du PAM face à cette autre pandémie mortelle, Livia Hengel.
- PASCAL, M., WAGNER, V., ALARI, A., CORSO, M. et TERTRE, A. L. (mars 2021). Extreme heat and acute air pollution episodes: A need for joint public health warnings ? *Atmospheric Environment* 249.
- PELTIER, F. (mai 2016). Regards sur la mortalité saisonnière. *STATEC, Institut national de la statistique et des études économiques*.
- PLANCHET, F. et THÉRON, P. (2006). Modèles de durée : Applications actuarielles. *Economica*.
- PROGRAMME DES NATIONS UNIES (2021). 17 Objectifs de Développement durables définis par l'ONU pour sauver le monde.
- QUINTANA-SEGUÍ, P., MOIGNE, P. L., DURAND, Y., MARTIN, E. et HABETS, F. (2008). Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables: Validation of the SAFRAN Analysis over France. *Journal of applied meteorology and climatology* 47.
- R CORE TEAM (2019). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. URL : <http://www.R-project.org>.
- RE, M. (s. d.). Munich Re's NatCatSERVICE. URL : <https://www.munichre.com/en/reinsurance/business/non-life/natcatservice/index.html>.
- ROUSSEY, G. (2018). Optimisation des stratégies d'acclimatation à la chaleur. Thèse de doct. Université Côte d'Azur.
- SANTÉ PUBLIQUE FRANCE (2017). Surveillance de la Grippe en France, saison 2016-2017. Rapp. tech. Santé Publique France.
- SANTÉ PUBLIQUE FRANCE (2019a). Bilan des épidémies hivernales - saison 2018/2019, Bulletin de Santé publique. Normandie. Rapp. tech. Santé Publique France.
- SANTÉ PUBLIQUE FRANCE (2019b). La grippe, une épidémie saisonnière. *Dossier thématique*.
- SANTÉ PUBLIQUE FRANCE (2020). Grippe : Bilan de la saison 2019-2020. Rapp. tech. Santé Publique France.
- SANTÉ PUBLIQUE FRANCE (mars 2015). Fortes chaleurs prévenir les risques sanitaires chez la personne âgée, document destiné aux professionnels de santé. Rapp. tech. Santé Publique France.
- SANTÉ PUBLIQUE FRANCE (2016). Impacts de la température sur la mortalité dans 18 zones urbaines françaises entre 2000 et 2010 430-7 p. Rapp. tech. Mathilde Pascal, Perrine de Crouy Chanel, Vèrène Waner et al.
- SANTÉ PUBLIQUE FRANCE (déc. 2017). Analyse des gains en santé de plusieurs scénarios d'amélioration de la qualité de l'air en France continentale. Rapp. tech. Études et enquêtes, environnement.
- SANTÉ PUBLIQUE FRANCE (2019a). ARBOVIROSES. *Bulletin de santé publique. Juin 2019*.
- SANTÉ PUBLIQUE FRANCE (2019b). Évaluation de la surmortalité pendant les canicules des étés 2006 et 2015 en France Métropolitaine. *Études et enquêtes*.
- SANTÉ PUBLIQUE FRANCE (2019c). Évolutions de l'exposition aux canicules et de la mortalité associée en France Métropolitaine entre 1970 et 2013. *Études et enquêtes*.
- SANTÉ PUBLIQUE FRANCE (2019d). Grand froid. *DOSSIER THÉMATIQUE*.
- SANTÉ PUBLIQUE FRANCE (sept. 2020). Influence de caractéristiques urbaines sur la relation entre température et mortalité en Île-de-France. Rapp. tech. Études et enquêtes, santé environnement.

- SPF (2018). Bilan de la vague de chaleur du 24 juillet au 08 août 2018. Rapp. tech. Santé Publique France.
- SPF (2019a). Été 2019 : Canicule et Santé. Rapp. tech. Santé Publique France : Bulletin de santé publique.
- SPF (2019b). Évolutions de l'exposition aux canicules et de la mortalité associée en France Métropolitaine entre 1970 et 2013. *Etudes et enquêtes*.
- SPF (2020). Été 2020 : Canicule et Santé. Rapp. tech. Santé Publique France : Bulletin de santé publique.
- SWISS RE GROUP (s. d.). Swiss Re's CatNet. Rapp. tech. URL : <https://www.swissre.com/reinsurance/property-and-casualty/solutions/property-specialty-solutions/catnet.html>.
- TODD, N. et VALLERON, A.-J. (2015). Space-Time Covariation of Mortality with Temperature: A systematic Study of Deaths in France, 1968-2009. Rapp. tech. Le Kremlin-Bicêtre, France : INSERM, Institut national de la santé et de la recherche médicale.
- VANDERLEUN, J., PIACENTINI, R. D. et de GRUIJL, F. R. (2008). Climate change and human skin cancer. *Photochem Photobiol Sci*.
- VERFAILLIE, D., DÉQUÉ, M., MORIN, S. et LAFAYSSE, M. (2017). The method ADAMONT v1.0 for statistical adjustment of climate projections applicable to energy balance land surface models, *Model Dev.*, 10, 4257-4283. *Geosci*.
- VERRIER, A. (2015). Monoxyde de carbone : inodore, mortel. Rapp. tech. Institut de Veille Sanitaire.
- VOLDOIRE, A., SANCHEZ-GOMEZ, E., y MÉLIA, D. S., DECHARME, B. et CASSOU, C. (2011). The CNRM-CM5.1 global climate model : description and basic evaluation. *Clim Dyn*.
- WATKISS, P., HORROCKS, L., PYE, S., SEARL, A. et HUNT, A. (2009). Impacts of climate change in human health in Europe. *PESETA Human health study*.
- WHO (2017). Health topics - Heatwaves. *World Health Organization website*.
- WOOD, S. (2021). mgcv : Mixed GAM Computation Vehicle with Automatic Smoothness Estimation. URL : <http://CRAN.R-project.org/package=mgcv>.

Annexe A

Annexes

A.1 Projection des polluants atmosphériques

”Qu’il s’agisse des nuages de pollution qui planent au-dessus des villes ou de la fumée qui pénètre dans les habitations, la pollution atmosphérique constitue une menace majeure pour la santé et le climat. La pollution atmosphérique ambiante est responsable d’environ 4.2 millions de décès par an, imputables à des accidents vasculaires cérébraux, maladies cardiaques, cancers du poumon et infections respiratoires aiguës ou chroniques.”

OMS

La qualité de l’air est un enjeu de santé publique connu depuis des années, que ce soit en France ou dans le monde. Le lien entre pollution atmosphérique et morbidité est avéré, les polluants les plus dangereux pour l’Homme sont les particules fines ($PM_{2.5}$ et PM_{10}) l’ozone O_3 et les oxydes d’azote NO_x . En France, chaque année 48 000 décès en excès sont attribuables à la pollution atmosphérique (SANTÉ PUBLIQUE FRANCE, 2016). L’exposition cumulée à ces gaz et particules engendre maladies cardiovasculaires, respiratoire et cancer. On distingue la pollution de l’air extérieur, plus communément appelée pollution atmosphérique, et la pollution de l’air intérieur des bâtiments qui elle découle des méthodes utilisées pour le chauffage et la cuisine (par combustibles ou du pétrole). Cette dégradation de l’air intérieur touche majoritairement les pays les plus pauvres et les moins développés d’après l’OMS. Cette partie s’intéresse exclusivement à la pollution atmosphérique. Une concentration inhabituelle et élevée de polluants peut avoir des effets à court terme et à long terme avec l’apparition de maladies chroniques ou cancer, en particulier des poumons. Le changement climatique engendre des modifications conséquentes sur des variables météorologiques (température, humidité, vent) ce qui affecte l’équilibre de l’air. Joint aux molécules polluantes, ce nouveau climat peut aggraver une situation (exemple : canicule et ozone). En vue des enjeux climatiques à venir, appréhender les futures conséquences des modifications climatiques couplé aux projections de la pollution atmosphérique est primordiale. C’est dans cet optique de travail qu’AON a récemment publié ses travaux de recherche sur le sujet (AON, 2020). L’idée étant d’appliquer des pénalités sur des taux de mortalité, d’arrêt de travail et de soin pour l’exercice pilote climatique (ACPR, 2020). Plusieurs études, thèses et projet ont permis d’effectuer ces travaux : le projet français SALUT’AIR (COLETTE et al., 2013), le projet A-C HIA (Air-Climate Health Impact Assessment) (LIKHVAR et al., 2015), ainsi que deux thèses (LACRESSONNIÈRE, 2012), (LECOEUR, 2013) et une publication (MARKAKIS et al., 2014).

Prévision des concentrations et impacts des différents polluants

Les particules fines

Les particules fines sont généralement classées en fonction de leur diamètre inférieur à 2.5μ ($PM_{2.5}$) et comprise entre 2.5 et à 10μ (PM_{10}). Elles sont couramment utilisées pour caractériser la pollution de l'air. Dès 10μ , elles peuvent se loger dans les poumons, lorsqu'elles sont encore plus petites, comme les $PM_{2.5}$, elles franchissent les barrières pulmonaires et affectent le sang. Des expositions répétées à des seuils mêmes non alarmant accrois les risques de cancers pulmonaires, de maladie cardiovasculaires et respiratoires.

Particules PM_{10}

Actuellement, on enregistre de 2 à $14 \mu g/m^3$ en été, et de 8 à $24 \mu g/m^3$ en hiver avec des maximas pour les grandes agglomérations ($14 \mu g/m^3$ en été et $24 \mu g/m^3$ en hiver pour Paris). Les prévisions sont en baisse de 6 à $10 \mu g/m^3$ en 2030 et jusqu'à 8 à $12 \mu g/m^3$ en 2050 pour le Centre et le Nord de la France. La baisse serait encore plus significative dans les grosses agglomérations (LACRESSONNIÈRE, 2012).

Particules $PM_{2.5}$

Comme ses consœurs, les particules fines 2.5 tendent à faiblir. Une diminution générale est prévue à l'avenir, en particulier en Ile-de-France, et les zones urbanisée ceci est expliqué par l'atténuation des émissions liées au transport.

L'Ozone, O_3

L'Ozone est plus élevé en été qu'en hiver, avec des maximas enregistrés en Ile-De-France. Il dépend des températures, du vent, du rayonnement et de la présence dans l'air de molécules méthaniques et d'oxydes d'azote. Les concentrations moyennes en France sont de 50 à $75 \mu g/m^3$ en été contre 40 à $50 \mu g/m^3$ en hiver. Le seuil d'alerte de l'OMS étant de $100 \mu g/m^3$ en moyenne sur 8h. Dans le cadre du scénario RCP 8.5 des variations de concentrations d'ozone différenciées en fonction des saisons sont attendues (LACRESSONNIÈRE, 2012). En été, la tendance est à la baisse pour la partie sud de la France (de 8 à $16 \mu g/m^3$), alors que pour la partie nord une augmentation est attendue (12 à $18 \mu g/m^3$). En hiver, on observerait une augmentation globale, le tout horizon 2050. A noter que ces résultats sont issus du scénario RCP 8.5, aussi appelé « business as usual » qui est le scénario le plus pessimiste sur l'évolution climatique. Les autres études mentionnées prévoient une baisse significative de l'ozone (LIKHVAR et al., 2015), MARKAKIS et al. (2014). Ils soulignent que l'échelle joue un rôle primordial dans la modélisation. En Ile-de-France, à échelle européenne, la tendance est à la baisse (période avril-août) horizon 2050 alors qu'à l'échelle urbaine, la disparité entre Paris et les provinces alentours est importante. Paris enregistrerait une hausse de 9 à $15 \mu g/m^3$ alors que les zones rurales aux alentours verraient leur concentration d'ozone diminuer de $7 \mu g/m^3$. Finalement, les concentrations d'ozone sont très variables et localisées, elles dépendent des activités humaines (véhicules, industries) et du climat. Face à des fortes concentration l'homme développe divers problèmes respiratoires notamment des crises d'asthmes.

Le Dioxyde d'Azote, NO_2

Le dioxyde d'azote NO_2 est un composé à l'origine de la formation de l'ozone. Son émission provient de la combustion (pour le chauffage, le transport, la production d'électricité...). Comme l'ozone, les valeurs varient en fonction des saisons et de la tranche urbaine. Les valeurs vont de $25 \mu g/m^3$ en été à $40 \mu g/m^3$ en hiver pour l'Ile-De-France. Les seuils d'alerte se situant à $20 \mu g/m^3$ en moyenne annuelle et $200 \mu g/m^3$ en moyenne horaire selon l'OMS. Une forte diminution des oxydes d'azote est à prévoir et en particulier dans les zones urbaines.

Conclusion sur les projections de polluants

Le bilan de ses études est globalement positif avec des diminutions de l'ensemble des polluants atmosphériques à l'avenir. Dans le projet A-C HIA (LIKHVAR et al., 2015), deux scénarios sont appréhendés en vue de prévoir les impacts sur santé. Le scénario CLE (emission reductions due to current legislation) qui prend en compte les réductions prévisibles engendrées par la réglementation actuelle et le scénario MFR (maximum feasible reductions of future émissions) plus optimiste sur les efforts possibles, avec des réductions maximales réalisables. En Europe, ces 2 scénarios prévoient une baisse des impacts liés à la pollution atmosphérique de façon plus marquée que pour le reste du monde. Pour le projet d'AON, le scénario utilisé est le RCP 8.5, comme pour Lacressonnière. Les résultats sont matérialisés sous forme de choc de taux pour l'exercice pilote de l'ACPR. Des facteurs additifs et multiplicatifs pour des garanties décès, frais de soin et arrêts de travail sont évalués. Ces facteurs sont évalués en prévoyant une hausse des 4 polluants évoqués ci-dessus, associé aux températures du futur climat.

		2021-2030	2031-2040	2041-2050
<i>Granularité globale (France)</i>	Décès	0.02%	0.02%	0.02%
	Frais de soins	0.84%	1.25%	1.65%
	Arrêts de travail	0.07%	0.10%	0.13%

TABLE A.1 : Impact additif et multiplicatif sur les décès, frais de soin, et les arrêts de travail par horizon de projection (AON, 2020).

A.2 Résultats complémentaires sur l'impact des UV

Le projet RISC-UV du GIS

Le GIS Climat-Environnement-Société (Groupement d'Intérêt Scientifique) crée en mars 2017 par 6 membres fondateurs, est un groupe de 17 laboratoires agissant pour renforcer les connaissances en matière de changement climatique et ces conséquences sur l'environnement et la société. Dans cette démarche le GIS a lancé le projet RISC-UV pour évaluer les parts comportementales et environnementales dans l'augmentation du nombre de cancer de la peau (GIS, 2014).

Résultats bénéfiques/risques du rayonnement :

- La quantité d'UV reçue annuellement est directement liée aux cancers de la peau. Le comportement des individus influe largement sur la quantité annuelle de rayon reçue. Ce risque est à appréhender dans un contexte d'allongement de l'espérance de vie, les progrès en connaissances médicales et le dépistage avancé.
- La synthèse de la vitamine D grâce au rayons UV est plus rapide en été qu'en hiver, et la reconstruction de la couche d'ozone (en hémisphère Nord) va réduire la quantité d'UV reçu en surface, réduction qui dépendra du scénario climatique. La synthèse de la vitamine D sera donc plus longue à l'avenir, il faudra une exposition plus importante pour une synthèse optimale.

Résultats sur la prévention :

- Contrairement aux idées reçues, l'ombre n'est pas un lieu photo-protecteur alors que les campagnes de prévention prônent le contraire.
- Les messages de prévention doivent alerter la population sur le risque soleil, le risque de brûlure par coup de soleil, la surexposition volontaire mais ne doivent pas proscrire l'exposition qui est primordiale au bon fonctionnement du corps humain. Les messages doivent être équilibrés, il ne faut pas éviter le soleil mais éviter les coups de soleil.

A.3 Des tableaux

	AIC	Dev	$gAIC$	Psi	edf	n
0-49	48 683	7 419	0.09	18	45.4	64.0
50-54	43 582	7 102	0.04	18	44.2	31.9
55-59	45 816	7 110	0.04	18	46.5	43.6
60-64	47 307	7 116	0.05	18	48.4	54.2
65-69	48 379	6 976	0.03	18	47.9	64.8
70-74	49 971	7 264	0.07	18	55.6	78.1
75-79	51 900	7 485	0.10	18	50.6	100.0
80-84	53 708	8 077	0.19	18	50.5	118.9
85-89	53 481	8 385	0.23	18	63.0	112.3
90 et +	52 164	8 541	0.26	18	57.0	92.0

TABLE A.2 : Critère de qualité des modèles CSDL utilisé pour la projection chez les hommes.

	AIC	Dev	$gAIC$	Psi	edf	n
0-49	43 551	7 085	0.04	18	53.1	31.8
50-54	38 325	6 868	0.01	18	42.6	15.5
55-59	40 278	6 915	0.02	18	48.4	20.3
60-64	41728	6878	0.01	18	47.9	25.2
65-69	43 657	7 157	0.05	18	43.9	32.1
70-74	45 744	6 920	0.02	18	42.3	44.8
75-79	49 379	7 252	0.07	18	59.0	72.1
80-84	53 544	8146	0.20	18	58.6	114.8
85-89	56 737	9 355	0.37	18	56.9	155.4
90 et +	61 444	11 391	0.67	18	61.8	228.9

TABLE A.3 : Critère de qualité des modèles CSDL utilisé pour la projection chez les femmes

A.3.1 Nombre de décès par vagues entre 2020 et 2070 - RCP 8.5.

TABLE A.4 : Nombre de décès par vague entre 2000 et 2070 - RCP 8.5.

Année	Num. vague	Durée (en j.)	Intensité	Nb. décès Femme	Nb. décès Homme	Nb. décès tot.
2020	1	4	4.0	1463	1279	2742
2020	2	3	1.3	797	669	1466
2022	1	3	3.5	1232	1056	2288
2022	2	2	3.1	528	433	961
2023	1	1	0.6	310	267	577
2025	2	8	10.1	3425	3023	6448
2025	3	3	4.0	543	437	980
2025	4	25	11.6	7454	5626	13080
2026	1	8	5.4	2892	2546	5438
2027	1	41	16.4	11644	9434	21078
2027	2	2	3.8	348	171	519
2030	1	7	9.7	3022	2675	5697
2030	2	1	1.8	201	145	346
2030	3	2	2.2	510	425	935
2030	4	3	3.8	970	735	1705
2031	1	3	4.4	993	844	1837
2032	1	6	3.4	1446	1150	2596
2033	1	2	3.5	1012	883	1895
2033	2	6	7.1	2478	2096	4574
2033	3	7	4.9	2651	2193	4844
2033	4	3	4.1	709	490	1199
2036	1	2	3.2	763	653	1416
2036	2	4	3.8	1454	1177	2631
2037	1	12	8.2	4004	3111	7115
2038	1	4	6.4	2499	2162	4661
2038	2	2	3.7	843	716	1559
2038	3	3	4.7	1083	829	1912
2038	4	2	3.5	569	458	1027
2039	1	3	4.1	1035	893	1928
2039	2	2	3.7	820	608	1428
2041	1	2	3.2	925	765	1690
2041	2	4	7.7	2068	1619	3687
2042	1	6	4.8	3017	2437	5454
2042	2	5	1.8	1050	699	1749

TABLE A.4 : Nombre de décès par vague entre 2000 et 2070 - RCP 8.5 (*continued*).

Année	Num. vague	Durée (en j.)	Intensité	Nb. décès Femme	Nb. décès Homme	Nb. décès tot.
2042	3	7	13.5	3445	2634	6079
2043	1	4	4.9	1910	1484	3394
2046	1	1	1.2	418	332	750
2046	2	3	3.5	1469	1066	2535
2046	3	2	3.4	868	650	1518
2047	1	2	4.0	958	788	1746
2047	2	1	2.3	426	323	749
2047	3	5	5.5	2216	1562	3778
2048	1	7	5.5	3414	2723	6137
2048	2	7	6.7	2181	1463	3644
2050	1	4	5.4	2404	1807	4211
2050	2	2	4.9	835	615	1450
2050	3	6	6.0	2201	1537	3738
2050	4	6	8.7	2527	1530	4057
2051	1	7	4.0	2891	2047	4938
2052	1	4	5.3	1866	1467	3333
2052	2	4	6.7	1982	1468	3450
2053	1	3	3.7	1504	1125	2629
2053	2	2	4.0	918	711	1629
2053	3	3	3.3	851	578	1429
2053	4	4	6.7	1547	1083	2630
2053	5	3	6.2	1207	779	1986
2054	1	8	7.5	3709	2906	6615
2054	2	4	6.1	1872	1416	3288
2054	3	3	2.2	1057	665	1722
2054	4	3	5.6	1231	777	2008
2054	5	10	8.2	4246	2783	7029
2054	6	5	5.1	2195	1499	3694
2055	1	2	2.9	1115	917	2032
2055	2	5	8.1	2691	1998	4689
2055	3	1	1.6	517	387	904
2056	1	4	3.9	1537	1056	2593
2056	2	26	12.3	9525	5781	15306
2057	1	3	2.9	1339	1039	2378
2057	2	2	2.6	659	503	1162
2057	3	2	3.2	1055	838	1893

TABLE A.4 : Nombre de décès par vague entre 2000 et 2070 - RCP 8.5 (*continued*).

Année	Num. vague	Durée (en j.)	Intensité	Nb. décès Femme	Nb. décès Homme	Nb. décès tot.
2058	1	3	3.2	1581	1328	2909
2058	2	1	0.2	248	213	461
2058	3	2	1.3	571	496	1067
2058	4	11	15.4	7568	5484	13052
2059	1	6	6.7	1983	1353	3336
2059	2	3	6.0	1613	1187	2800
2060	1	1	2.9	537	401	938
2060	2	4	5.2	1611	1193	2804
2061	1	1	2.6	547	444	991
2061	2	3	4.8	1379	1146	2525
2061	3	1	1.7	574	493	1067
2061	4	5	5.2	2380	1609	3989
2061	5	1	2.3	217	93	310
2062	1	4	5.3	1843	1280	3123
2063	1	10	13.8	5215	3849	9064
2064	1	1	1.4	568	477	1045
2064	2	3	5.0	1322	1018	2340
2065	2	4	6.4	2342	1795	4137
2065	3	32	18.1	12081	6679	18760
2065	4	22	19.8	7940	3058	10998
2065	5	1	3.3	131	-82	49
2065	6	2	4.1	556	239	795
2066	1	3	6.6	1423	1035	2458
2066	2	4	7.1	2322	1584	3906
2067	1	3	3.0	1411	1075	2486
2067	2	3	3.5	1251	870	2121
2067	3	1	1.7	257	128	385
2068	1	2	5.1	1449	1209	2658
2068	2	3	7.7	1760	1417	3177
2068	3	5	9.4	2225	1619	3844
2068	4	3	5.9	667	302	969
2068	5	2	4.2	797	484	1281
2069	1	8	10.1	3675	2614	6289
2069	2	7	9.6	2194	1197	3391
2070	1	11	11.8	4698	3170	7868

TABLE A.4 : Nombre de décès par vague entre 2000 et 2070 - RCP 8.5 (*continued*).

Année	Num. vague	Durée (en j.)	Intensité	Nb. décès Femme	Nb. décès Homme	Nb. décès tot.
2070	2	1	6.0	400	247	647

A.3.2 Nombre de décès par vagues entre 2020 et 2070 - RCP 2.6

TABLE A.5 : Nombre de décès par vague entre 2000 et 2070 - RCP 2.6.

Année	Num. vague	Durée (en j.)	Intensité	Nb. décès Femme	Nb. décès Homme	Nb. décès tot.
2022	1	1	1.4	361	304	665
2022	2	13	13.7	4362	3750	8112
2023	1	3	2.8	972	852	1824
2023	2	2	1.5	481	381	862
2023	3	4	1.9	940	713	1653
2024	1	1	1.9	354	314	668
2024	2	3	5.6	1329	1101	2430
2025	1	19	12.1	6820	5839	12659
2026	1	8	10.6	3611	3181	6792
2026	2	20	13.3	6083	4766	10849
2027	1	11	9.6	4221	3698	7919
2027	2	4	5.1	562	430	992
2028	1	11	7.4	3938	3400	7338
2028	2	7	7.3	2322	1951	4273
2028	3	13	9.2	4251	3242	7493
2029	1	4	3.8	1276	1061	2337
2029	2	3	4.6	1142	925	2067
2030	1	1	0.7	264	225	489
2030	2	3	4.5	949	803	1752
2031	1	1	0.7	335	299	634
2031	2	10	9.1	3726	3261	6987
2031	3	1	5.0	344	277	621
2032	1	1	2.1	471	418	889
2032	2	23	14.2	7047	5718	12765
2032	3	16	9.6	6174	4667	10841
2034	1	3	5.4	1404	1159	2563
2034	2	1	1.2	264	207	471

TABLE A.5 : Nombre de décès par vague entre 2000 et 2070 - RCP 2.6 (*continued*).

Année	Num. vague	Durée (en j.)	Intensité	Nb. décès Femme	Nb. décès Homme	Nb. décès tot.
2035	1	2	3.3	764	678	1442
2035	2	1	1.6	317	259	576
2035	3	10	11.5	3715	2958	6673
2036	1	3	3.9	1062	904	1966
2036	2	4	6.2	1989	1684	3673
2037	1	2	2.7	1007	869	1876
2037	2	2	4.8	955	791	1746
2038	1	1	1.9	518	445	963
2038	2	2	3.9	976	781	1757
2038	3	16	12.5	5755	4540	10295
2039	1	4	3.5	2036	1754	3790
2039	2	1	2.5	382	314	696
2039	3	3	3.7	821	611	1432
2040	1	1	1.6	494	405	899
2040	2	9	7.7	3413	2628	6041
2040	3	3	2.8	651	531	1182
2040	4	1	1.9	321	213	534
2041	1	2	3.9	1110	900	2010
2041	2	2	2.6	669	473	1142
2042	1	1	0.6	451	372	823
2042	2	12	11.7	5855	4322	10177
2042	3	6	6.4	2009	1302	3311
2043	1	3	5.1	1326	1068	2394
2043	2	5	9.2	1755	1313	3068
2043	3	10	6.0	3211	2216	5427
2043	4	2	1.3	607	347	954
2045	1	2	1.5	942	741	1683
2045	2	6	6.9	2858	2147	5005
2046	1	4	7.8	2373	1877	4250
2046	2	8	9.4	4273	3220	7493
2047	1	1	0.6	628	519	1147
2047	2	5	7.5	2937	2376	5313
2047	3	7	7.9	2345	1542	3887
2047	4	7	6.7	2014	1317	3331
2049	1	4	7.0	2794	2172	4966
2049	2	1	2.1	367	236	603

TABLE A.5 : Nombre de décès par vague entre 2000 et 2070 - RCP 2.6 (*continued*).

Année	Num. vague	Durée (en j.)	Intensité	Nb. décès Femme	Nb. décès Homme	Nb. décès tot.
2049	3	10	9.1	4150	2925	7075
2050	1	1	2.2	537	444	981
2051	1	1	0.6	329	263	592
2052	1	4	3.4	2206	1748	3954
2052	2	6	5.3	1756	1241	2997
2052	3	9	11.6	6023	4405	10428
2052	4	5	5.0	1783	1189	2972
2053	1	3	3.3	1662	1342	3004
2054	1	3	2.9	1553	1240	2793
2054	2	2	2.7	833	603	1436
2054	3	4	8.1	1716	1271	2987
2055	1	2	3.0	1125	949	2074
2056	1	2	3.7	1316	1088	2404
2056	2	3	5.9	1640	1127	2767
2056	3	2	2.2	534	370	904
2056	4	4	3.7	1235	763	1998
2057	1	3	4.9	1499	1113	2612
2058	1	6	5.9	3735	2949	6684
2058	2	1	1.5	587	425	1012
2058	3	2	1.6	934	696	1630
2059	1	2	4.2	810	611	1421
2059	2	16	9.7	6795	4442	11237
2059	3	2	2.7	521	244	765
2060	1	1	0.8	612	521	1133
2060	2	6	9.5	3224	2535	5759
2060	3	2	4.3	400	258	658
2060	4	2	3.8	356	202	558
2061	1	5	2.9	1883	1356	3239
2061	2	12	10.6	5370	3547	8917
2061	3	8	7.6	2499	1169	3668
2061	4	1	1.9	138	49	187
2063	1	1	1.3	468	382	850
2063	2	5	4.2	2106	1596	3702
2064	1	4	3.3	1218	811	2029
2064	2	1	1.9	187	93	280
2064	3	12	7.5	5392	3463	8855

TABLE A.5 : Nombre de décès par vague entre 2000 et 2070 - RCP 2.6 (*continued*).

Année	Num. vague	Durée (en j.)	Intensité	Nb. décès Femme	Nb. décès Homme	Nb. décès tot.
2065	1	3	3.4	1519	1155	2674
2065	2	4	7.4	2264	1687	3951
2065	3	3	3.8	1135	775	1910
2066	1	1	0.8	472	413	885
2066	2	1	2.4	332	227	559
2066	3	6	6.6	2255	1468	3723
2066	4	2	3.2	935	660	1595
2067	1	3	4.6	1515	1212	2727
2067	2	1	1.8	301	183	484
2067	3	6	5.5	2006	1296	3302
2068	1	1	2.2	559	458	1017
2068	2	10	9.2	4476	3482	7958
2068	3	7	8.5	1668	906	2574
2068	4	2	3.3	1149	796	1945
2069	1	3	6.2	1572	1260	2832
2069	2	7	13.6	3631	2539	6170
2069	3	10	3.4	1137	876	2013

A.4 Des graphiques

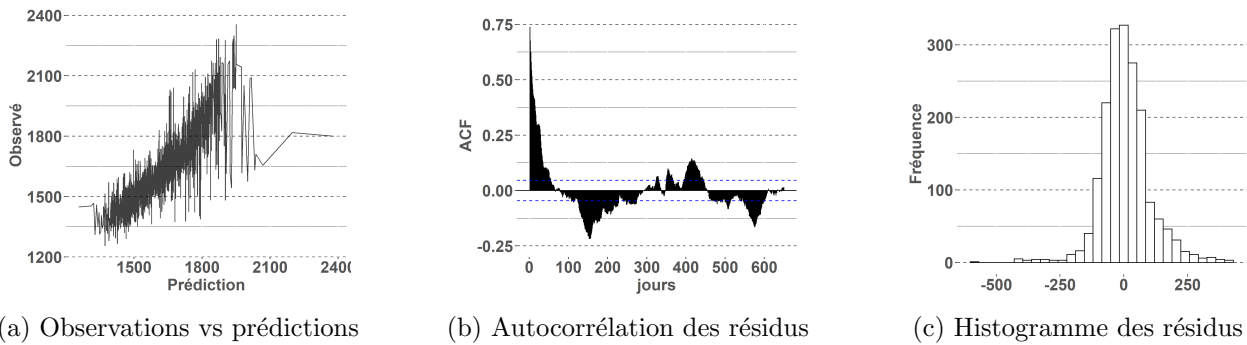


FIGURE A.1 : Caractéristiques des résidus sur la calibration du modèle CSDL avec une période d’observation de 2000 à 2019 avec l’année 2003, prédiction sur les années 2015-2019.

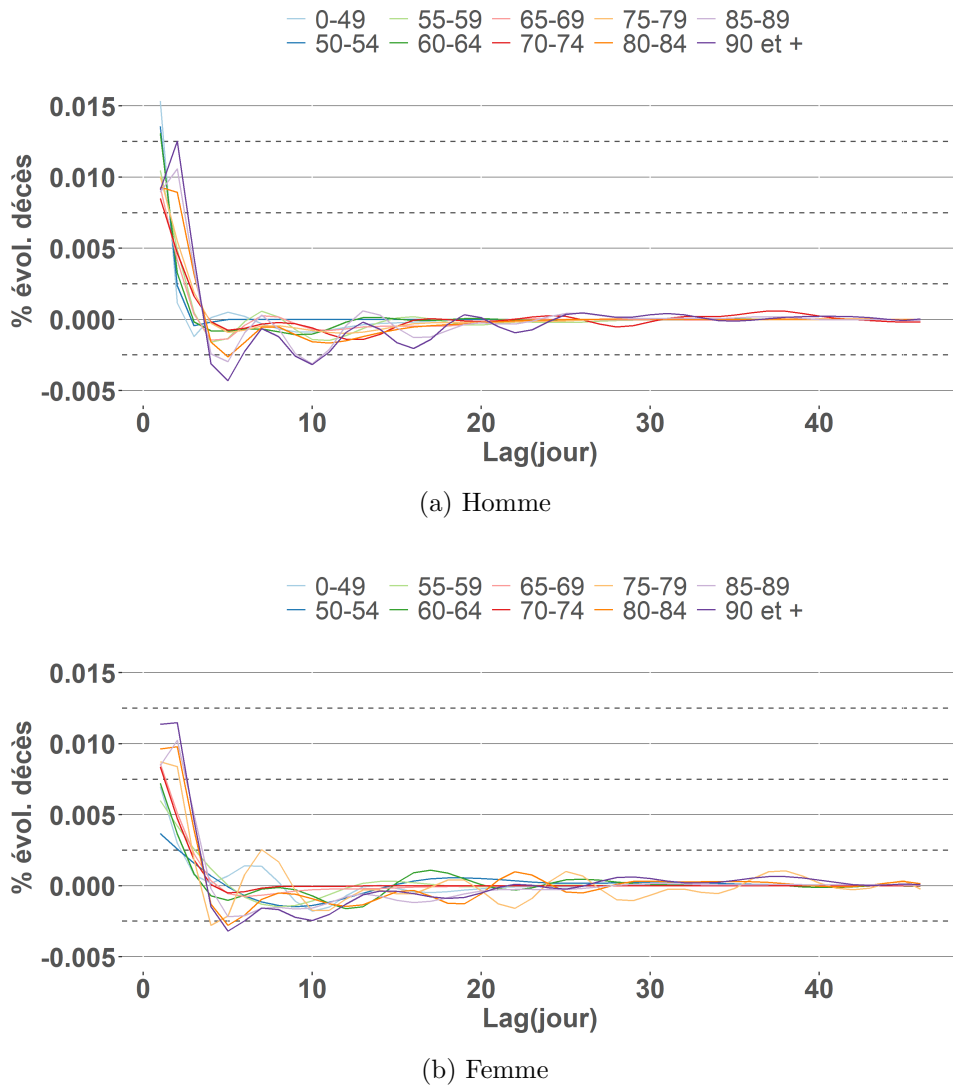


FIGURE A.2 : Courbe des β chaleur des modèle CSDL utilisé pour les projections a) et c).