

Faculté de santé publique

Caractérisation de la surmortalité associée aux vagues de chaleur en Belgique à partir de données nationales

Mémoire réalisé par
Quentin Mailleux

Promoteur·rice(s)
Damien Delforge

Co-promoteur
Niko Speybroeck

Année académique 2023-2024
Master en sciences de la santé publique, finalité spécialisée

Faculté de santé publique

Caractérisation de la surmortalité associée aux vagues de chaleur en Belgique à partir de données nationales

Mémoire réalisé par
Quentin Mailleux

Promoteur **Damien
Delforge**

Co-promoteur
Niko Speybroeck

Année académique 2023-2024
Master en sciences de la santé publique, finalité spécialisée

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la rédaction de ce mémoire.

Je voudrais dans un premier temps remercier mon promoteur, Monsieur Damien Delforge, pour sa disponibilité, sa réactivité à chacune de mes demandes et surtout ses précieux conseils lors de chacune de nos entrevues et chacun de nos échanges, qui m'ont permis de faire mes premiers pas en épidémiologie avancée et ont contribué à ma compréhension de la thématique abordée.

Je tiens également remercier mon co-promoteur, le Professeur Niko Speybroeck, d'avoir accepté mon projet de mémoire et de m'avoir mis en contact avec monsieur Delforge, et ainsi, avoir ainsi contribué à la bonne mise en place de mon travail.

Pour terminer ces remerciements académiques, et même si elles ne liront probablement pas ce travail, je remercie aussi Madame Catherine Pétein et Madame Céline Chomé, assistantes durant les travaux pratiques du cours d'Épidémiologie Avancée qui, par leur pédagogie et leur disponibilité, m'ont aidé à débiter dans le codage informatique et m'ont permis de mieux appréhender le langage R.

D'un point de vue personnel, je tiens à remercier chaleureusement mon Papa pour la relecture attentive de mon travail, et pour les retouches que j'ai pu y apposer grâce au regard du professeur de français passionné qu'il est.

Je déclare sur l'honneur que ce mémoire a été écrit de ma plume, sans avoir sollicité d'aide extérieure illicite, qu'il n'est pas la reprise d'un travail présenté dans une autre institution pour évaluation, et qu'il n'a jamais été publié, en tout ou en partie.

Toutes les informations (idées, phrases, graphes, cartes, tableaux, ...) empruntées ou faisant référence à des sources primaires ou secondaires sont référencées adéquatement selon la méthode universitaire en vigueur. Je déclare avoir pris connaissance et adhérer au Code de déontologie pour les étudiant-e-s en matière d'emprunts, de citations et d'exploitation de sources diverses et savoir que le plagiat constitue une faute grave sanctionnée par l'Université catholique de Louvain.

Table des matières

1	INTRODUCTION.....	7
1.1	Avant-propos.....	7
1.2	Cadre théorique : caractéristiques générales des vagues de chaleur dans le monde et en Belgique	8
1.2.1	Définition internationale d'une vague de chaleur	8
1.2.2	Evolution de la compréhension scientifique des épisodes de forte chaleur dans le monde (de 1998 à nos jours)	8
1.2.3	Définition d'une vague de chaleur en Belgique	11
1.2.4	Caractérisation des vagues de chaleur en Belgique : études scientifiques nationales	11
1.3	Résumé introductif	14
2	MÉTHODOLOGIE	16
2.1	Matériel	16
2.1.1	Zone d'étude	16
2.1.2	Collecte de données	16
2.2	Mise en place de la méthodologie	17
2.2.1	Définition de l'événement de vague de chaleur considéré	17
2.2.2	Gestion des biais et lag.....	18
2.3	Approche méthodologique	22
3	RÉSULTATS	23
3.1	Analyse descriptive	23
3.1.1	Premières observations	23
3.1.2	Inclusion des données météorologiques.....	26
3.1.3	Résidus et analyse de corrélation	28
3.1.4	Regard sur les jours de vagues de chaleur répertoriés par l'IRM	31
3.2	Analyse de régression non-linéaire	33
3.3	Synthèse des résultats principaux	39
4	LIMITES ET DISCUSSION.....	40
4.1	Limites des méthodes utilisées et solutions	40
4.2	Discussion des résultats	42
4.3	Implication concrète des résultats par rapport à la santé publique.....	43
5	CONCLUSION	46
6	BIBLIOGRAPHIE	49

1 INTRODUCTION

1.1 Avant-propos

Europe, été 2022. Nous traversons une saison torride durant laquelle sécheresse et incendies de forêt viennent harceler la population et engendrent des records de température un peu partout sur le vieux continent. Pourtant loin des dizaines de milliers de décès en Espagne ou en Italie, une étude menée par J. Ballester et al. (1) estime à 434 le nombre de morts liées à la chaleur en Belgique durant cette période. Un total de plus de 140 décès par mois qui a de quoi marquer les esprits.

Le contexte climatique global montre une tendance à l'augmentation des températures moyennes et des événements extrêmes. Les études scientifiques indiquent que le réchauffement climatique, principalement dû aux émissions de gaz à effet de serre, est un facteur majeur de l'intensification et de la fréquence accrue des vagues de chaleur. Ainsi, elles sont devenues un grave problème dans le monde entier, et la Belgique n'est pas épargnée. Ces vagues peuvent avoir des conséquences graves sur la santé humaine, en particulier chez les personnes âgées et celles atteintes de maladies chroniques. Dès lors, la surmortalité associée aux vagues de chaleur est un sujet de préoccupation majeur pour les autorités sanitaires et les chercheurs.

Pour ce mémoire, nous avons choisi d'adopter une approche continue, nuancée par une série d'analyses statistiques diverses et variées, en utilisant des sources de données nationales pour caractériser la surmortalité associée aux vagues de chaleur en Belgique. Cette approche permettra de mieux comprendre l'utilisation de sources de données nationales, ainsi que d'évaluer dans quelle mesure celles-ci peuvent aider à caractériser la problématique étudiée. C'est en tout cas l'objectif poursuivi dans ce travail. Dans cette introduction, nous allons vous présenter les principaux concepts liés à notre sujet de recherche afin de poser le cadre théorique au sein duquel nous avons travaillé pour répondre à la question suivante : "Peut-on caractériser l'impact des vagues de chaleur en Belgique et dans ses provinces à partir des données disponibles à l'échelle nationale ?"

1.2 Cadre théorique : caractéristiques générales des vagues de chaleur dans le monde et en Belgique

1.2.1 Définition internationale d'une vague de chaleur

L'Organisation météorologique mondiale (OMM) nous apprend qu'« une vague de chaleur est définie de manière générale comme une période de temps chaud statistiquement inhabituel persistant pendant un certain nombre de jours et de nuits »(2). L'OMM précise également que l'on se sert d'indicateurs liés aux conditions météorologiques locales afin d'objectivement définir et annoncer une période de chaleur exceptionnelle. Dans la plupart des pays, la charge d'émettre des alertes officielles de canicule incombe exclusivement aux agences nationales désignées, telles que les services météorologiques ou les organismes de santé publique.

1.2.2 Evolution de la compréhension scientifique des épisodes de forte chaleur dans le monde (de 1998 à nos jours)

Pour mieux concevoir l'approche de caractérisation qui est le point-clé de notre travail, nous nous sommes intéressé à une série d'articles scientifiques à travers le monde et abordant la thématique des vagues de chaleur, ainsi que leur impact sur la santé publique. L'idée de cette revue de littérature fut de reprendre des écrits de référence publiés sur une échelle temporelle assez large pour voir l'évolution des méthodes utilisées et des objectifs ciblés par les études portant sur la thématique abordée dans notre travail.

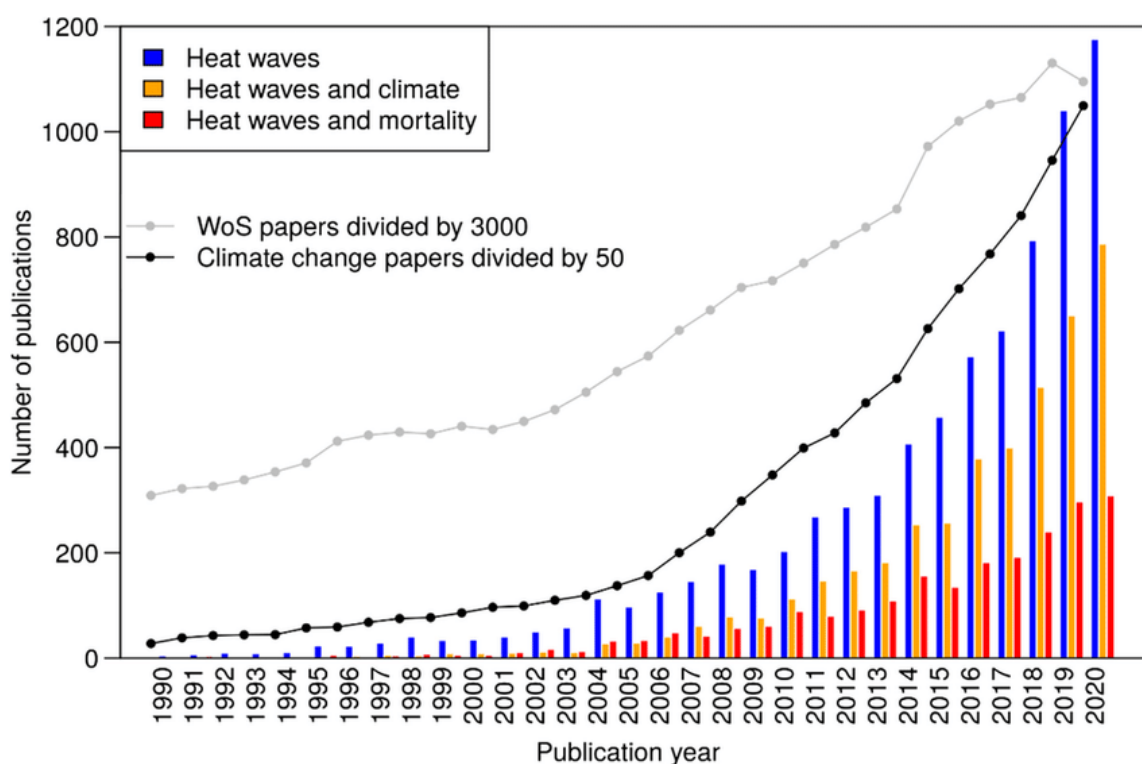
Le détail de cette revue littéraire scientifique est annexé à ce travail (*cf. Annexe 1*) dans le but de ne pas surcharger la lecture de celui-ci mais nous en avons résumé les points importants dans le tableau 1, reprenant pour chaque article l'impact des vagues de chaleur sur la santé publique qu'ont perçu les auteurs, les méthodes épidémiologiques qu'ils ont utilisées pour parvenir à leurs conclusions respectives, pour finir avec les solutions que proposent ceux-ci.

Tableau 1. Synthèse de la littérature scientifique mondiale étudiant la surmortalité liée aux vagues de chaleur, de 1998 à 2020

Titre, auteurs et année de publication	Impact observé sur la santé publique	Méthodes utilisées	Solutions proposées par les auteurs
Excess mortality in England and Wales, and in Greater London, during the 1995 heatwave , Rooney et al., 1998 (3)	Forte augmentation de la mortalité, notamment pour les maladies respiratoires et cérébrovasculaires. Corrélation avec la pollution atmosphérique et effet de chaleur urbain.	Analyse temporelle sur base de données de mortalité (par sexe, groupe d'âges et causes) et de données météorologiques pour la période concernée Coefficients de risque pour définir la part de mortalité attribuée à la pollution de l'air	Amélioration des conditions de logement Protection augmentée des populations vulnérables Mise en place d'alertes météorologiques lors d'événements extrêmes
Climate Change and Extreme Heat Events , Luber et al., 2008 (4)	EHE (Extreme Heat Events) = principale cause de mortalité liée aux conditions météorologiques à l'échelle mondiale. Les populations vulnérables sont particulièrement affectées.	Analyse épidémiologique des risques liés aux EHE et des données de morbidité/mortalité de la population, en se basant sur des modèles climatiques et démographiques.	Efforts de santé publique pour prévenir les maladies liées à la chaleur (attention particulière aux facteurs de risque au niveau individuel et communautaire) Conception de "villes fraîches" pour atténuer les effets des températures extrêmes à l'échelle mondiale
The Hot Summer of 2010: Redrawing the Temperature Record Map of Europe , Barriopedro et al., 2011 (5)	Effets dévastateurs sur la santé, l'agriculture et l'économie. La probabilité d'occurrence de ces événements devrait augmenter.	Analyses temporelle et statistique par utilisation de données de réanalyses et de projections multi-modèles climatiques pour évaluer la fréquence et l'ampleur des méga-vagues de chaleur	Mise en évidence de l'importance de faire face à l'augmentation potentielle de la fréquence de méga-vagues de chaleur Mise en place de stratégies adaptatives pour atténuer les impacts négatifs ces événements, en tenant compte de l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre
Increasing trends in regional heatwaves , Perkins-Kirkpatrick et al., 2020 (6)	Augmentation de la fréquence, de la durée et de l'intensité des vagues de chaleur depuis les années 1950. Les pays en développement sont plus fortement touchés.	Analyse des données de température de la Terre de Berkeley pour évaluer la fréquence, la durée, l'intensité et la chaleur cumulative des vagues de chaleur Calcul des tendances par un estimateur non-paramétrique	Recommandation de stratégies de gestion et d'adaptation appropriées pour faire face à l'augmentation rapide des vagues de chaleur, en mettant en avant l'importance de mesurer l'intensité des vagues de chaleur pour évaluer plus complètement leurs impacts

Nous avons constaté que les études approfondies quant à la problématique des vagues de chaleur sont présentes dans la littérature scientifique depuis plus de 20 ans. Nous nous sommes dès lors demandé à quel point ce sujet avait évolué au cours des années, tant dans sa considération et dans son approche que dans l'importance qu'il occupe sur la scène de la recherche épidémiologique. Ce sont trois chercheurs allemands qui nous ont offert une réponse à cette interrogation en évaluant le nombre de publications scientifiques postées chaque année sur le sujet, et ce durant 30 ans (7).

Figure 1. Évolution temporelle du nombre total de publications sur les vagues de chaleur, de publications sur les vagues de chaleur en rapport avec le changement climatique et de publications sur les vagues de chaleur en rapport avec la mortalité, entre 1990 et 2020.



À titre de comparaison, le nombre total de publications (réduit) dans le domaine de la recherche sur le changement climatique et le nombre total de publications couvertes par la base de données WoS (réduit également) sont inclus. Même si cela est à nuancer par le fait que les papiers scientifiques sont en constante augmentation depuis 1990 (cfr. courbe évolutive grise sur le graphique), et ce toutes thématiques confondues, nous remarquons tout de même au premier coup d'œil que la recherche portée sur les événements de vagues de chaleur prend une place de plus en plus conséquente dans la littérature internationale. Nous allons maintenant voir si c'est également le cas à l'échelle locale.

1.2.3 Définition d'une vague de chaleur en Belgique

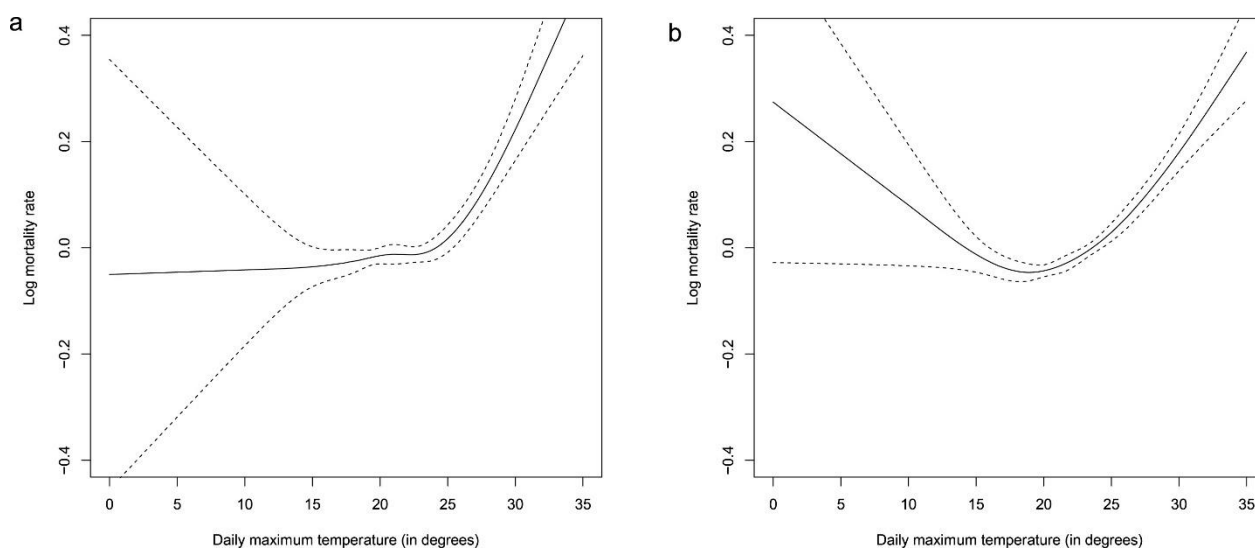
En Belgique, l'Institut Royal Météorologique (IRM) qualifie une période de vague de chaleur nationale lorsque les températures maximales à Uccle atteignent au moins 25,0°C pendant une période d'au moins 5 jours consécutifs, avec au moins trois de ces jours dépassant les 30,0°C (NB : c'est ce qu'on appelle des jours tropicaux). Ce même critère est également appliqué pour certains avertissements de chaleur, mais à l'échelle provinciale (8). Le fait que l'on se concentre sur une seule zone géographique limitée pour définir un phénomène météorologique national est justifié par le fait qu'Uccle est la station météorologique de référence en Belgique, et que ce sont donc les températures relevées à cet endroit qui entraînent une caractérisation d'*heatwave* (ou non) à l'échelle belge.

1.2.4 Caractérisation des vagues de chaleur en Belgique : études scientifiques nationales

La Belgique a connu une augmentation de la fréquence des vagues de chaleur au cours des dernières décennies. Avant, ces événements étaient rares, mais ils sont devenus plus fréquents, avec des épisodes de chaleur extrême se produisant presque chaque été (9). Ces vagues de chaleur peuvent durer de quelques jours à plusieurs semaines. Selon l'étude précitée de Perkins & Lewis, cette tendance s'observe depuis 1950.

En 2020, De Troyer et al. ont publié une analyse de séries chronologiques portant sur la mortalité liée à la chaleur dans les deux plus grandes zones urbaines belges : Anvers et Bruxelles (10) . Les auteurs entreprennent une évaluation exhaustive de la dynamique de la relation entre la chaleur et la mortalité, déterminant des seuils de température spécifiques à ces zones urbaines, au-delà desquels la mortalité présente une augmentation significative. Par ailleurs, l'analyse inclut une exploration de l'effet qu'aurait un ajustement vis-à-vis de la pollution atmosphérique sur le pourcentage de variation de la mortalité en réponse à une augmentation d'1°C au-dessus du seuil établi.

Figure 2. Splines cubiques naturelles et bandes de confiance à 95% décrivant la relation entre la température maximale (lag 0-3) et la mortalité à Anvers (gauche) et Bruxelles (droite) sur la période 2002-2011



Pour décrire la relation entre la chaleur et la mortalité, les indicateurs de température (avec un décalage de 0 à 3 jours) ont été inclus dans le modèle en utilisant des splines cubiques naturelles (avec 5 nœuds). C'est l'une des méthodes d'analyse statistique que nous utiliserons plus tard dans ce travail et dont nous pouvons observer la représentation en figure 2.

Les résultats montrent un impact significatif de la température sur la mortalité, dépassant des seuils spécifiques aux zones urbaines à Anvers et à Bruxelles. La relation entre chaleur et mortalité varie notablement entre ces deux zones, avec des seuils distincts. L'ajustement pour la pollution de l'air diminue cet effet, en particulier dans le cas de l'ozone. Ces constatations constituent d'ailleurs une piste intéressante de prolongement de notre étude, comme nous en discuterons bien plus tard dans ce travail.

Dans une autre étude dont les conclusions se sont confirmées tout au long de notre travail, Martinez et al. ont travaillé sur les conditions météorologiques de la couche limite atmosphérique et les aspects physiques urbains à Anvers (11). Les résultats obtenus à partir d'une température quotidienne maximale de 26 °C et au-delà révèlent des anomalies, avec des intervalles de confiance statistiquement significatifs. Les auteurs font appel à une recherche plus approfondie pour combler le fossé de données locales en matière de prévention efficace contre la chaleur dans les agglomérations urbaines de taille moyenne. Ce point met en lumière l'importance d'une approche en fonction du contexte pour développer des stratégies de

prévention spécifiques à chaque région, tenant compte de ses caractéristiques climatiques et démographiques uniques. Tout comme pour les conclusions de l'étude menée par De Troeyer et al., ce sont des éléments de discussion qui reviendront plus tard dans notre travail.

De son côté, l'institut Sciensano, qui est l'un des acteurs essentiels dans la surveillance et l'action épidémiologique liée aux risques climatiques en Belgique, s'intéresse également de près aux impacts météorologiques. Sciensano est d'ailleurs impliqué dans une étude menée par Demoury et al.(12) a montré une augmentation de la mortalité pendant les périodes de chaleur extrême.

Cette recherche, menée dans neuf agglomérations urbaines de Belgique sur la période 2010-2015, a utilisé un plan de croisement de cas stratifié pour estimer les associations entre la température et la mortalité. Les décès sont souvent liés à des problèmes de santé tels que les coups de chaleur, les accidents vasculaires cérébraux, les maladies cardiovasculaires et la déshydratation. On constate une légère surmortalité pour toutes les catégories de causes de décès à température modérément élevée (26.7°C) et ce risque relatif continue à augmenter à température élevée, avec 21% de risque supplémentaire de décès lorsque la température atteint 31.3°C.

En outre, l'étude révèle des variations significatives de risque en fonction de l'âge, avec une vulnérabilité accrue chez les personnes âgées de 75 à 84 ans et chez celles de plus de 85 ans. Cette différenciation par âge met le doigt sur l'importance de comprendre les dynamiques démographiques de la surmortalité liée aux vagues de chaleur. Par ailleurs, les femmes se sont avérées plus vulnérables à la chaleur que les hommes, et les résidents des municipalités densément peuplées présentaient un risque de mortalité plus élevé lors des épisodes de chaleur extrême. C'est cette étude qui nous a le plus éclairé quant aux différentes catégories de population à isoler pour en tirer des conclusions qui soient les plus pertinentes possibles.

Il est notable de mentionner que l'étude a trouvé que les polluants atmosphériques n'ont pas d'effet confondant significatif sur l'association entre la température et la mortalité, au contraire de ce qu'avaient conclu De Troeyer et al. précédemment (10).

Pour conclure ce petit tour sur la littérature scientifique belge portant sur la problématique que nous étudions, nous nous sommes intéressés aux adaptations socio-politiques face à de tels événements météorologiques. Une équipe menée par Natalia Bustos Sierra, épidémiologiste travaillant pour Sciensano, a examiné la surmortalité associée aux périodes de chaleur et de pics d'ozone en Belgique pendant l'été 2023, en s'attardant sur la mise en place des plans nationaux

durant les périodes en question. La première activation du plan "Fortes Chaleurs et Pics d'Ozone" a eu lieu du 8 au 21 juin, avec des températures élevées et des concentrations fortes d'ozone et de particules fines. Cette période a entraîné une surmortalité significative chez les personnes âgées en Flandre, en Wallonie et à Bruxelles. La deuxième phase d'activation du plan, du 5 au 11 septembre, a également été associée à une surmortalité, mais à une échelle plus limitée.

Sur l'ensemble de la période estivale, une sous-mortalité de -2,5 % a été observée par rapport aux années précédentes. Même si l'essoufflement de la pandémie covid-19 n'y est pas étranger, les facteurs météorologiques et environnementaux modérés, ainsi que des mesures de prévention efficaces, ont également été identifiés comme des facteurs contribuant à la sous-mortalité. Il nous semblait important de mettre en avant ce dernier article qui souligne l'importance de surveiller étroitement les effets des périodes de chaleur et de pollution atmosphérique sur la santé publique, ainsi que l'efficacité des mesures d'atténuation mises en place.

1.3 Résumé introductif

Ainsi, le cadre théorique et la revue de littérature, tant mondiale que nationale, mettent en avant l'importance de comprendre et de caractériser l'impact des vagues de chaleur en Belgique. Les vagues de chaleur, qui se caractérisent par des températures anormalement élevées pendant plusieurs jours consécutifs, ont des répercussions graves sur la santé, aggravant les maladies cardiovasculaires et pulmonaires et augmentant substantiellement la mortalité, en particulier chez certaines populations, comme les personnes âgées et les personnes malades chroniques.

La littérature met en lumière le risque pour la santé publique que représentent les vagues de chaleur, exacerbées par les îlots de chaleur urbains et la pollution atmosphérique. Les preuves épidémiologiques indiquent un impact disproportionné de ces vagues sur certaines populations. De plus, les projections climatiques prévoient une augmentation de la fréquence, de l'intensité et de la durée des vagues de chaleur, accentuant l'urgence d'agir.

L'analyse des données relatives à la mortalité comparée aux températures enregistrées (et autres facteurs météorologiques) permettra de quantifier le niveau de surmortalité causée par les vagues de chaleur. Ces aspects sont essentiels pour déterminer l'ampleur de l'impact des vagues de chaleur sur la santé publique et pour protéger les parties touchées en conséquence. Par conséquent, la caractérisation précise de la surmortalité des vagues de chaleur est essentielle

pour identifier les besoins en matière de santé publique. En outre, nous avons la prétention de penser qu'une analyse plus approfondie des périodes de chaleur extrême et de leur impact sur la mortalité permettrait d'être plus minutieux dans la mise en place de plans de réponse aux urgences, offrant ainsi une protection accrue pour les populations vulnérables.

Notre travail continue par la section « Méthodologie et résultats », où nous expliquons en détail les méthodes utilisées pour analyser les données de mortalité et de température et présentons nos résultats. L'objectif de notre analyse est de quantifier de manière empirique les effets des vagues de chaleur sur la mortalité en Belgique et d'identifier quelles caractéristiques des vagues de chaleur aggravent leurs effets.

2 MÉTHODOLOGIE

2.1 Matériel

2.1.1 Zone d'étude

Située au cœur de l'Europe du Nord-Ouest, la Belgique, d'une superficie de 30 688 km², est limitrophe des Pays-Bas au nord, de l'Allemagne et du Luxembourg à l'est, et de la France au sud et à l'ouest. Son territoire s'étend également jusqu'à la mer du Nord, frontière naturelle qui joue un rôle dans le climat tempéré océanique qui caractérise le pays. Au 1er janvier 2024, la population légale belge comptait 11.763.650 habitants (13).

La majeure partie de notre travail porte sur le territoire belge dans sa globalité. Cependant, la discussion finale ouvrira une porte sur l'intérêt que peut amener le prolongement de notre travail en se concentrant sur des zones géographiques moins vastes.

2.1.2 Collecte de données

Pour réaliser les analyses statistiques nécessaires à la production des résultats de ce travail, nous avons utilisé deux jeux de données différents.

Le premier est un dataset de mortalité fourni par Statbel, l'office belge de référence en termes de statistiques (14). Il comprend le recensement de 3 431 580 décès en Belgique, du 1er janvier 1992 au 31 décembre 2023 et est le fruit de la fusion entre deux jeux de données (l'un s'arrêtant en 2015 et l'autre prenant le relais à partir de cette année-là). Après nettoyage et préparation de ces données, nous avons regroupé ces valeurs en 1 585 964 lignes comprenant chacune six variables :

- La date du décès
- Le sexe : 1 si c'est un homme et 0 si c'est une femme
- La classe d'âge, parmi 4 groupes que nous détaillerons plus tard
- Le lieu de résidence, avec un niveau 2 de précision de la NUTS¹, s'arrêtant au concept de provinces

¹ NUTS : Nomenclature d'Unité Territoriales Statistiques, c'est un référentiel de codage belge utilisé en statistiques pour répartir des données par régions, provinces, arrondissements administratifs et communes

- L'appartenance ou non à une période répertoriée comme étant liée à une vague de chaleur nationale
- Le nombre de décès propre à chaque ligne de notre dataset

Le second dataset est un jeu de données météorologiques récoltées grâce aux observations de l'Institut Royal Météorologique belge. Il est composé de 7304 valeurs journalières qui s'étendent du 1^{er} janvier 2004 au 31 décembre 2023 et sont centrées sur les valeurs mesurées à la station nationale de référence à Uccle. Ces données journalières sont chacune caractérisées par les sept variables suivantes :

- La date de la mesure
- Les températures atmosphériques moyenne, minimale et maximale
- La pression atmosphérique
- L'humidité relative
- Le niveau de précipitations

En exploitant le logiciel RStudio, nous avons fusionné les données de mortalité récupérées sur StatsBel et celles météorologiques en provenance de l'observatoire belge de référence. Pour ces dernières, nous avons récolté l'historique des périodes de vagues de chaleur afin de pouvoir les associer aux données démographiques en créant une variable binomiale qui différencie les jours associés aux vagues de ceux qui ne le sont pas.

2.2 Mise en place de la méthodologie

2.2.1 Définition de l'événement de vague de chaleur considéré

Avant de détailler nos méthodes de manipulation de données, il est important de définir ce que nous appellerons une vague de chaleur tout au long de ce travail. Nous avons vu précédemment que la définition globale de l'OMM n'était pas la même que celle utilisée à l'échelle d'un pays. Dans le cadre de notre approche qui exploite des données nationales, nous nous baserons sur la définition scientifique belge de l'IRM citée précédemment, à savoir que « l'Institut Royal Météorologique (IRM) qualifie une période de chaleur nationale lorsque les températures maximales à Uccle atteignent au moins 25,0°C pendant une période d'au moins 5 jours consécutifs, avec au moins trois de ces jours dépassant les 30,0°C (NB : c'est ce qu'on appelle des jours tropicaux) ».

Dans le but d’avoir une vision globale de ces événements, il nous semblait donc indispensable de dresser l’historique des vagues de chaleur en Belgique, avec la station météorologique d’Uccle comme référence. C’est le travail que réalise le site Météo Belgique depuis maintenant plusieurs dizaines d’années (15) en détaillant pour chacune de ces périodes sa durée, son poids, son intensité et d’autres détails climatiques. Nous avons isolé les années concernées par notre étude dans un tableau annexé à ce travail (cf. *Annexe 2*). Pour la suite de ce mémoire, nous nous baserons sur ces données météorologiques, à partir de 1992, pour définir la temporalité des vagues de chaleur en Belgique au niveau de l’analyse des données nationales.

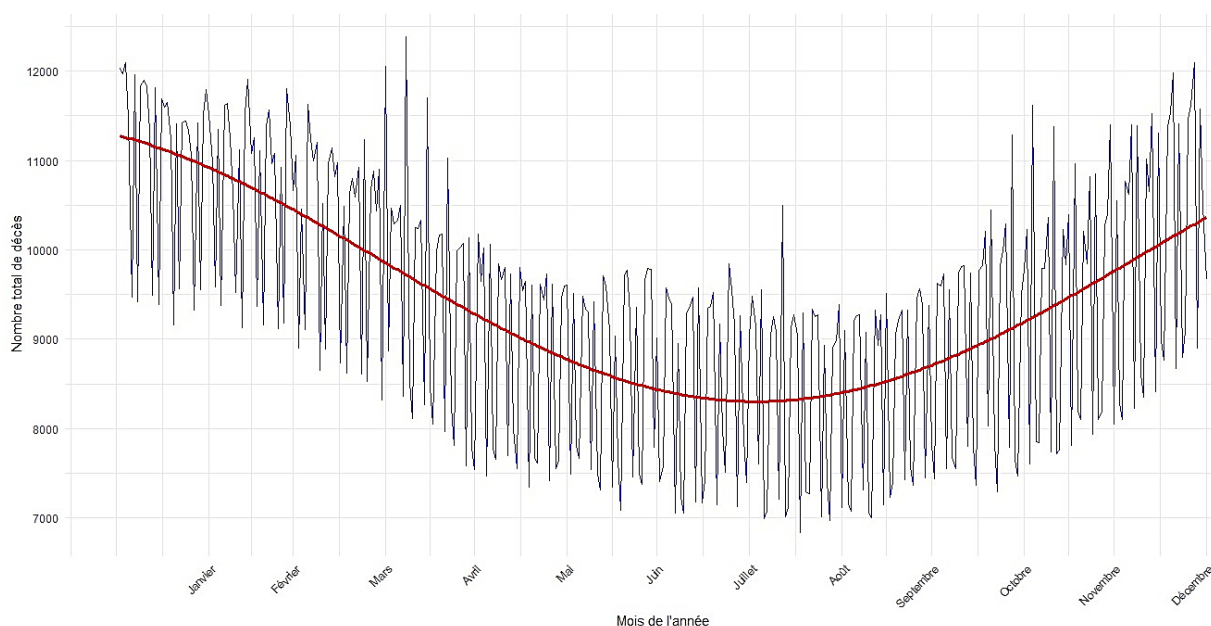
2.2.2 Gestion des biais et lag

Dans le but de diminuer le risque de tirer des conclusions biaisées, nous avons listé dans cette section certains biais auxquels nous avons songé en amont du travail et d’autres auxquels nous avons été confrontés durant notre travail. Pour chacun de ceux-ci, nous expliquons également la méthode utilisée pour effacer au maximum leur influence sur nos résultats.

A. Saisonnalité

Le graphique suivant montre une évolution du nombre total de décès en Belgique sur une période de 28 ans (1992-2020), avec une granularité journalière. La courbe rouge représente une tendance générale de la mortalité sur l’année, calculée à partir de la tendance évolutive des valeurs quotidiennes du 1^{er} janvier au 31 décembre.

Figure 3. Total cumulé de la mortalité par jour de l’année (1992-2020)



Nous constatons que la mortalité au cours de temps suit un cycle annuel assez régulier. En effet, nous observons une variation saisonnière très nette de la mortalité, avec des pics généralement en hiver et des creux en été. Une nouvelle fois, les variations de mortalité observées peuvent s'expliquer par plusieurs facteurs, certains liés à des phénomènes naturels, d'autres à des facteurs sociaux et environnementaux :

- **Conditions météorologiques :** En hiver, les températures froides, l'humidité et les épisodes de grippe ou de virus respiratoires sont associés à une augmentation de la mortalité, en particulier chez les personnes âgées ou fragiles. (16)
- **Diminution de l'activité en plein air :** Une diminution de l'activité physique en hiver peut favoriser l'apparition de certaines maladies et augmenter le risque de décès.

La courbe rouge ci-dessus est utilisée au long de notre travail comme fonction sinusoïdale de référence pour représenter la saisonnalité de la mortalité. Son équation est la suivante :

$$f(x) = \alpha \sin \beta (x-\gamma) + \varepsilon, \text{ avec :}$$

α = amplitude des variations saisonnières

β = fréquence de la sinusoïde

γ = décalage de phase (permet d'aligner les pics et les creux avec les données réelles)

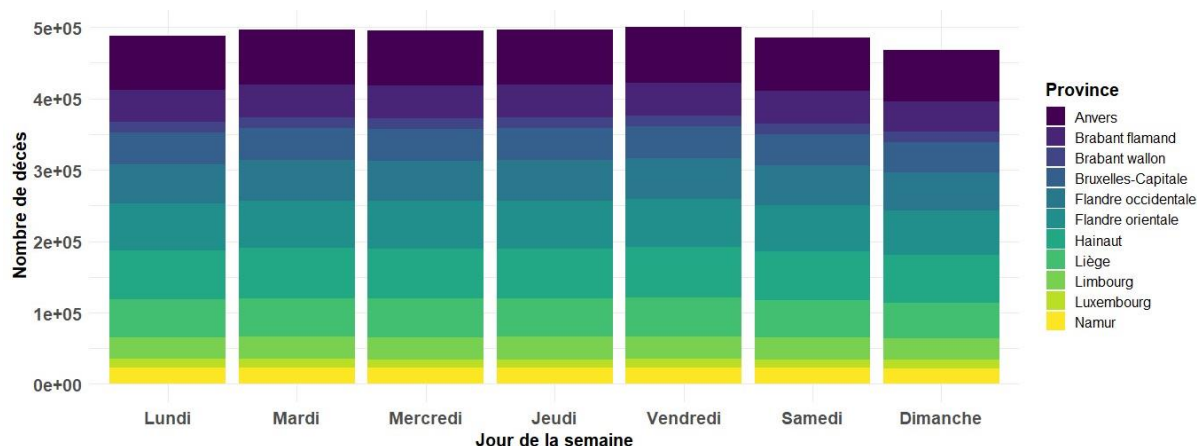
ε = ligne de base/offset (permet d'ajuster la sinusoïde verticalement pour qu'elle s'aligne avec la moyenne des décès)

La fonction `nlsLM` du package *minpack.lm* dans RStudio (cf. Annexe 3) permet, via un algorithme informatique résolvant les problèmes des moindres carrés non-linéaires, d'ajuster correctement cette fonction sinusoïdale au type de données que nous exploitons. Nous avons intégré cette équation à nos modèles statistiques dans le but d'effacer l'effet saisonnier de la mortalité afin que celui-ci ne biaise pas nos résultats.

B. « Weekend effect »

Pour continuer, il est intéressant de mentionner une variabilité dans la mortalité observée en fonction du jour de la semaine. Le graphique ci-dessous illustre les variations du nombre de décès en Belgique, en fonction du jour de la semaine et de la province. Chaque bâtonnet représente le nombre total de décès par jour, et les différentes couleurs correspondent aux différentes provinces belges. La superposition des couleurs permet de visualiser la contribution de chaque province au nombre total de décès pour chaque jour.

Figure 4. Mortalité par jour de la semaine et par province belge (1992-2020)



Durant la période étudiée, en additionnant tous les décès propres à chacun des 7 jours de la semaine, nous constatons des valeurs relativement semblables de mardi à vendredi (avec un maximum hebdomadaire pour ce dernier-jour), mais qui se voient diminuer entre le samedi et le lundi, avec un minimum le dimanche. C'est cette variabilité que nous appellerons le « weekend effect ».

Les différences de mortalité observées entre les différents jours de la semaine sont intrigantes et mériteraient une analyse plus approfondie. Même si ce n'est pas le sujet de notre travail, nous avons réfléchi à plusieurs pistes pouvant expliquer ces variations :

- a) **Effet du week-end et des jours fériés (sous-déclaration ou retards dans la déclaration) :** il est possible qu'un nombre moins important de décès soit déclaré les week-ends et les jours fériés en raison d'une activité administrative réduite. Les décès survenant les week-ends ou les jours fériés pourraient être déclarés avec un certain retard, ce qui fausserait la répartition des décès sur la semaine.
- b) **Variations de l'activité médicale (moindre activité) :** les hôpitaux connaissent une activité réduite les week-ends, ce qui pourrait entraîner un report de certaines interventions et ainsi influencer sur la date exacte de certains décès.

Notons bien que si notre objectif était d'obtenir une compréhension plus complète des variations observées, et comme pour l'aspect saisonnier de la mortalité, il serait nécessaire de mener une étude plus approfondie, en croisant ces données avec d'autres variables (âge, sexe, cause de décès, etc.). Toujours est-il que nous tiendrons compte de cette différence de mortalité journalière en la pondérant dans nos utilisations de données journalières à venir. En partant des

totaux de mortalité propres à chaque jour de la semaine, nous leur avons attribué des coefficients de multiplication pour compenser les différences existantes afin que nos résultats ne soient pas biaisés par celle-ci. Notons évidemment que lors de la manipulation des valeurs sur une échelle hebdomadaire, ce biais ne sera pas pertinent à prendre en compte.

C. Notion de lag

Concept rencontré tout au long de notre revue de littérature, nous ne pouvions mettre de côté la prise en compte de lag dans les résultats de notre étude. Un lag est le délai entre un événement d'exposition (ici, une période de températures extrêmes) et l'impact observé de celui-ci (en l'occurrence, une potentielle augmentation de la mortalité). En d'autres termes, c'est le temps écoulé entre le moment où la population belge est exposée à une vague de chaleur et le moment où les effets de cette exposition deviennent visibles.

Afin de travailler en tenant compte de ce fait, nous avons utilisé la méthode de Gasparrini pour les modèles non linéaires à retards distribués, *Distributed Lag Non-Linear Models* ou *DLNM* (17). Elle améliore les résultats de nos modèles en tenant compte des lags. En effet, Antonio Gasparrini a démontré que les effets d'une température extrême sur la santé peuvent ne pas se manifester immédiatement mais après plusieurs jours. Les DLNM permettent de modéliser ces effets différés de manière précise.

De plus, et contrairement aux modèles de retards linéaires simples, les DLNM offrent la flexibilité de modéliser des relations non linéaires entre l'exposition et la réponse. Cette flexibilité est essentielle lorsque la relation entre la variable prédictive et la réponse n'est pas strictement linéaire, ce qui s'avérera être le cas en observant les résultats de l'analyse de corrélation à venir.

Enfin, les méthodes plus simples, comme les moyennes mobiles sur des périodes fixes, peuvent introduire des biais en supposant que chaque exposition précédente contribue de la même manière à l'effet total. Les DLNM, en revanche, permettent de modéliser les contributions variables des expositions passées, réduisant ainsi les risques de biais d'estimation.

2.3 Approche méthodologique

Afin de faciliter la compréhension logique de notre avancée progressive en termes de résultats statistiques, il nous semblait opportun de résumer et de justifier les différentes parties composant la section « résultats » de notre travail.

Après un court nettoyage de nos données, celles-ci étant globalement très propres, et après s'être assuré de la cohérence de celles-ci entre nos différents jeux de données, nous avons fusionné le dataset de mortalité et celui météorologique afin de reprendre l'entièreté de nos variables dans un seul et même tableau.

Nous avons ensuite entamé notre travail de manipulation de données par l'analyse descriptive de celles-ci, en observant la distribution des décès au cours du temps, et leur répartition par classe d'âge. Il s'en est suivi une mise en relation des données de température avec la courbe de mortalité pour comparer plus finement le rapport entre élévation du thermostat et pics de mortalité. Dans cette même section, nous avons comparé via deux boxplots la différence de décès entre les jours associés à des vagues de chaleur répertoriées par l'IRM, et les autres jours. La significativité de cette comparaison fut évaluée par un test de rangs de Wilcoxon.

Nous avons continué par une brève analyse de corrélation brute entre la température maximale journalière et la mortalité durant la période étudiée. L'objectif de celle-ci était de définir dans quelle mesure les deux variables analysées étaient corrélées linéairement ou non. Cela nous a permis d'illustrer l'importance d'exploiter un ensemble de variables pour nuancer cette présumée corrélation entre chaleur extrême et mortalité.

Nous avons conclu notre travail par la modélisation statistique de la relation entre le nombre de décès et les variables potentiellement explicatives. Nous avons réalisé ceci en implémentant nos données dans un modèle de régression multiple non-linéaire. Nous avons ensuite vérifié la significativité globale du modèle et avons évalué la capacité de prédiction de celui-ci par validation croisée en observant l'erreur quadratique moyenne (RMSE) appliquée à notre modèle. Après cela, nous avons conclu l'analyse de nos résultats par l'interprétation des variables composant notre modèle DLNM.

3 RÉSULTATS

3.1 Analyse descriptive

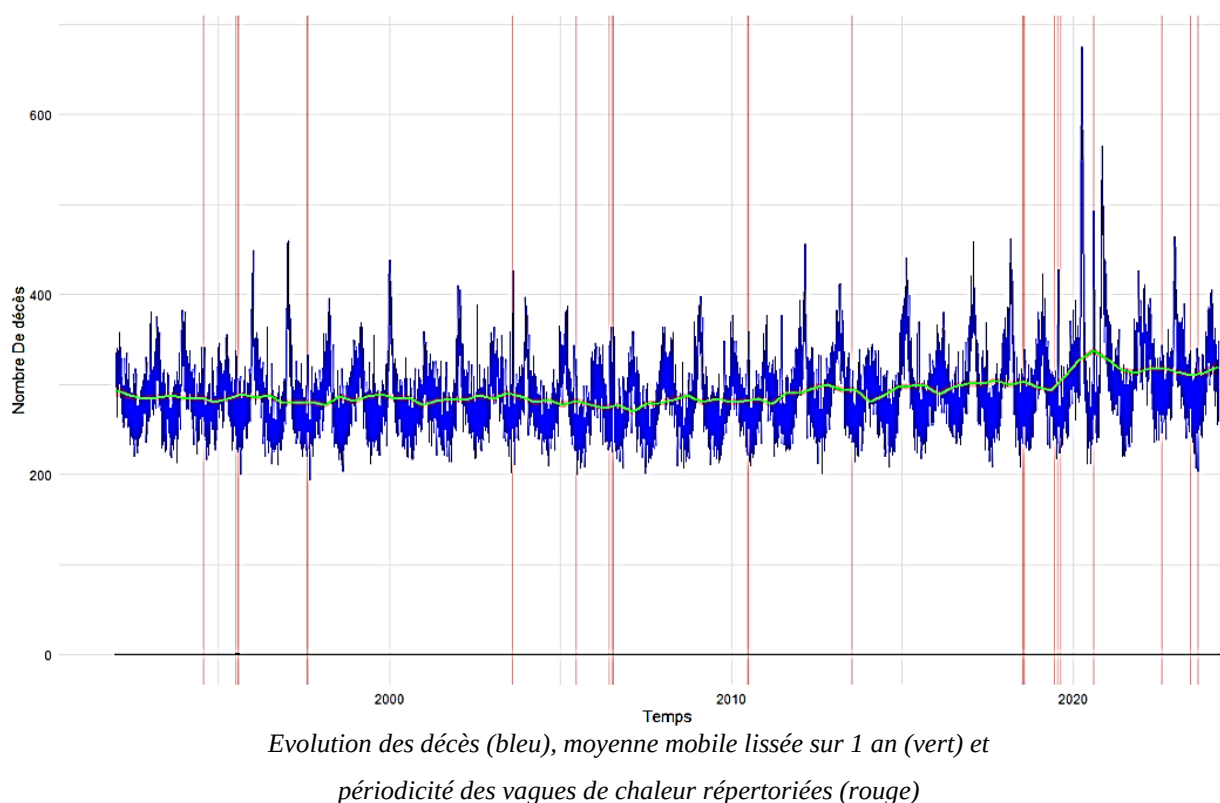
3.1.1 Premières observations

Dans un premier temps, nous avons travaillé sur la partie démographique de nos données de mortalité, analysant séparément les relations entre chaque variable (âge, sexe, localisation, etc.) et le nombre de décès associés à celles-ci. Cela nous a amené à la réalisation de nombreux graphes, qui sont étalés sur une période allant du 1^{er} janvier 1992 au 1^{er} janvier 2020. Le choix de cette échelle n'est pas anodin. Tout d'abord, nous sommes partis de l'année 1992 car nous n'avions pas accès à des données antérieures à cette année-là et qui étaient aussi complètes que celles utilisées dans ce travail. Ensuite, nous ne voulions pas voir nos données de mortalité biaisées par l'impact du Covid-19, d'abord en termes de nombre de décès mais aussi en raison du biais d'analyse que pouvait constituer les périodes de confinement dans l'exposition de la population aux aléas météorologiques. Nous avons donc décidé de nous arrêter avant les premiers cas d'infection au coronavirus en Belgique, qui se situent en février 2020 (18).

Notez cependant que, pour les premiers graphes, dont les manipulations statistiques assez simples n'étaient pas biaisées par les valeurs anormales dues au coronavirus, nous avons intentionnellement conservé cette période afin d'en observer l'impact, par curiosité et dans le but de conscientiser le lecteur sur l'impact mortel d'une vague bien différente de celles que nous analyserons tout au long du travail.

Tout d'abord, nous avons simplement exprimé le nombre de décès journaliers enregistrés par Statsbel de 1992 à 2024, ajoutant une moyenne mobile lissée sur un an, tout en superposant au graphe ainsi construit les périodes de vagues de chaleur (en rouge ci-dessous) recensées par l'IRM au cours de cette période. Cela offre un aperçu global du cadre de travail dans lequel nous allons nous plonger maintenant.

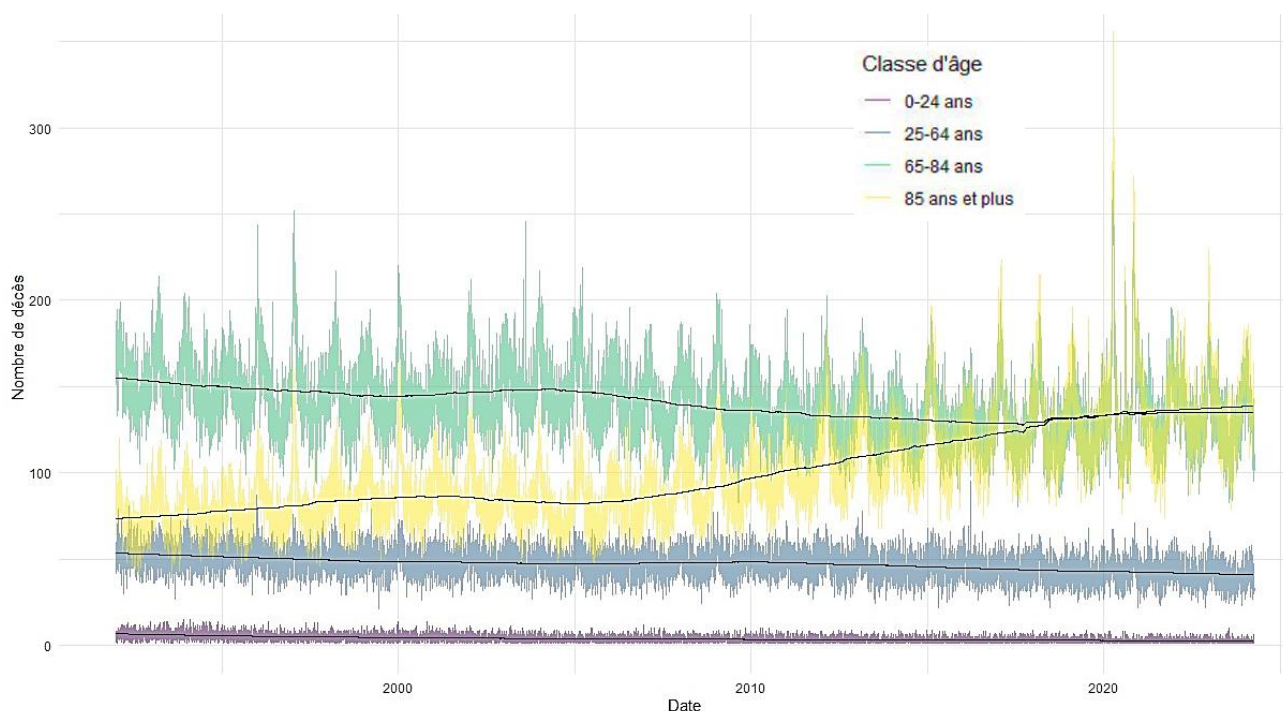
Figure 5. Mortalité journalière et répartition des vagues de chaleur (1992-2024)



En regardant ce graphe, nous observons déjà au premier coup d'œil que la mortalité présente un pic, plus ou moins conséquent, à l'arrivée de la plupart de ces vagues de chaleur. Nous remarquons aussi, un phénomène plus général d'onde mortelle qui se répète de manière fortement similaire au cours des années. Cette récurrence saisonnière de maxima et minima dans le nombre de décès belges est un effet de saisonnalité à ne pas négliger. Nous détaillerons plus tard la manière avec laquelle nous avons décidé de neutraliser cet effet afin qu'il ne vienne pas biaiser nos analyses.

Par la suite, nous avons incorporé d'autres variables à la relation. La première d'entre elle fut l'âge des individus décédés. Nous avons regroupé les personnes décédées selon les classes d'âge utilisées par Sciensano dans ses précédents travaux d'analyse de surmortalité à l'échelle de la population globale. Cela nous donne les 4 classes d'âges suivantes : 0-24 ans, 25-64 ans, 65-84 ans et 85 ans et plus, avec une moyenne mobile lissée sur 5 ans pour chacune des classes. Comme nous pouvons le voir dans la figure ci-dessous, ce sont assez logiquement les deux dernières catégories qui sont les plus touchées, chacune d'entre elles suivant la saisonnalité annuelle précédemment observée.

Figure 6. Évolution journalière de la mortalité par classe d'âge (1992-2024)



Nous pouvons également remarquer que la classe des 65-84 ans, qui était plus à risque que toutes les autres dans les premières années de notre analyse, se voit rattrapée petit à petit par celle des 85 ans et plus. Cela peut s'expliquer, selon nous, par le fait que l'espérance de vie ne cesse d'augmenter, ce qui entraîne une augmentation du nombre de personnes vivant au-delà de 84 ans, et donc, une diminution proportionnelle des décès entre 65 et 84 ans.

Pour cette analyse relationnelle, nous avons une nouvelle fois prolongé nos données au-delà de l'année 2020 afin de pouvoir observer l'impact de la pandémie Covid-19 sur les différentes classes d'âge. Il semble presque anodin pour les personnes les plus jeunes mais amène, comme attendu, à une explosion chez les personnes composant nos deux catégories d'âge plus avancé, illustrée par des pics de mortalité très élevés durant cette période. Nous pouvons aussi deviner en observant l'extrémité droite de notre représentation graphique, que ces valeurs reviennent à la normale ces derniers mois, semblant reprendre la tendance présente avant les années 2020-2022.

3.1.2 Inclusion des données météorologiques

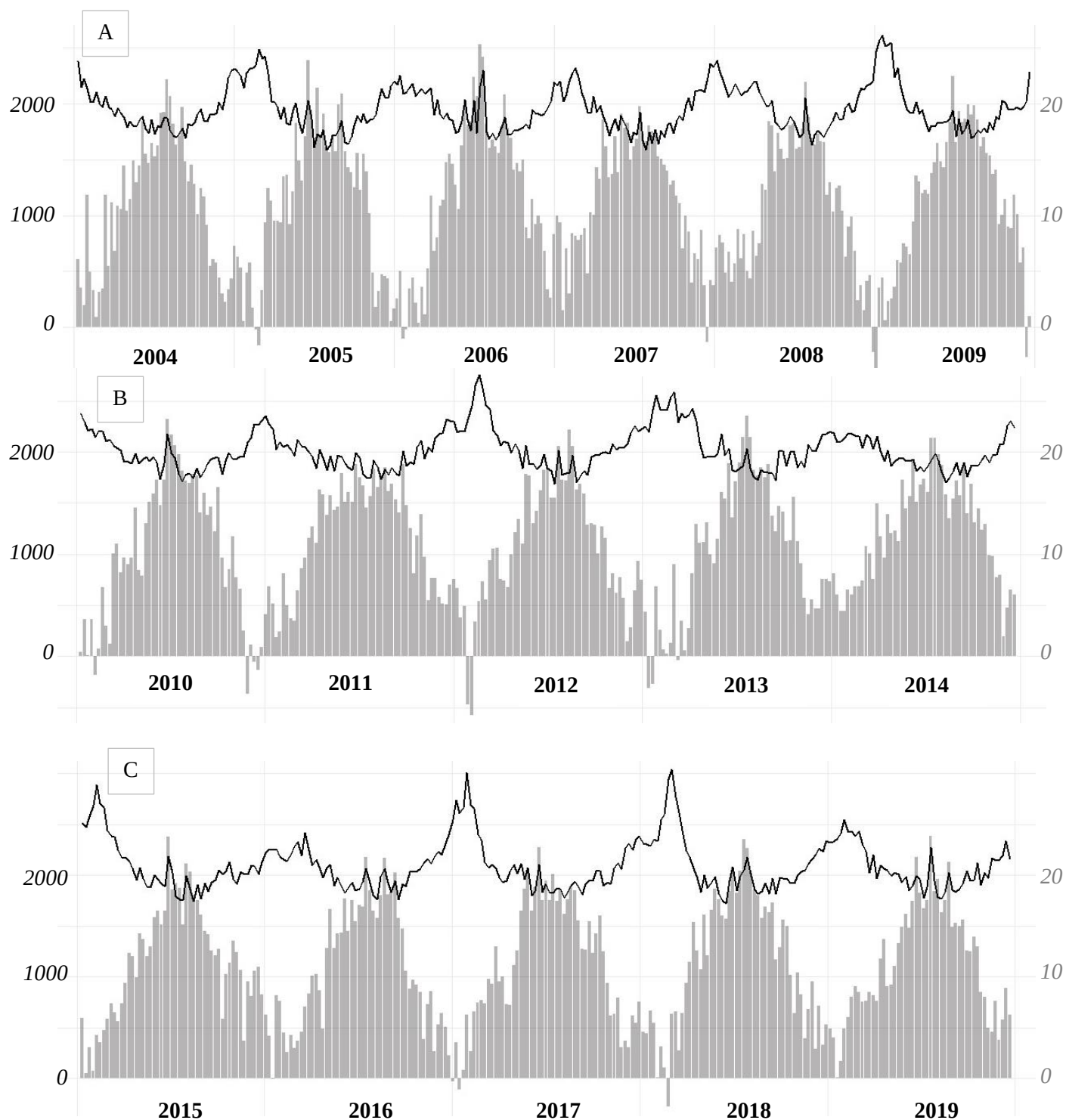
Avant de commencer cette section, précisons que les données météorologiques complètes (température journalière moyenne/maximale/minimale, précipitations, humidité relative, etc.) n'étaient disponibles que pour la période 2004-2019. Bien que l'historique des vagues de chaleur belges nous permette de remonter plus loin dans le temps pour déterminer si un jour est associé à une vague de chaleur ou non, nous n'aurons pas de détail météorologique précis pour toute analyse poussée à des années antérieures à 2004.

Notre première idée de manipulations statistiques fut de créer un graphe à deux entrées pour évaluer la relation hebdomadaire entre mortalité et température moyenne en fonction du temps (*Figure 7* à la page suivante), afin de déterminer si une tendance se dégageait à ce niveau. Nous avons divisé la période 2004-2019 en trois sous-périodes (2004-2009, 2010-2014 et 2015-2019) pour une meilleure visualisation des résultats. Nous avons ensuite représenté l'évolution de mortalité sous forme d'un tracé noir, et les températures moyennes sous forme de bâtonnets gris.

Nous connaissons depuis la nuit des temps le schéma saisonnier de la température belge, bien que celui-ci soit de plus en plus perturbé par l'impact de l'activité humaine sur notre planète. En ce qui concerne la saisonnalité de la mortalité, celle-ci a déjà été abordée dans notre méthodologie. Nous ne sommes donc pas étonnés au premier coup d'œil sur cette figure. Il semble y avoir une relation inverse entre la température et la mortalité : les périodes de températures élevées (été) correspondent souvent à des périodes de mortalité plus faible, tandis que les périodes de températures basses (hiver) correspondent à des périodes de mortalité plus élevée.

Cependant, nous remarquons que chaque valeur de température hebdomadaire moyenne dépassant les 20°C entraîne un pic sur la courbe de mortalité, témoin d'une potentielle corrélation entre ces deux variables. Les pics de mortalité observés en été peuvent être corrélés avec les vagues de chaleur, bien que cette figure ne permette pas de tirer des conclusions définitives sur ce point sans une recherche plus détaillée. C'est ce qui nous a poussé à effectuer une analyse de corrélation afin de quantifier la force et la direction de la relation entre ces deux variables, nous donnant une première indication quant à leur association.

Figure 7. Comparaison de la mortalité et de la température moyenne hebdomadaire en Belgique, 2004-2009 (A), 2010-2014 (B), 2015-2019 (C)



*Tracé noir : mortalité en nombre de décès par semaine (valeurs sur l'axe vertical gauche) ;
Bâtonnets gris : température moyenne hebdomadaire en °C (valeurs sur l'axe vertical droit)*

3.1.3 Résidus et analyse de corrélation

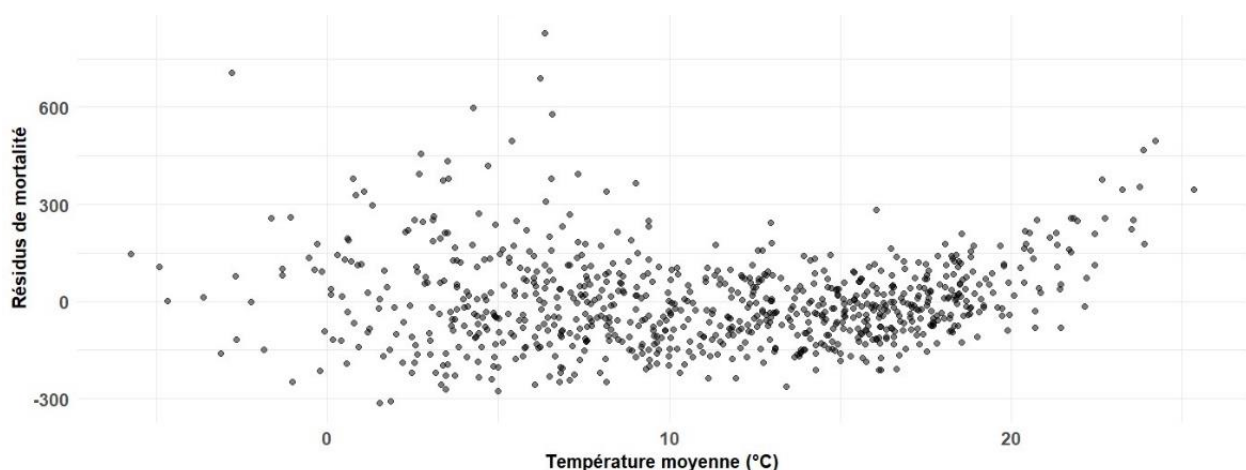
Pour commencer, nous avons calculé le coefficient de corrélation de Pearson entre la température atmosphérique hebdomadaire moyenne et le nombre de décès sur la période 2004-2019 : $r = -0.0514$, avec une p-valeur $< 2.2e-16$.

Le signe négatif du coefficient de corrélation indique ici une relation inverse entre la température et le nombre de décès. Cela signifie que, généralement, à mesure que la température augmente, le nombre de décès tend à diminuer légèrement. Cependant, cette relation hautement significative d'un point de vue statistique est très faible étant donné sa valeur très proche de zéro. En pratique, une corrélation aussi faible suggère que la température moyenne n'a pas un impact significatif sur le nombre de décès, au moins pas de manière linéaire. Nous en avons déduit que la relation entre température et mortalité est non linéaire ou plus complexe que ce qu'une simple corrélation linéaire peut capturer.

Pour évaluer de manière plus précise la relation entre la chaleur et les pics de mortalité tout en prenant en compte l'effet de saisonnalité, nous avons ajusté aux données de mortalité la fonction sinusoïdale présentée précédemment (cf. *Figure 3* et équation associée). Celle-ci a été ajustée aux données de mortalité hebdomadaire en utilisant un modèle non-linéaire (nlsLM), les résidus sont ensuite calculés comme la différence entre les valeurs observées et les valeurs prévues par la fonction sinusoïdale.

A partir de là, un graphique a été créé pour montrer la relation entre la température et les résidus de mortalité, ce qui nous permet d'obtenir le nuage de points suivants :

Figure 8a. Répartition des résidus de mortalité en fonction de la température hebdomadaire moyenne (2004-2019)

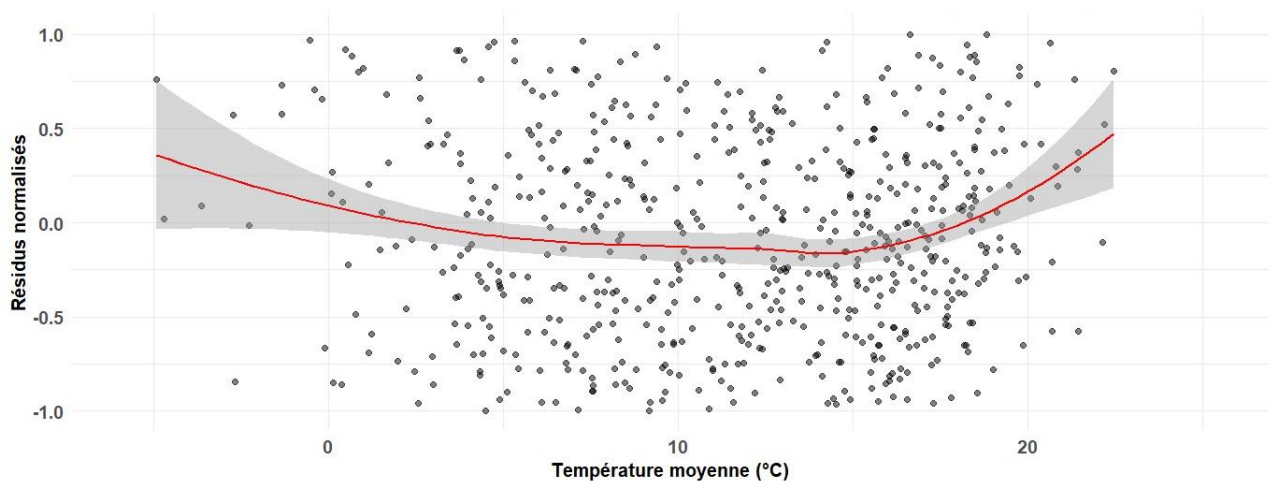


En partant de l'observation de ce graphe, nous pouvons en déduire deux tendances : il y a absence de corrélation linéaire et le modèle sinusoïdal est approprié. En effet, la majorité des points sont proches de zéro, ce qui indique qu'il n'y a pas de tendance claire ou forte relation linéaire entre la température moyenne et les résidus de mortalité pour la plus grande partie des valeurs de ce graphe. Sur base de cette analyse, et confirmant les résultats de notre test de corrélation, la température moyenne n'explique donc pas de manière significative les variations de mortalité après avoir pris en compte l'effet saisonnier.

Cela étant dit, notre modèle sinusoïdal semble bien capturer la saisonnalité de la mortalité, puisque les résidus sont en grande partie non systématiques et distribués de manière aléatoire autour de zéro. Cependant, à l'extrémité droite du graphe, et donc à des températures plus élevées, nous observons une tendance des résidus à augmenter par rapport aux valeurs thermiques du ventre mou.

Afin d'avoir un aperçu plus ample sur cette relation entre température moyenne et résidus, nous avons retranscrit ces derniers sur une échelle normalisée (allant de -1 à 1) et avons ensuite tracé une courbe de tendance lissée pour observer les fluctuations résiduelles au gré du thermomètre.

Figure 8b. Répartition des résidus normalisés de mortalité en fonction de la température hebdomadaire moyenne (2004-2019) et courbe de tendance lissée



Le graphique obtenu présente la corrélation entre la température moyenne hebdomadaire et les résidus de mortalité, avec les résidus ajustés sur une échelle allant de -1 à 1. La ligne rouge représente une tendance lissée (utilisant la méthode *loess* sur RStudio) des résidus de

mortalité en fonction de la température moyenne. On observe une courbe en forme de U, indiquant que les résidus de mortalité tendent à augmenter aux extrêmes des températures (très basses et très hautes) par rapport aux températures modérées.

À des températures très basses (en dessous de 0 °C), les résidus de mortalité sont positifs, suggérant une augmentation de la mortalité par rapport à la moyenne attendue après ajustement saisonnier². De même, à des températures élevées (au-dessus de 20 °C), les résidus de mortalité augmentent également, indiquant une surmortalité lors de périodes de chaleur intense. Entre environ 0 °C et 20 °C, la ligne rouge est relativement plate et proche de zéro, ce qui laisse penser que la mortalité ajustée est proche de la moyenne attendue pour ces températures-là. Cela indique qu'il n'y a pas de variation significative de la mortalité à ces températures.

En parallèle de cela, nous observons une dispersion assez importante des données. Les points noirs représentent les résidus de mortalité pour chaque semaine, montrant la variabilité de ceux-ci. La dispersion semble plus importante à des températures plus extrêmes, ce qui pourrait être le fruit d'effets environnementaux qui perturbent la normale. La bande grise autour de la ligne rouge représente quant à elle l'intervalle de confiance, montrant l'incertitude autour de la tendance lissée. Nous observons que cet intervalle s'élargit aux extrêmes des températures, indiquant une plus grande incertitude dans les estimations des résidus de mortalité à ces températures. Cela est probablement dû à la plus faible quantité de données mesurées pour de telles extrêmes en comparaison à des températures plus proches de la moyenne.

Encore une fois, la corrélation globale entre la température moyenne et les résidus de mortalité est très faible (0.03), ce qui suggère qu'il n'y a pas de corrélation linéaire forte entre ces variables sur l'ensemble de la période étudiée. Cependant, la forme non linéaire de la relation (courbe en U) indique que les analyses doivent prendre en compte ces variations non linéaires pour comprendre pleinement les impacts des températures extrêmes sur la mortalité.

En conclusion, la figure 8b montre que les températures extrêmement basses et élevées sont associées à une augmentation des résidus de mortalité, ce qui suggère une surmortalité due à des conditions climatiques défavorables. La forme en U de la courbe lissée indique que la relation entre température et mortalité n'est pas linéaire, et nous en tiendrons compte dans les manipulations à venir. Enfin, bien que la corrélation linéaire soit faible, l'analyse visuelle montre des tendances importantes qui seraient masquées si nous nous étions limités à une simple analyse de corrélation linéaire, preuve de l'intérêt apporté par la création et l'observation

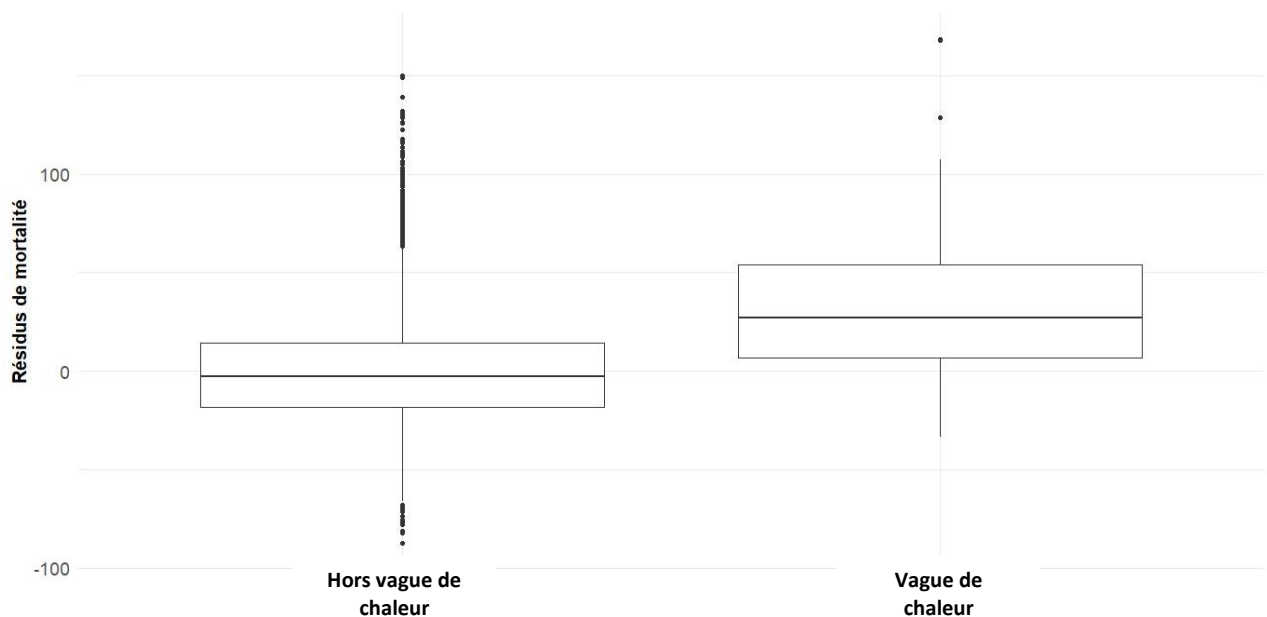
² NDA : c'est une tendance que nous avons déjà tenté d'expliquer au point 2.2.2.A de notre travail.

des deux dernières figures. Nous nous sommes alors mis en tête d'explorer des segments de données spécifiques, comme les jours de vagues de chaleur, afin de révéler des relations plus significatives.

3.1.4 Regard sur les jours de vagues de chaleur répertoriés par l'IRM

Pour cette dernière partie de notre analyse descriptive, nous sommes partis sur l'idée de comparer la mortalité durant les jours associés à des vagues de chaleur répertoriées en Belgique avec celle des autres jours. Partant de l'historique météorologique des périodes de vagues de chaleur recensées par l'IRM, nous avons classés chaque jour entre 1992 et 2020 selon leur association à une vague ou non. Cela nous a permis, après avoir soustrait à nos résultats la fonction sinusoïdale représentant la saisonnalité des décès, de dessiner les boxplots suivants (Figure 9). Nous avons ensuite effectué un test de Wilcoxon afin de nuancer les résultats obtenus.

Figure 9. Boxplots comparatifs des résidus de mortalité entre les jours de vague de chaleur et les jours sans vague de chaleur (1992-2020)



Notre fonction sinusoïdale capture efficacement la saisonnalité de la mortalité, avec une forte significativité des paramètres de la fonction. A titre d'information, voici les caractéristiques de celle-ci adaptée aux données de mortalité journalière :

Paramètre	Estimation	t value	Pr(> t)
α (amplitude)	42.82	34.15	< 2e-16 ***
β (fréquence)	0.01212	39.58	< 2e-16 ***
γ (déphasage)	-171.0	-17.21	< 2e-16 ***
ε (décalage vertical)	300.8	208.72	< 2e-16 ***

Tous ces paramètres sont hautement significatifs ($p < 2 \times 10^{-16}$), ce qui indique que le modèle sinusoïdal est bien ajusté pour capturer la saisonnalité de la mortalité. Dans le but de comparer les deux échantillons, nous avons utilisé le test des rangs de Wilcoxon afin de déterminer s'ils proviennent de populations identiques ou si l'une des populations tend à avoir des valeurs différentes de l'autre. Voici les résultats du test ainsi effectué :

- **Statistique de test:** $W=1652089$
- **p-value:** $< 2.2 \times 10^{-16}$

Dans notre cas, la valeur élevée de W indique une grande différence entre les deux échantillons comparés, confirmant ainsi ce que nous pouvions déjà observer visuellement. La p-value associée au test de Wilcoxon est quant à elle très petite. Cela signifie que nous rejetons l'hypothèse nulle avec une très forte certitude. En d'autres termes, il existe une différence statistiquement significative entre les résidus de mortalité des jours de vague de chaleur et ceux des jours sans vague de chaleur. Ce rejet de l' H_0 indique que les vagues de chaleur augmentent la mortalité, même après ajustement pour la saisonnalité.

Le boxplot représenté sur la figure 9 offre une représentation visuelle de cette différence. On observe que la médiane des résidus de mortalité est plus élevée pour les jours de vague de chaleur que pour les jours sans vague de chaleur. Les étendues interquartiles sont également différentes, avec une plus grande dispersion des résidus pour les jours de vague de chaleur.

Le test de Wilcoxon fournit une preuve statistique solide que les vagues de chaleur ont un impact significatif sur la mortalité. En effet, les jours de vague de chaleur sont associés à une augmentation des résidus de mortalité, même après avoir ajusté les effets saisonniers.

Au vu de ces résultats, une analyse plus détaillée, comme une régression multiple tenant compte d'autres variables (telles que celles préparées dans nos deux datasets principaux) nous a dès lors semblé nécessaire afin d'offrir une meilleure compréhension de la relation entre température et mortalité.

3.2 Analyse de régression non-linéaire ³

Pour approfondir notre étude de l'impact des variations de la température maximale de l'air sur le nombre de décès, nous nous sommes basés sur la méthode statistique de Gasparrini qui utilise les modèles de délais non linéaires distribués (DLNM). Cette approche, déjà préfacée en abordant la notion de lag dans notre méthodologie, permet de capturer les effets complexes et retardés de la température sur des résultats de santé tels que la mortalité. C'est d'ailleurs sur base de deux des travaux réalisés par l'épidémiologiste italien que nous avons défini la valeur des paramètres à inclure dans notre modèle, tels que la durée du lag à explorer ou encore les degrés de liberté des splines qui le composent (16) (19).

Construction de la base croisée (cross-basis): nous avons défini une base croisée pour la température maximale de l'air, en utilisant un lag de 21 jours maximum. Selon Gasparrini, c'est en effet un délai suffisant que pour observer les effets retardés d'une vague de chaleur et permettre la collecte de données à moyen terme.

Pour représenter les variations de la température, nous avons utilisé des B-spline (bs) de degré 3, et pour les lags, des splines naturelles (ns) avec 3 degrés de liberté ont été employées, ces recommandations nous donnant donc un total de 9 degrés de liberté. En spécifiant les degrés de liberté dans les arguments *argvar* et *arglag*, nous utilisons des splines naturelles avec trois degrés de liberté. Cela signifie que nous autorisons la courbe représentant l'effet de la température maximale, ou l'effet du décalage temporel, à avoir une forme plus complexe qu'une simple ligne droite, mais avec un nombre limité de points d'inflexion. Ce choix nous permet de capturer des relations non linéaires tout en évitant un surajustement du modèle.

```
R
Cb_temp <-crossbasis(mortality_meteo_filtered$air_temperature_max,
lag = 21, argvar = list(fun = "bs", degree = 3),
arglag = list(fun = "ns", df = 3)) 4
```

Ajustement du modèle DLNM: nous avons ajusté un modèle de régression linéaire généralisée (GLM) avec une famille quasipoisson pour tenir compte de la surdispersion dans les données de mortalité. Le modèle inclut la base croisée pour la température et des variables

³ NDA : au cours de cette section, nous avons utilisé l'intelligence artificielle ChatGPT pour faciliter une partie de l'analyse des résultats de notre modèle DLNM

de contrôle telles que la localisation géographique, le sexe et la classe d'âge des personnes décédées (avec comme classe de référence celle des moins de 25 ans). La variable dépendante n'est autre que le nombre de décès ajusté à l'effet de saisonnalité de la mortalité afin d'éviter que ce dernier ne biaise nos résultats.

```
R
model <- glm(Nombre_de_décès_adj ~ cb_temp + Localisation + Sexe +
Classe_d_age_combinee, family = quasipoisson(), data =
mortality_meteo_filtered)5
```

Tableau 2. Coefficients, erreur standard et p-valeur des différentes variables composant notre modèle DLNM

<i>Variables</i>	<i>Estimation</i>	<i>Erreur std.</i>	<i>p-valeur</i>
<i>Intercept</i>	0.343	0.015	<0.001
<i>cb_tempv1.l1</i>	-0.004	-0.020	0.020
<i>cb_tempv1.l2</i>	0.005	0.008	0.008
<i>cb_tempv1.l3</i>	-0.002	0.011	0.011
<i>cb_tempv2.l1</i>	0.019	0.050	0.050
<i>cb_tempv2.l2</i>	0.013	0.019	0.019
<i>cb_tempv2.l3</i>	-0.015	0.029	0.029
<i>cb_tempv3.l1</i>	0.030	0.028	0.028
<i>cb_tempv3.l2</i>	0.011	0.010	0.010
<i>cb_tempv3.l3</i>	0.015	0.016	0.016
<i>Sexe</i>	0.110	0.001	<0.001
<i>Localisation</i>	<0.001	<0.001	<0.001
<i>25-64 ans</i>	0.249	0.007	<0.001
<i>65-84 ans</i>	0.694	0.006	<0.001
<i>85 ans et +</i>	1.230	0.006	<0.001

Déviance nulle : 361111 sur 493683 dl ;Déviance résiduelle : 288808 sur 493669 dl

Erreur quadratique moyenne (RMSE) : 1.45362

Les coefficients obtenus pour le modèle ajusté sont présentés dans le tableau ci-dessus. Mais avant de les interpréter, précisons la valeur des indicateurs de performance de notre modèle.

⁵ **Nombre_de_décès_adj** : résidus du nombre de décès journalier après ajustement de la saisonnalité de la mortalité

cb_temp : Représente les effets retardés et non linéaires de la température maximale.

Sexe, Localisation, Classe_d_age_combinee : Variables de contrôle démographiques.

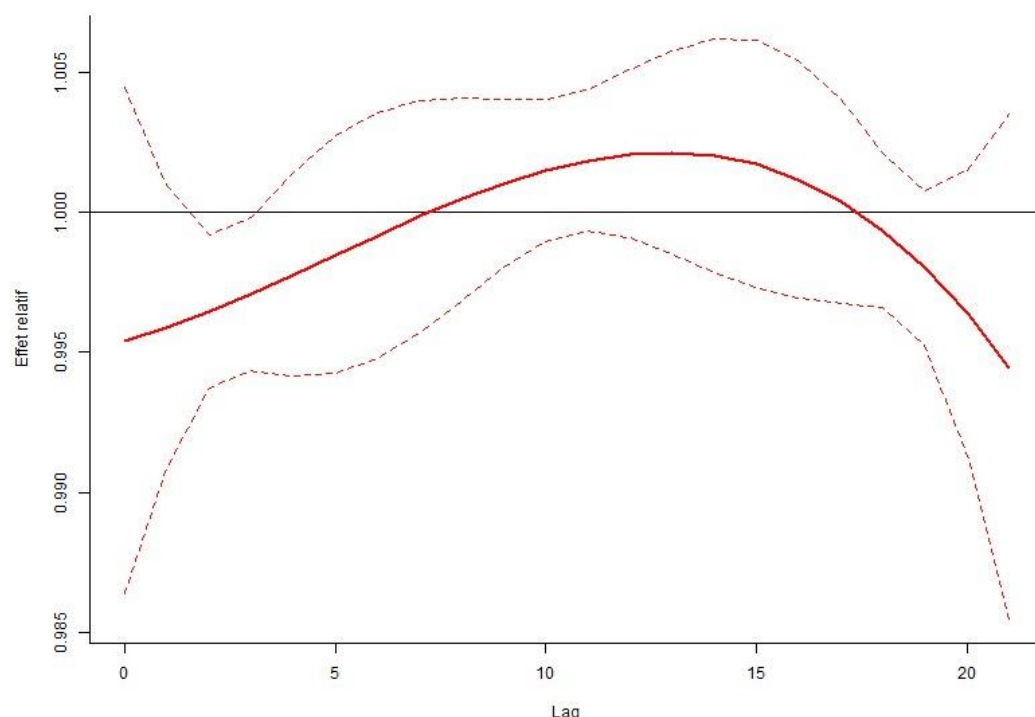
La comparaison des déviations nulles et résiduelles nous permet de déterminer la part de variation des données expliquées par notre modèle. Comme le veulent ces indicateurs, si la déviance résiduelle est significativement inférieure à la déviance nulle, cela signifie que le modèle explique une part importante de la variation des données et est donc un meilleur ajustement que le modèle nul. Plus la différence entre les deux déviations est grande, meilleur est l'ajustement du modèle. Dans notre cas, la déviance nulle est de 361111 et la déviance résiduelle est de 288808. La différence entre les deux étant relativement importante, cela suggère que notre modèle explique une part significative de la variabilité des données.

En ce qui concerne l'erreur quadratique moyenne (RMSE), c'est une mesure de l'erreur moyenne entre les valeurs prédites par notre modèle et les valeurs observées par Statbel. Sa valeur de 1,4562 nous indique qu'il y a une différence allant de 1 à 2 décès par jour entre la prédiction de notre modèle et les valeurs réelles de mortalité journalière. Tenant compte du fait que la moyenne de décès journaliers en Belgique tourne autour des 300 morts durant la période étudiée, nous pouvons considérer que le niveau moyen d'erreur prédictive est assez faible et que la capacité de prédiction de notre modèle est relativement bonne.

Revenons maintenant au contenu du tableau 2.

Les coefficients `cb_temp` représentent les effets de la température maximale sur le nombre de décès, décomposés en différents lags (délai en jours après l'exposition). Chaque coefficient mesure l'effet d'une augmentation de la température maximale sur la mortalité à un moment donné après l'exposition. Le chiffre associé au « v » représente le degré de la B-spline. Celui associé à la lettre « l » correspond au degré de liberté du lag en question. Un coefficient positif indique qu'une augmentation de la température à ce degré de lag spécifique est associée à une augmentation du nombre de décès, si toutes les autres variables restent égales. À l'inverse, un coefficient négatif suggère une diminution du nombre de décès. À partir des valeurs relevées grâce à notre modèle, nous avons retracé l'effet relatif d'une température maximale journalière à 20°C sur la mortalité en fonction du lag considéré (figure 10).

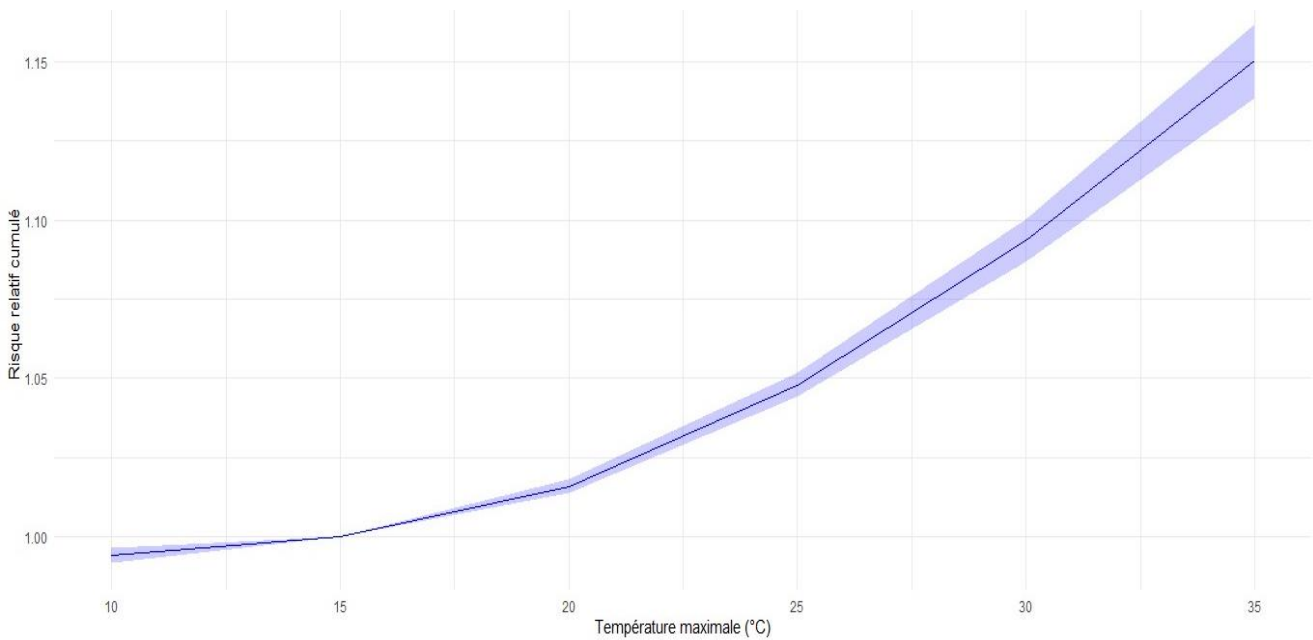
Figure 10. Effet relatif d'une température de référence (20°C) sur la mortalité en fonction du lag considéré



Les effets immédiats, entre 1 et 3 jours après l'exposition, de la température maximale journalière sur la mortalité ne sont pas hautement statistiquement significatifs (p -valeur > 0.05), ce qui empêche de savoir avec sûreté si les températures extrêmes ont un impact immédiat notable sur le nombre de décès. Les effets à des délais moyens, jusqu'à 21 jours après l'exposition, montrent des variations, avec certains coefficients indiquant des impacts positifs (surtout entre 8 et 17 jours) et d'autres négatifs (avant 8 jours et après 17 jours), mais ces effets ne sont une nouvelle fois pas suffisamment significatifs pour tirer des conclusions robustes.

En partant des valeurs obtenues via ce modèle, nous avons voulu isoler la variable de température maximale afin de définir ses effets sur la mortalité par rapport à un risque relatif dont la base référentielle équivaut à 1.

Figure 11. Effets cumulés de la température maximale sur la mortalité



Le graphique obtenu présente les effets cumulés de la température maximale sur la mortalité. L'axe horizontal représente les différentes valeurs de la température maximale, allant de 10°C à 35°C. L'axe vertical représente quant à lui le risque relatif cumulé de mortalité associé aux températures maximales. Même si cela peut paraître intuitif, notons qu'un risque relatif de 1,0 indique qu'il n'y a pas d'augmentation du risque par rapport à la référence, tandis qu'un risque relatif supérieur à 1,0 indique une augmentation du risque.

La courbe bleue représente l'estimation centrale du risque relatif cumulé pour chaque valeur de température maximale. Cette courbe nous montre comment le risque de mortalité évolue avec des températures maximales croissantes. Les zones ombrées autour de notre courbe représentent les intervalles de confiance à 95%, elles indiquent par conséquent la précision des estimations du risque relatif cumulé. Plus les bandes sont étroites, plus les estimations sont précises.

En partant de ce graphe, la première observation que nous pouvons noter est que le risque relatif cumulé de mortalité progresse exponentiellement avec l'augmentation de la température maximale. Cela suggère qu'il existe une relation positive entre la température maximale et la mortalité, où des températures plus élevées sont associées à un risque accru de mortalité. Dans la plage de températures de 10°C à 25°C, le risque relatif cumulé est proche de 1,0, ce qui indique que ces températures n'ont pas d'effet significatif sur la mortalité. Cependant, à partir de 25°C, le risque relatif cumulé commence à augmenter de manière plus marquée. Cette hausse

continue jusqu'à 35°C, où le risque relatif cumulé atteint environ 1,15, indiquant une augmentation de 15% du risque de mortalité par rapport aux températures de référence.

Remarquons que les intervalles de confiance deviennent plus larges à des températures plus élevées, ce qui suggère une incertitude plus grande dans les estimations pour les températures extrêmes. Malgré cette incertitude, la tendance générale reste claire : des températures plus élevées sont associées à une augmentation du risque de mortalité.

En plus de l'analyse des effets de la température maximale sur la mortalité, notre modèle DLNM inclut plusieurs variables de contrôle, à savoir le sexe, la localisation et la classe d'âge des personnes décédées durant la période considérée. Ces variables de contrôle permettent de tenir compte des effets confondants potentiels et d'isoler l'effet de la température sur la mortalité.

Pour commencer, le coefficient positif de 0.110 pour la variable "Sexe" indique que si les autres variables confondantes sont nulles, les hommes ont un risque de mortalité légèrement plus élevé que les femmes. Cela signifie que, dans ce modèle, être de sexe masculin est associé à une augmentation du taux de mortalité.

Ensuite, le coefficient pour la variable de localisation est très petit mais statistiquement significatif. Bien que la magnitude soit faible, cela indique qu'il existe des différences régionales importantes dans les taux de mortalité. Chaque unité de changement dans la localisation (qui correspondent ici à des provinces) est donc associée à une légère variation du taux de mortalité. Cette variabilité peut refléter des différences dans les conditions socio-économiques, l'accès aux soins de santé, ou d'autres facteurs environnementaux locaux. Nous nous pencherons brièvement sur ce sujet dans la section suivante.

Pour conclure, les coefficients des classes d'âge montrent comment le risque de mortalité varie selon les groupes d'âge. Les individus âgés de 25 à 64 ans ont un risque de mortalité plus élevé comparé au groupe de référence des moins de 25 ans. Le risque relatif de décès augmente de 24.9% pour cette tranche d'âge. Pour les personnes âgées de 65 à 84 ans, le coefficient de 0.694 indique un risque de mortalité significativement plus élevé, avec une augmentation relative du risque de 69.4% par rapport au groupe de référence. Cette tendance se confirme et se renforce avec la dernière classe d'âge. En effet, le risque relatif de décès est augmenté de 123% pour les personnes âgées de 85 ans et plus, soulignant l'impact évident mais néanmoins important de l'âge sur la mortalité.

3.3 Synthèse des résultats principaux

Notre analyse des données de mortalité en Belgique a mis plusieurs fois en évidence une surmortalité notable liée aux vagues de chaleur.

Tout d'abord, nous avons pu constater au travers de notre analyse résiduelle que la relation entre la température et la mortalité présente une courbe en U, indiquant une augmentation des décès à la fois lors de températures extrêmement basses et élevées. Cette relation complexe souligne l'impact significatif des températures extrêmes sur la mortalité. N'oublions pas de mentionner une dispersion accrue des résidus de mortalité à des températures extrêmes, accompagnée d'une incertitude plus élevée, probablement due au nombre limité de données disponibles pour ces situations.

Lors des jours de vagues de chaleur, nous avons observé une augmentation marquée des résidus de mortalité, même après avoir ajusté pour la saisonnalité. Le test de Wilcoxon a confirmé cette augmentation, appuyé par la preuve d'une différence statistiquement significative entre les jours de vagues de chaleur et ceux sans.

Enfin, en utilisant un modèle de délais non linéaires distribués (DLNM), nous avons pu capturer les effets différés et complexes des vagues de chaleur sur la mortalité. Ce modèle a montré que les conséquences des températures extrêmes peuvent se prolonger sur plusieurs jours, en analysant l'effet retardé de celles-ci sur une période de 21 jours. En ajustant notre modèle avec une famille quasipoisson pour prendre en compte la surdispersion des données et en intégrant des variables de contrôle telles que la localisation géographique, le sexe et l'âge des défunts, nos résultats ont révélé une augmentation significative du risque de mortalité, particulièrement chez les personnes âgées.

Ces résultats mettent en lumière l'importance de prendre en compte les températures extrêmes dans les politiques de santé publique pour réduire la surmortalité lors des vagues de chaleur. Nous allons maintenant discuter des limites rencontrées par les résultats de notre travail, ainsi que des pistes de travaux futurs pouvant s'avérer intéressants pour perfectionner la problématique que nous avons abordée. Nous concluons par les conclusions personnelles que nous avons tirées de l'ensemble de ce mémoire.

4 LIMITES ET DISCUSSION

4.1 Limites des méthodes utilisées et solutions

Dans notre étude, nous avons utilisé des analyses descriptives et des graphiques pour illustrer les tendances générales des données de mortalité en fonction des températures. Bien que ces outils soient utiles pour visualiser les données, ils présentent des limites. En effet, les graphiques descriptifs ne permettent pas de quantifier précisément les relations observées. Par exemple, une relation entre la température et la mortalité peut sembler évidente, mais sans une mesure concrète de cette relation, nous risquons de sous-estimer ou de surestimer l'effet réel des vagues de chaleur.

De notre côté, et afin de surmonter cet obstacle, nous avons complété nos analyses descriptives par des méthodes quantitatives, telles que l'analyse de régression effectuée. Cela nous a permis de mesurer plus objectivement l'association entre la température et la mortalité, et ainsi de fournir des estimations plus robustes quant aux effets des vagues de chaleur.

Ensuite, les tests de corrélation que nous avons utilisés pour évaluer les relations entre variables ne prenaient pas en compte des variables confondantes comme l'âge, le sexe ou d'autres facteurs environnementaux. Nous étions avertis que l'estimation de la relation entre la température et la mortalité pouvait en être faussée, car d'autres facteurs non contrôlés pourraient aussi influencer les résultats. C'est pourquoi nous nous sommes mis en tête d'utiliser un modèle de régression multivariée.

Celui-ci nous a permis de contrôler les variables confondantes que nous avons sélectionnées et ainsi d'obtenir une estimation plus précise de l'effet des températures extrêmes sur la mortalité. Cependant, il est indéniable que nous sommes passés à côté de certaines variables importantes à prendre en compte dans notre analyse, du fait de notre accès limité à certaines bases de données qui auraient pu nourrir notre modèle. Nous pensons, entre autres, au détail de la répartition des concentrations d'ozone et de particules fines sur le territoire belge, pour préfacier une analyse de l'impact qu'a la pollution atmosphérique sur la surmortalité liée aux vagues de chaleur. L'influence de celles-ci sur les personnes atteintes de maladies chroniques pourrait constituer une autre piste de travail intéressante en détaillant plus finement l'augmentation du risque relatif de décès qui plane au-dessus de ces patients en fonction de leur pathologie.

Comme autre limitation dans l'interprétation de nos résultats, force est de reconnaître que le modèle sinusoïdal choisi pour représenter la saisonnalité de la mortalité a ses limites, notamment dans sa capacité à capturer les variations saisonnières complexes. En caricaturant la saisonnalité comme nous l'avons fait, les variations irrégulières ou les changements structurels sur plusieurs années peuvent ne pas être correctement pris en compte, ce qui peut fausser nos estimations des résidus de mortalité.

Pour mieux modéliser les tendances saisonnières, nous pourrions envisager des modèles plus flexibles, comme les splines que nous avons exploitées à la fin de notre travail. Ces approches nous permettraient de mieux capturer les variations saisonnières qui sont plus complexes et d'obtenir ainsi une estimation plus précise de l'effet saisonnier.

Pour poursuivre cette auto-critique des limites de notre travail, revenons sur le modèle DLNM que nous avons utilisé. Celui-ci est précieux pour saisir les effets complexes et différés des vagues de chaleur sur la mortalité. Toutefois, les choix que nous avons faits concernant la période de lag et d'autres paramètres sont subjectifs et peuvent influencer les résultats. Si ces choix ne sont pas optimaux, ce qui est probablement le cas, cela pourrait entraîner une sous-estimation ou une surestimation de l'impact retardé des températures sur la mortalité.

En poussant plus loin cette étude, nous pourrions apprendre à maîtriser l'utilisation des techniques de machine learning qui se développent de plus en plus à l'heure actuelle. En mettant en place une analyse par forêts aléatoires, nous aurions vite fait d'identifier les variables importantes.

Bien qu'un tel listing soit probablement non-exhaustif, nous pensons que c'est en prenant en compte ces limites que nous pourrions améliorer la précision et la solidité statistique de nos conclusions quant à l'impact des vagues de chaleur sur la surmortalité dans notre pays.

4.2 Discussion des résultats

Notre étude a permis de mettre en lumière de nombreux aspects de la relation entre les vagues de chaleur et la surmortalité en Belgique. Notre analyse de données sur plusieurs décennies a révélé que la surmortalité est particulièrement marquée lors des périodes de vagues de chaleur. Nos résultats indiquent une relation non linéaire entre la température et la mortalité, avec des pics de décès lors des températures extrêmes. Cette observation est cohérente avec d'autres études internationales, qui ont également constaté une augmentation de la mortalité lors de vagues de chaleur. Les travaux de Gasparrini et al. (16) montrent des augmentations similaires de la mortalité dans diverses régions du monde en réponse à des températures extrêmes, soulignant la vulnérabilité accrue des populations âgées et fragiles. Ce constat est également corroboré par Ballester et al. (1), qui ont mis en évidence des augmentations similaires de la mortalité en période de chaleur extrême dans des pays comme la France, l'Allemagne et l'Espagne.

En utilisant un modèle DLNM, nous avons pu identifier non seulement l'effet immédiat de ces événements climatiques extrêmes sur la mortalité, mais aussi les effets différés. Cela est particulièrement important car cela montre que les décès attribuables aux vagues de chaleur ne se limitent pas aux jours de températures maximales mais peuvent survenir plusieurs jours après, en raison de la décompensation progressive des conditions de santé des individus vulnérables.

Parmi les résultats marquants de notre étude, nous observons que les vagues de chaleur sont associées à une augmentation disproportionnée de la mortalité chez les personnes âgées. Cette constatation est particulièrement préoccupante dans le contexte du vieillissement démographique en Belgique et, de manière plus générale, dans le monde entier. Nos résultats montrent que même des augmentations modestes de la température peuvent entraîner une augmentation significative des décès, mettant en évidence la nécessité de politiques de santé publique adaptées aux besoins des personnes âgées.

Un autre aspect intéressant de notre étude est la démonstration de la persistance des effets des vagues de chaleur au-delà de la période de chaleur elle-même. Cette persistance suggère que les systèmes de santé doivent rester vigilants non seulement pendant les vagues de chaleur mais aussi dans les jours suivants. Cela pourrait impliquer, par exemple, un suivi accru des

patients à risque après une vague de chaleur, ainsi qu'une sensibilisation de la population sur les dangers des températures élevées prolongées.

Sur le plan scientifique, nos résultats ouvrent la voie à de nouvelles recherches. Par exemple, il serait pertinent d'explorer les interactions entre les vagues de chaleur et d'autres facteurs de stress environnemental, tels que la pollution de l'air ou les périodes de sécheresse, qui pourraient avoir des effets synergiques sur la santé publique. De plus, et nous nous répétons afin d'insister sur ce point, une analyse plus approfondie des différences régionales au sein de la Belgique pourrait révéler des variations dans la vulnérabilité et permettre des interventions un peu mieux ciblées.

Enfin, et c'est une conclusion bien plus globale qu'axée sur notre plat pays, les résultats de cette étude soulignent l'importance de continuer à développer des stratégies d'adaptation au changement climatique, non seulement pour atténuer ses impacts directs mais aussi pour protéger les populations les plus à risque. Les défis posés par les vagues de chaleur ne feront probablement que s'intensifier à l'avenir, ce qui va selon nous rendre essentielle la mise en œuvre de mesures de prévention et de protection efficaces.

4.3 Implication concrète des résultats par rapport à la santé publique

Tout au long de notre travail, nous avons analysé la relation entre températures extrêmes et surmortalité liée à celles-ci : revue de la littérature mondiale et nationale, manipulation de données fournies par les organismes belges de référence dans leur domaine et production de résultats au fur et à mesure de nos avancées. Mais concrètement, quelles sont les mesures déjà adoptées pour faire face aux vagues de chaleur dans notre pays ? Comment une caractérisation relationnelle comme celle-ci peut-elle s'avérer utile pour améliorer la santé publique belge ? Et quelles modifications pourrions-nous apporter à tout cela grâce aux découvertes que nous avons faites au cours de ce travail ? Ce sont les sujets que nous allons aborder maintenant.

Pour commencer, il nous semble important de préciser qu'en Belgique, nous avons un plan de prévention national nommé «Plan Forte Chaleur et Pics d'Ozone », dispositif opérationnel mis en place principalement par le SPF-Santé Publique pour faire face aux risques associés aux vagues de chaleur (20). Ce plan implique une surveillance météorologique étroite, en collaboration avec l'IRM, pour détecter les conditions propices à une vague de chaleur.

Lorsqu'un risque élevé est identifié, des alertes préventives sont émises pour informer les autorités locales, les professionnels de la santé, les services d'urgence et le grand public. C'est d'ailleurs cette coordination entre les différentes institutions et autorités qui constitue l'une des forces du Plan.

Une part importante de la mise en place de ce système de protection sanitaire publique est justement consacrée à la communication avec la population. Des campagnes de sensibilisation sont lancées avant les périodes de chaleur, mettant en avant les précautions à prendre, les symptômes à surveiller et les ressources disponibles, telles que les centres de rafraîchissement. Pendant une vague de chaleur, des messages réguliers sont diffusés dans les médias principaux de notre pays pour informer le public sur l'évolution des conditions et sur les actions à entreprendre.

Les autorités sanitaires, telles que Sciensano, collectent et analysent des données spécifiques pendant les périodes de chaleur intense : suivi des admissions à l'hôpital, des décès liés à la chaleur et d'autres indicateurs de santé pertinents. Ces analyses sont ensuite partagées au grand public sous forme de publications scientifiques, nous avons d'ailleurs parcouru certains de ces documents lors de la revue de littérature belge abordant notre problématique. C'est à partir de ces publications que notre plan national, véritable document vivant, est régulièrement révisé pour tenir compte des leçons apprises lors des vagues de chaleur précédentes, des nouvelles données scientifiques et des évolutions dans la compréhension des risques. Cette flexibilité permet au plan de rester adapté et efficace dans un contexte en constante évolution.

Et c'est justement au travers de ce plan de protection de la santé d'un pays entier que nous pouvons comprendre toute l'importance de développer toujours plus nos connaissances sur des sujets touchant à notre santé publique.

En perfectionnant notre étude sur la surmortalité liée aux vagues de chaleur, nous contribuons à ce que les alertes nationales soient lancées de la manière la plus efficace possible et les avantages à en tirer sont nombreux. Cela permet la prévention de décès ou d'aggravations morbides associés à une chaleur excessive, et la protection des populations vulnérables telles que les personnes âgées qui, comme nous l'avons mis en avant, sont plus à risque que les plus jeunes s'ils sont exposés aux mêmes conditions thermiques qu'eux.

Nous pensons aussi à la sensibilisation et à l'éducation sanitaire de la population, qui en apprenant comment mieux se protéger face à de tels événements de chaleur extrême, pourrait adopter de bons comportements à plus long terme, et ce peut-être même vis-à-vis d'autres

programmes de santé publique que le plan présenté ici.

De plus, une approche améliorée de la problématique permet aussi une adaptation plus fine du déclenchement de ce plan d'alerte, et donc un lancement de celui-ci seulement lorsque cela s'avère vraiment nécessaire d'un point de vue épidémiologique. En effet, nous pensons que si les alertes de vagues de chaleur sont trop fréquentes, le public peut devenir moins réactif aux messages d'alerte, ce qui peut compromettre l'efficacité des plans d'urgence lors de situations réellement critiques

Enfin, cela permet une mobilisation des ressources plus équilibrée : s'il y a une meilleure gestion publique lors de vagues de chaleur, cela signifie moins de patients qui arrivent aux urgences pour cette raison, et donc une plus grande disponibilité du personnel hospitalier vis-à-vis des autres patients au même moment.

En résumé, bien que les alertes de vagues de chaleur puissent avoir des avantages significatifs en termes de prévention des maladies et de protection des populations vulnérables, il est important de trouver un équilibre pour éviter les inconvénients potentiels tels qu'un alarmisme excessif ou une surcharge de la première ligne des soins de santé. Cela ne coûte rien de rappeler qu'une communication efficace, une planification minutieuse et une réévaluation régulière des seuils déclencheurs d'alerte nous semblent essentielles pour maximiser les avantages et minimiser les inconvénients des alertes de vagues de chaleur.

5 CONCLUSION

Cette recherche a permis de mettre en lumière la relation complexe entre les vagues de chaleur et la surmortalité en Belgique. À travers notre analyse des données de mortalité et des températures, nous avons constaté une surmortalité notable associée aux températures extrêmes, particulièrement chez les populations vulnérables, telles que les personnes âgées. Nos résultats répondent à la question centrale de notre mémoire : il est non seulement possible de caractériser l'impact des vagues de chaleur en Belgique à partir de données nationales, mais aussi essentiel d'intégrer ces résultats dans la formulation des politiques de santé publique. En effet, cette étude souligne l'importance d'adapter en continu les stratégies de prévention et d'intervention afin de protéger ces populations à risque durant les périodes de chaleur intense.

Les implications de notre étude encouragent la mise en œuvre de programmes de sensibilisation et de systèmes de surveillance renforcés lors des vagues de chaleur. Par ailleurs, cela nécessite une coordination efficace entre les différents acteurs, tels que les services météorologiques et les organismes de santé, pour établir des alertes préventives et des mesures de protection adaptées à la population ciblée. En outre, nous ne pouvons pas nous permettre de négliger l'importance d'une collecte de données continue et de l'analyse des effets à long terme des vagues de chaleur sur la mortalité.

Cependant, notre étude présente certaines limites. D'une part, les méthodes utilisées, telles que les analyses descriptives et les tests de corrélation, bien qu'utiles pour une compréhension primaire de la situation, ne captent pas toujours la complexité des relations entre température et mortalité. Le modèle DLNM employé a ses propres limitations, en particulier concernant le choix des lags et des splines, qui peuvent influencer les résultats. D'autre part, l'absence de données sur des variables environnementales spécifiques, comme la pollution de l'air, pourrait avoir introduit des biais dans nos estimations. Nous mettons en avant ces éléments afin d'insister sur la nécessité de poursuivre la recherche avec des approches plus robustes et des jeux de données plus complets, pour mieux saisir les mécanismes sous-jacents à la surmortalité.

Même si ce n'est pas bon signe de le dire, l'avenir de la recherche portant sur les effets des vagues de chaleur sur la santé semble prometteur. Tout d'abord, des prolongements possibles de ce mémoire incluent l'exploration des interactions entre de telles vagues et d'autres facteurs

environnementaux (voire socio-économiques), ainsi que l'analyse précise des différences régionales au sein de la Belgique pour améliorer la mise en place d'actions préventives. De nouvelles problématiques pourraient également se poser, telles que l'impact des vagues de chaleur sur la santé mentale des populations fragiles et les effets cumulés des événements climatiques extrêmes.

Ignorer ces questions pourrait engendrer des conséquences graves, non seulement pour la santé publique, mais aussi pour la société dans son ensemble, face à la montée prévisible des températures liées au changement climatique. En somme et comme très souvent, une approche proactive de la recherche épidémiologique est essentielle, mais ne deviendrait pas statistiquement significative sans accepter l'hypothèse nulle d'une bonne collaboration avec les décideurs politiques. Parce que c'est avant tout ça, la santé publique.

Postface

Alors évidemment, loin de nous la prétention d’avoir appris à aussi bien maîtriser notre sujet que ne le fait Antonio Gasparrini, ou encore de vous avoir fourni des résultats aussi pointus et fiables que ceux produits chaque mois par les membres de Sciensano.

Mais si nous devons mettre en avant les apports principaux de ce travail, ce serait tout d’abord celui de l’apprentissage méthodologique et scientifique que nous avons développé au long des centaines d’heures passées sur PubMed et RStudio. Ce serait ensuite la fierté personnelle d’avoir réussi à produire ce travail malgré le casse-tête que représentait certaines de ses étapes pour le novice en épidémiologie avancée que je suis. Et ce serait enfin le fait d’en être ressorti avec encore plus de questions qu’avant de commencer.

Rien d’inquiétant si l’on se fie à la parole d’Albert Einstein : « *Apprendre d’hier, vivre aujourd’hui, espérer pour demain. L’important est de ne pas arrêter de poser des questions.* »

Merci de m’avoir lu.

Quentin Mailleux

6 BIBLIOGRAPHIE

1. Ballester J, Quijal-Zamorano M, Méndez Turrubiates RF, Pegenaute F, Herrmann FR, Robine JM, et al. Heat-related mortality in Europe during the summer of 2022. *Nat Med*. 2023 Jul;29(7):1857–66.
2. World Meteorological Organization [Internet]. *Heatwave*. URL: <https://wmo.int/topics/heatwave>, page consultée le 24/09/2023
3. Rooney C, McMichael AJ, Kovats RS, Coleman MP. Excess mortality in England and Wales, and in Greater London, during the 1995 heatwave. *Journal of Epidemiology & Community Health*. 1998 Aug 1;52(8):482–6.
4. Luber G, McGeehin M. Climate Change and Extreme Heat Events. *American Journal of Preventive Medicine*. 2008 Nov;35(5):429–35.
5. Barriopedro D, Fischer EM, Luterbacher J, Trigo RM, García-Herrera R. The Hot Summer of 2010: Redrawing the Temperature Record Map of Europe. *Science*. 2011 Apr 8;332(6026):220–4.
6. Perkins-Kirkpatrick SE, Lewis SC. Increasing trends in regional heatwaves. *Nat Commun*. 2020 Jul 3;11(1):3357.
7. Marx W, Haunschild R, Bornmann L. Heat waves: a hot topic in climate change research. *Theor Appl Climatol*. 2021 Oct;146(1–2):781–800.
8. Institut Royal Météorologique [Internet]. *IRM - Vague de chaleur*. URL : <https://www.meteo.be/fr/infos/dico-meteo/vague-de-chaleur>, page consultée le 24/09/2023
9. Climat.be [Internet]. *Changements climatiques observés en Belgique*. URL: <https://climat.be/en-belgique/climat-et-emissions/changements-observees>, page consultée le 15/10/2023
10. De Troeyer K, Bauwelinck M, Aerts R, Profer D, Berckmans J, Delcloo A, et al. Heat related mortality in the two largest Belgian urban areas: A time series analysis. *Environmental Research*. 2020 Sep;188:109848.
11. Martinez GS, Diaz J, Hooyberghs H, Lauwaet D, De Ridder K, Linares C, et al. Heat and health in Antwerp under climate change: Projected impacts and implications for prevention. *Environment International*. 2018 Feb;111:135–43.
12. Demoury C, Aerts R, Vandeninden B, Van Schaeybroeck B, De Clercq EM. Impact of Short-Term Exposure to Extreme Temperatures on Mortality: A Multi-City Study in Belgium. *IJERPH*. 2022 Mar 22;19(7):3763.
13. Structure de la population | Statbel [Internet]. URL: <https://statbel.fgov.be/fr/themes/population/structure-de-la-population>, page consultée le 03/04/2024
14. Statbel [Internet]. URL: <https://statbel.fgov.be/fr/propos-de-statbel>, page consultée le 03/04/2024

15. Mievis P., Météo en Belgique [Internet]. *Les vagues de chaleur en Belgique depuis 1901*. URL : <https://www.meteobelgique.be/article/articles-et-dossier/le-climat/2084-les-vagues-de-chaleur-en-belgique-depuis-1901>, page consultée le 08/10/2023
16. Gasparrini A, Guo Y, Hashizume M, Lavigne E, Zanobetti A, Schwartz J, et al. Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study. *The Lancet*. 2015 Jul;386(9991):369–75.
17. Gasparrini A, Armstrong B, Kenward MG. Distributed lag non-linear models. *Statistics in Medicine*. 2010 Sep 20;29(21):2224–34.
18. Coronavirus Tracker- Worldometer [Internet]. URL: <https://www.worldometers.info/coronavirus/>, page consultée le 08/10/2023
19. Gasparrini A, Armstrong B. The Impact of Heat Waves on Mortality. *Epidemiology*. 2011 Jan;22(1):68–73.
20. Plan fédéral forte chaleur et pics d’ozone | SPF Santé publique [Internet]. URL: <https://www.health.belgium.be/fr/plan-federal-forte-chaleur-et-pic-dozone>, page consultée le 12/04/2024

