

SANTÉ
ENVIRONNEMENT

FÉVRIER 2022

ÉTUDES ET ENQUÊTES

ÉVOLUTION DE LA RELATION
TEMPÉRATURE-MORTALITÉ
EN FRANCE DEPUIS 1970

Résumé

L'exposition à des températures inhabituellement chaudes ou froides se traduit par une augmentation du risque de mortalité. Dans un contexte d'évolution rapide de la distribution des températures en France, et de mise en place de politiques de prévention des températures extrêmes, il est pertinent de rechercher si l'effet de la température sur la mortalité a évolué au cours du temps.

Une analyse multicentrique en séries temporelles a été réalisée pour 18 zones en France métropolitaine sur la période 1970-2015. L'évolution temporelle de la relation température-mortalité a été estimée à l'aide de modèles non linéaires à retards distribués en introduisant une interaction entre la température et le temps. Ces modèles permettent d'investiguer les évolutions possibles concernant la forme de la relation, les risques relatifs (RR) pour différentes températures, et la fraction de mortalité attribuable aux températures froides et chaudes, avec un focus particulier sur les événements les plus extrêmes (températures inférieures aux percentiles 10 ou supérieures aux percentiles 90 de la période 1970-2015), qui sont les plus susceptibles d'être influencés tant par les évolutions climatiques que par les mesures de prévention.

Les résultats suggèrent une diminution des RR liés aux très fortes chaleurs (correspondant à des percentiles de température ≥ 99 , calculés sur 1970-2015) depuis les années 1970, et une augmentation des RR liés aux très grands froids. Par exemple, le RR correspondant à une augmentation de la température du percentile 50 au percentile 99,9 de la période 1970-2015 est de 2,33 [1,95 :2,79] en 1975, et de 1,33 [1,14 :1,55] en 2015, ce qui semble marquer une acclimatation à la chaleur (pouvant résulter d'une adaptation de la population, des améliorations socio-économiques et médicales et/ou d'une efficacité des mesures de prévention organisées à partir de 2004). Cependant, cette évolution à la baisse n'est pas observée pour des températures moins élevées. Les évolutions des RR sont progressives au cours du temps, sans rupture à partir de 2004. De plus, les RR liés aux températures inhabituellement chaudes pour une année donnée par rapport aux années précédentes (correspondent à des percentiles ≥ 90 calculés sur l'année en cours et les quatre années précédentes) augmentent depuis les années 1970.

La fraction de la mortalité attribuable aux températures les plus froides ($<$ percentiles 10) est stable, au cours du temps, représentant 0,63 [0,62 :0,65] % de la mortalité totale dans les années 70s et 0,58 [0,56 :0,60] % dans les années 2010. La fraction attribuable aux températures les plus chaudes ($>$ percentiles 90) augmente, passant de 0,11 [0,08 :0,13] % de la mortalité dans les années 70s à 0,23 [0,21 :0,24] % dans les années 2010. Les fractions attribuables reflètent le croisement entre un niveau de risque et une fréquence d'exposition. Pour le froid, les RR faibles mais appliqués à un grand nombre de jours conduisent à un impact important. Pour la chaleur, les RR très élevés correspondent à peu de jours, d'où un impact plus faible que pour le froid. Pour autant, l'augmentation du nombre de jours chauds conduit à une augmentation de la fraction attribuable à la chaleur dans les années récentes, malgré une diminution des RR.

Les évolutions observées sont en faveur d'une possible acclimatation de la population vers un nouveau climat et/ou des améliorations des conditions socio-économiques et médicales. Le risque diminue lorsqu'une température autrefois inhabituelle devient plus fréquente (et inversement lorsqu'une température devient inhabituelle). Pour autant, le risque associé aux températures inhabituelles demeure. De plus, la diminution des RR liés à la chaleur ne compense pas l'augmentation du nombre de jours chauds, et on observe donc une augmentation des impacts de la chaleur.

Ces résultats soulignent l'importance de poursuivre les efforts pour réduire l'impact des températures froides et chaudes sur la mortalité et d'agir pour atténuer le changement climatique et ainsi éviter les scénarios les plus défavorables. En matière d'adaptation, il faut

à la fois agir sur l'état de santé de la population pour améliorer sa capacité de thermorégulation, sur l'environnement pour réduire les expositions aux températures les plus extrêmes, et sur la réponse immédiate à ces événements extrêmes.

MOTS CLÉS : TEMPÉRATURE, CHALEUR, FROID, CHANGEMENT CLIMATIQUE, MORTALITÉ

Abstract

Evolution of the temperature-mortality relationship in France since 1970

Exposure to unusually warm or cold temperatures result in an increase in mortality risk. Temperature's distribution are rapidly changing in France, and efforts to reduce the impacts of extreme temperatures are implemented. In this context, it is interesting to investigate if the temperature-mortality relationship has evolved through time.

A multicentric time-serie analysis was applied to 18 study areas in metropolitan France, over the 1970-2015 period. The temporal evolution of the temperature-mortality relationship was estimated through distributed lag non-linear generalized models including an interaction between temperature and time. These models make it possible to investigate the general shape of the relationship, the relative risks (RR) at various temperatures, and the fraction of mortality attributable to warm and cold temperatures. The report made a special focus on the most extreme events (temperature lower than the 10th percentiles, or higher than the 90th percentiles of the 1970-2015 temperature's distributions), which are the most sensitive to climate change, and to prevention plans.

Results suggest a decrease of the RR associated with extreme heat (temperatures higher than the 99th percentile of the 1970-2015 period) since the 70s, and an increase of the RR associated with extreme cold. For instance, the RR corresponding to an increase between percentiles 50th and 99.9th was 2.33 [CI 95% 1.95:2.79] in 1970, and 1.33 [1.14:1.55] in 2015. This may indicate an acclimatization to heat (as a result of a spontaneous adaptation of the population, of social and medical improvements, and/or of the efficiency of heat prevention plans since 2004). However, this decrease in RR were only observed for the most extreme temperatures. They were progressive through time, with no clear modification after 2004. Furthermore, the RR associated with unusually warm temperatures for a given year compared to the previous years (corresponding to temperatures higher than percentiles 90th computed over the on-going year and the four previous years) increase since the 70s.

The fraction of mortality attributable to the coldest (<percentiles 10th) temperature is stable through time, representing 0.63 [0.62 :0.65]% of the total mortality in the 70s, and 0.58 [0.56 :0.60]% in the 2010s. The fraction of mortality attributable to the warmest (>percentiles 90th) increases, representing 0.11 [0.08 :0.13]% of the total mortality in the 70s, and 0.23 [0.21 :0.24]% in the 2010s. Attributable fractions depends on the RR and on the frequency of exposure. For cold, low RRs apply to a large number of days, leading to an important impact. For heat, high RRs are still corresponding to a small number of days, leading to a smaller impact. However, the increase in the number of warm days lead to an increase in the mortality attributable to heat, despite decreasing RR.

Those evolutions are in favor of an acclimatization of the population to a new climate, and of an influence of the improvements of the social and medical conditions. Risks decrease when a temperature that was once unusual becomes more frequent (and increase when a once frequent temperature becomes unusual). Yet, risks associated with unusual temperatures remain. Furthermore, the decrease in risk does not compensate the increase in exposure, and the fraction of mortality attributable to heat increases.

Results underline the importance to maintain efforts to reduce the adverse impacts of low and high temperatures, and to mitigate climate change to avoid the most defavorable future scenarios. Improving the general state of health of the population, and thus its capacity of thermoregulation would contribute to adaptation. Actions to reduce exposure to the most extreme temperature, and manage extreme events are still required.

KEY WORDS : TEMPERATURE, HEAT, COLD, CLIMATE CHANGE, MORTALITY

Auteurs

Mathilde Pascal, Direction Santé Environnement (DSET), Santé publique France
Vérène Wagner, Direction Santé Environnement (DSET), Santé publique France
Magali Corso, Direction Santé Environnement (DSET), Santé publique France

Relecteur

Ray Bustinza, Institut national de santé publique du Québec

Abréviations

GES	Gaz à effet de serre
IC	Intervalle de confiance
GLM	Modèle linéaire généralisé
PNC	Plan national canicule
RR	Risque relatif
Sacs	Système d'alerte canicule et santé
SNDS	Système national des données de santé
TMM	Température de mortalité minimale

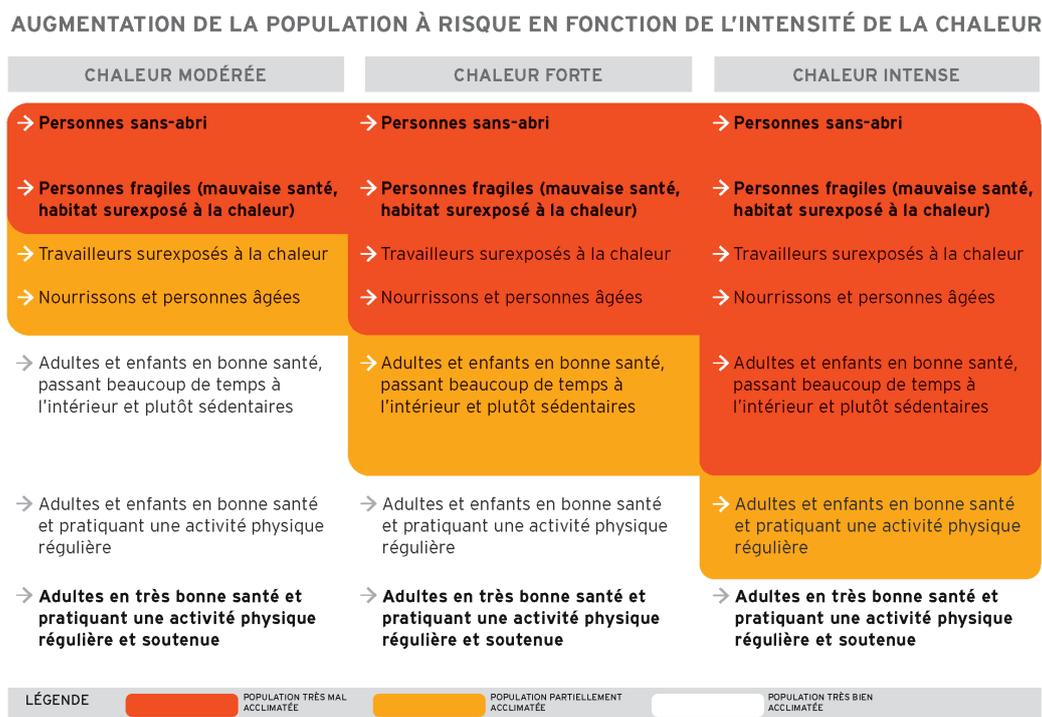
Sommaire

Résumé	1
Abstract	3
Auteurs, relecteur	4
Abréviations	5
1. CONTEXTE ET OBJECTIFS	7
2. MÉTHODE	10
2.1 Zones et période d'étude	10
2.2 Données	11
2.3 Principe général d'analyse	11
2.4 Analyse descriptives	11
2.5 Analyse de la relation température mortalité sur la période 1970-2015	11
2.6 Analyse des évolutions temporelles de la relation température mortalité	12
2.6.1 <i>Forme de la relation et température de mortalité minimale</i>	13
2.6.2 <i>Risques relatifs associés à une température donnée</i>	13
2.6.3 <i>Risques relatifs associés à une température inhabituelle par rapport aux années précédentes</i>	13
2.6.4 <i>Risques relatifs associés à une température inhabituelle pour l'année</i>	13
2.7 Calcul des fractions attribuables à des températures non optimales	14
3. RÉSULTATS	16
3.1 Caractéristiques et principales évolutions des zones d'études sur la période d'étude	16
3.2 Analyse de la relation température-mortalité sur la période 1970-2015	21
3.3 Évolutions temporelles de la relation température mortalité et de la température de mortalité minimale	22
3.3.1 <i>Forme générale de la relation température-mortalité (association cumulée sur 0-21 jours)</i>	22
3.3.2 <i>Profils temporels de la relation température -mortalité</i>	22
3.3.3 <i>Évolution de la TMM</i>	25
3.4 Évolutions temporelles des risques relatifs	26
3.4.1 <i>Risques relatifs associés à une température donnée</i>	26
3.4.2 <i>Risques relatifs associés à une température inhabituelle par rapport aux années précédentes</i>	27
3.4.3 <i>Risques relatifs exprimés pour une température inhabituelle pour l'année</i>	28
3.4.4 <i>Focus sur les années de canicules exceptionnelles</i>	29
3.5 Calcul des fractions attribuables à des températures non optimales	30
4. DISCUSSION	33
4.1 Synthèses des principaux résultats	33
4.2 Implications pour l'adaptation au changement climatique	35
5. CONCLUSION	37
Annexe 1. Descriptif par zones	38
Annexe 2. Ratio de RR entre différentes années, en prenant comme référence pour le calcul des RR la distribution 1970-2015	47
Annexe 3. Évolutions de la TMM par zone	48
Annexe 4. RR cumulés sur 0-21 jours pour différentes années	51
Références	55

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

La température interne optimale pour le fonctionnement des mécanismes biochimiques du corps se situe autour de $36,8 \pm 0,5^\circ\text{C}$. En deçà ou au-delà de cette valeur, l'état de santé se dégrade rapidement, avec des symptômes graves pouvant conduire au décès [1]. La thermorégulation définit la capacité de l'organisme à maintenir cette température stable malgré les variations de température ambiante, en mobilisant des ressources physiologiques et comportementales. Elle dépend de plusieurs paramètres internes (âge, morphologie, état de santé...) et externes (habillement, humidité, capacité à agir sur son exposition...) [1]. L'exposition répétée à des températures inhabituellement froides ou chaudes peut améliorer la thermorégulation, conduisant à une acclimatation aux températures les plus fréquentes. Cette acclimatation est plus élevée chez les personnes actives et régulièrement exposées à des températures variées, et plus faible chez les personnes sédentaires et vivant majoritairement dans des ambiances thermiques contrôlées [1]. La Figure 1 illustre la répartition de l'acclimatation à la chaleur au sein de la population (un modèle symétrique peut être envisagé pour le froid).

Figure 1. Schématisation des niveaux d'acclimatation à la chaleur selon les types de population [2]



Pour chaque personne, il existe une gamme de températures ambiantes qui correspondra à la thermorégulation la plus efficace, et à une absence de risque pour la santé. Plus la température ambiante s'éloigne de cette zone optimale, vers la chaleur ou vers le froid, plus elle va mobiliser, jusqu'à éventuellement dépasser, la capacité de thermorégulation. Ainsi, pour une température de l'air extérieur donnée, le risque pour un individu dépendra d'une part de son exposition, et d'autre part de sa capacité de thermorégulation physiologique et comportementale. Les mécanismes physiologiques et comportementaux mobilisés dans la réponse à la chaleur et au froid sont par ailleurs différents.

À l'échelle d'une population, lorsqu'on étudie la relation entre la température moyenne mesurée en extérieure et la mortalité, on retrouve une relation non-linéaire en forme de U

plus ou moins déformée, qui traduit la multiplicité des situations individuelles d'exposition et de thermorégulation. Les températures ne présentant pas de difficulté de thermorégulation physiologique et comportementale pour une grande part de la population correspondent à un risque de mortalité faible. Il est ainsi possible de calculer, à partir de modélisation de la relation température-mortalité, pour une population et une période donnée, une température de mortalité minimale (TMM). Cette température est celle pour laquelle on observe le plus faible risque sur la mortalité, et correspond à la température la plus optimale pour la majorité de la population.

L'effet observé pour les températures supérieures à la TMM est identifié comme l'effet de la chaleur, et celui des températures inférieures à la TMM comme l'effet du froid. Alors qu'on pourrait s'attendre à une relative symétrie entre les effets de la chaleur et du froid, les études épidémiologiques mettent en évidence des dynamiques de réponse assez différentes. L'impact de la chaleur est quasi-immédiat, se maintenant sur moins de deux semaines suivant l'exposition, et est très influencé par l'intensité de la chaleur. A l'inverse, l'impact du froid est différé de quelques jours, et se maintient jusqu'à trois semaines suivant l'exposition. Il est également moins sensible à l'intensité du froid. En France, on retrouve ainsi plutôt une relation en forme de J entre la température et la mortalité, avec une très grande gamme de températures associées à des risques faibles de décès, et quelques extrêmes, associé à des risques élevés [3]. Malgré un risque plus important associé aux températures extrêmes chaudes, la fraction de la mortalité attribuable au froid est actuellement plus importante que la fraction de la mortalité attribuable à la chaleur, reflétant la distribution actuelle des températures en métropole, avec un nombre plus important de jours froids (définis par rapport à la TMM) que de jours chauds [3].

Le changement climatique se traduit par un déplacement de la distribution des températures vers des valeurs plus élevées, et par une augmentation de la variabilité des températures. L'adaptation à ce nouveau climat, et en particulier à la chaleur, est devenue un enjeu important de santé publique. Alors que les évolutions climatiques sont déjà notables, l'observation d'un déplacement de la TMM vers les températures les plus chaudes est souvent interprétée comme une marque d'adaptation au changement climatique [4-6]. Cette interprétation semble toutefois abusive. D'une part, les estimations de TMM sont très sensibles aux choix de modélisation, et souvent peu présentées avec des intervalles de confiance [7]. D'autre part, une variation de la TMM peut indiquer une acclimatation à une nouvelle distribution des températures, mais ne dit rien de la réponse à des événements inhabituels, ni des évolutions éventuelles de la distribution des fractions de la mortalité attribuable à la chaleur et au froid. Par ailleurs, de nombreux facteurs autres que climatiques peuvent jouer dans la forme de la relation, ainsi qu'illustré par quelques exemples proposés dans le Tableau 1.

Pour concevoir des politiques d'adaptation efficaces, il faut disposer d'information sur la forme générale de la relation température-mortalité, la dynamique des effets retardés, l'évolution des risques relatifs, et les fractions attribuables associées. Le travail présenté explore ces aspects dans 18 zones métropolitaines sur la période 1970-2015.

Tableau 1. Exemples de paramètres pouvant influencer la forme de la relation température-mortalité au cours du temps

Paramètres	Mécanismes	Influence possible sur la relation température mortalité
Déplacement de la distribution des températures vers des températures plus élevées	Acclimatation à la chaleur et désacclimatation au froid	Diminution des risques associés aux températures extrêmes chaudes
Sédentarisation	Moindre acclimatation mais également moindre exposition à des températures extérieures	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation de la plage de température associée à un risque faible • Augmentation des risques associés aux températures extrêmes
Vieillessement de la population	Moindre efficacité de la thermorégulation physiologique et comportementale	<ul style="list-style-type: none"> • Diminution de la plage de température associée à un risque faible • Augmentation des risques associés aux températures extrêmes
Progrès médical	Meilleure prise en charge thérapeutique et moindre risque de décès	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation de la plage de température associée à un risque faible • Diminution des risques associés aux températures inhabituelles
Amélioration socio-économique	Meilleur accès à des technologies limitant l'exposition (chauffage, climatisation, bâtiments adaptés, moindre recours au travail de force...)	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation de la plage de température associée à un risque faible • Diminution des risques associés aux températures inhabituelles
Dégradation socio-économique	Moindre efficacité de la thermorégulation physiologique et comportementale, moindre qualité de la prise en charge médicale	<ul style="list-style-type: none"> • Diminution de la plage de température associée à un risque faible • Augmentation des risques associés aux températures inhabituelles
Augmentation de la variabilité climatique	Moindre efficacité de la thermorégulation physiologique et comportementale (y compris via les technologies)	Augmentation des risques associés aux températures inhabituelles
Augmentation des extrêmes de températures	Moindre efficacité de la thermorégulation physiologique et comportementale (y compris via les technologies)	Augmentation des risques associés aux températures extrêmes
Augmentation de la population urbaine	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation de l'exposition (îlot de chaleur urbain) et de la sédentarité • Meilleur accès aux soins 	Augmentation des risques associés aux températures extrêmes
Mesures d'adaptation ciblant les événements extrêmes	Moindre exposition et meilleure prise en charge pendant les événements extrêmes,	Diminution des risques associés aux températures extrêmes

2. MÉTHODE

2.1 Zones et période d'étude

Les 18 zones d'étude retenues participent à un programme d'analyses multicentriques en séries temporelles sur la pollution de l'air et sur le climat [3] (Tableau 2). Elles ont été sélectionnées afin de représenter la variabilité climatique métropolitaine. Des critères topographiques, de continuité urbaine, et de disponibilité des données ont été appliqués pour sélectionner les communes participant à chaque zone d'étude. L'étude porte sur la période 1970-2015.

Tableau 2. Nombres de communes et localisation des stations météorologiques de type de climat de chaque zone d'étude

Type de climat	Zone	Nombre de communes dans la zone d'étude	Longitude (°); Latitude (°); Altitude (m)	Nom de la station météorologique de référence
Océanique	Bordeaux	22	-0,57; 44,83; 16	Bordeaux Mérignac*
	Le Havre	16	0,13; 49,5; 70	Le Havre – Cap de la Hève
	Nantes	27	-1,55; 47,22; 20	Nantes-Bougenais*
	Rennes	4	-1,68; 48,08; 35	Rennes Saint-Jacques*
	Rouen	42	1,08; 49,43; 22	Rouen-Boos*
Océanique altéré	Lens-Douai	32	2,95; 50,4; 37	Lille-Lesquin*
	Lille	85	3,07; 50,63; 20	Lille-Lesquin*
	Paris	124	2,33; 48,87; 60	Paris Montsouris
	Toulouse	51	1,43; 43,6; 146	Toulouse Blagnac*
Semi-continental	Clermont-Ferrand	16	3,08; 45,78; 365	Clermont-Ferrand
	Dijon	15	5,02; 47,32; 245	Dijon-Longvic*
	Grenoble	46	5,72; 45,17; 212	Grenoble*
	Lyon	19	4,85; 45,75; 166	Lyon-Bron*
	Nancy	38	6,2; 48,68; 222	Nancy-Essey*
	Strasbourg	20	7,75; 48,58; 144	Strasbourg – Entzheim*
Méditerranéen	Marseille	8	5,4; 43,3; 20	Aéroport de Marignane*
	Montpellier	22	3,88; 43,6; 35	Montpellier*
	Nice	4	7,25; 43,7; 10	Nice*

* Stations situées dans l'aéroport

2.2 Données

Les données de températures moyennes quotidiennes ont été obtenues pour une station de référence par zone d'étude auprès de Météo-France pour la période 1970-2015 (Tableau 1).

Le choix d'une seule station, et de la température moyenne, s'appuie sur des travaux précédents sur la zone d'étude de Paris, qui avaient conclu à des performances de modélisation identiques 1) en considérant les données d'une ou plusieurs stations météorologiques, et 2) pour différents indicateurs de températures (moyenne, minimale, maximale), et d'humidité [8].

Les données quotidiennes de mortalité toutes causes (CIM10 : A00-Y98) tous âges ont été extraites du Système National des Données de Santé. Les données de population ont été obtenues auprès de l'Insee à partir des recensements de la population de 1968, 1975, 1982, 1990, 1999, 2010 et 2015.

2.3 Principe général d'analyse

Le principe général est celui d'analyses multicentriques en séries temporelles. Des modèles sont réalisés dans chaque zone, puis combinés par une méta-analyse, voir une méta-régression si l'hétérogénéité observée le justifie.

Afin de prendre en compte le caractère relatif de la chaleur et du froid en fonction du type de climat considéré, les modèles estiment les risques de mortalité à partir des percentiles de la distribution des températures moyennes de chaque zone.

L'ensemble des analyses ont été réalisées à l'aide du logiciel R en utilisant le package dlnm.

2.4 Analyse descriptives

Plusieurs analyses descriptives ont été réalisées à partir des données météorologiques pour comprendre l'évolution des températures observées sur la période d'étude (distribution annuelles, nombres de jours dépassant les percentiles 10 et 90 de la période 1970-2015, percentiles 10 et 90 de chaque année). Par ailleurs, une régression quantile de l'année sur le percentile 1 et le percentile 99 de la distribution des températures moyennes a été réalisée dans chaque zone d'étude afin d'estimer l'écart entre le percentile 1 de la distribution des températures moyennes en 2015 et le percentile 1 de la distribution des températures moyennes en 1970 et celui entre le percentile 99 de la distribution des températures moyennes en 2015 et le percentile 99 de la distribution des températures moyennes en 1970.

2.5 Analyse de la relation température mortalité sur la période 1970-2015

Un premier modèle a été réalisé pour étudier la relation température-mortalité sur l'ensemble de la période 1970-2015. Dans chaque zone d'étude, la relation température-mortalité est étudiée à l'aide d'un modèle linéaire généralisé avec une distribution poissonnienne de la mortalité en prenant en compte la sur-dispersion des données. Le modèle inclut la température moyenne, le jour de la semaine et, les jours fériés. Afin de prendre en compte la

tendance à long terme et la saisonnalité, le modèle comprend également une natural spline du temps. Cette spline est à 8 degrés de liberté par an pour Paris, Marseille, Lille et Lyon et 3 degrés de liberté par an pour les autres zones d'étude pour lesquelles le nombre journalier de décès est plus faible, ceci pour éviter un sur-ajustement.

L'association avec la température est modélisée à l'aide de modèles non linéaires à retards distribués [9]. L'association dans la dimension des températures est modélisée à l'aide d'une B-spline quadratique avec trois nœuds internes placés aux percentiles 2, 60 et 98 de la distribution des températures. Le choix du nombre et de la position des nœuds a été obtenu à l'aide du critère d'Akaike. L'association dans la dimension des retards est modélisée à l'aide d'une natural spline avec deux nœuds internes équidistants dans l'échelle log afin de permettre plus de flexibilité dans la première partie de la courbe des retards où plus de variabilité est attendue. La période des retards étudiée est fixée à 21 jours. Cette durée est classiquement utilisée dans la littérature, car elle permet de prendre en compte les effets différés du froid, tout en limitant les interférences avec la saisonnalité qui seraient observées en prenant une période plus longue. Pour une exposition à une température donnée, le modèle permet d'estimer le risque relatif lag par lag entre 0 et 21 jours après cette exposition. Il permet également d'estimer les RR cumulés sur plusieurs jours ; nous présentons l'estimation cumulée sur 0-21 jours. Travailler sur des associations cumulées réduit le nombre de paramètres à combiner lors de la méta-analyse. Les estimations spécifiques à chaque zone sont combinées en utilisant un modèle à effet aléatoire selon la méthodologie développée par Gasparrini *et al.* [10, 11].

La relation entre la température et la mortalité étant non-linéaire, les risques relatifs (RR) ne peuvent pas être calculés pour un incrément fixe de température. Ils sont exprimés pour un écart entre une température de référence, et la température pour laquelle on souhaite connaître le RR.

Pour ce premier modèle, les RR sont présentés pour les percentiles de températures de la période 1970-2015, en indiquant les valeurs absolues de températures correspondantes. Ces percentiles et leur transcription en valeur absolue correspondent à la moyenne des percentiles observés dans chaque zone d'étude (par exemple, le percentile 50 correspond à la moyenne des percentiles 50 de chaque zone d'étude, soit sur la période 1970-2015 une température moyenne de 12,15°C). Les résultats sont présentés pour les percentiles 0,1, 1, 2,5, 97,5, 99,5 et 99,9, afin de faire un focus sur les températures les plus extrêmes, froides et chaudes.

Les résultats présentés sont ceux issus de la méta-analyse incluant l'ensemble des villes. Une méta-analyse par type de climat a également été réalisée à titre d'analyse de sensibilité.

2.6 Analyse des évolutions temporelles de la relation température mortalité

Afin d'approcher les évolutions temporelles, un second modèle a été réalisé sur la base du modèle décrit ci-dessous, en introduisant un terme d'interaction entre la température et le temps, selon une approche proposée par Gasparrini *et al.* [12].

Ce modèle permet d'examiner les évolutions temporelles de la forme de la relation, des RR associés à différents percentiles de températures, et de la TMM.

2.6.1 Forme de la relation et température de mortalité minimale

Pour examiner la forme de la relation, nous avons représenté graphiquement les RR cumulés sur 0-21 lags pour toute la distribution des températures, ainsi que les RR lag par lag pour quelques températures froides et chaudes, pour une année tous les cinq ans. Comme pour le modèle précédent, les RR sont calculés pour les percentiles de températures de la période 1970-2015. Pour ne pas alourdir le rapport, seules quelques années sont présentées, ainsi que le ratio des RR cumulés sur 0-21 lags entre 2015 et 1970.

Pour chaque année, une estimation de la TMM a été réalisée, ainsi qu'une estimation de l'incertitude associée, selon la méthode décrite par Tobias *et al.* [7]. Cette incertitude se présente sous la forme d'un intervalle de confiance à 95% (IC95).

2.6.2 Risques relatifs associés à une température donnée

Pour examiner si une température absolue avait plus ou moins d'impact en début ou en fin de période, nous avons calculé les RR chaque année, à partir de la relation modélisée pour cette année et des percentiles de température de la période 1970-2015. Les résultats sont toujours présentés pour les percentiles 0,1, 1, 2,5, 97,5, 99,5 et 99,9, pour une année tous les 10 ans (tous les cinq ans en Annexe), ainsi que pour les années caractérisées par des événements climatiques exceptionnels (pour les vagues de chaleur ; 1976, 1983, 2003, 2006 et 2015, pour les vagues de froid ; 1985).

2.6.3 Risques relatifs associés à une température inhabituelle par rapport aux années précédentes

Pour examiner si une température inhabituelle était associée à un risque plus ou moins élevé en début ou en fin de période, nous avons calculé les RR chaque année, à partir de la relation modélisée pour cette année et des percentiles de température de cette année et des quatre années précédentes. Ce choix de 5 ans (années N à N-4) a été fait arbitrairement pour prendre en compte une éventuelle acclimatation à court-terme, en considérant que la population pouvait garder une mémoire des températures ressenties sur cette période, et avoir pris des mesures pour s'en protéger qui se répercutent sur les années suivantes (ex achat de matériel, nouvelles habitudes de vie et d'organisation du travail pendant les canicules...). Les résultats sont présentés pour les mêmes percentiles et les mêmes années que précédemment (mais correspondent à des valeurs absolues de températures différentes).

2.6.4 Risques relatifs associés à une température inhabituelle pour l'année

Dans une logique similaire à celle décrite ci-dessus, nous avons également calculé les RR de chaque année pour les percentiles de l'année en cours.

2.7 Calcul des fractions attribuables à des températures non optimales

Les associations température-mortalité combinées pour chaque année permettent de calculer la fraction de la mortalité attribuable associée selon la méthodologie décrite par Gasparini *et. al.* [13].

Le calcul d'une fraction attribuable signifie l'acceptation de la causalité entre l'exposition (la température) et l'effet (la mortalité). Au niveau individuel, il existe un ensemble de preuves physiologiques indiquant une causalité entre la température interne et la mortalité [1]. Les modèles de thermo-physiologie [14, 15], des observations en conditions extrêmes et des études expérimentales confirment l'influence de la température ambiante sur la température interne, et donc un lien de causalité avec la mortalité, en particulier pour les températures très faibles ou très élevées. Ainsi, pour ces températures, on peut admettre la causalité entre le froid, la chaleur, et la mortalité.

L'approche classique dans la littérature est de définir la fraction attribuable au froid à partir des températures inférieures à la TMM, et la fraction attribuable à la chaleur à des températures supérieures à la TMM. Cette interprétation est délicate pour les températures modérées proches de la TMM. Par exemple, dans les 18 zones métropolitaines, entre 2000 et 2010, les TMM variaient de 13 à 21°C selon la zone [3]. Or, il n'existe pas d'éléments physiologiques ou expérimentaux permettant de dire qu'une température de 12°C va systématiquement initier des mécanismes physiologiques de réponse au froid, et une température de 14°C des mécanismes de réponse à la chaleur. A ces températures, on peut attribuer les effets à une température « non-optimale », qui peut être majoritairement expliquée par une mobilisation de la réponse physiologique au froid, ou à la chaleur, ou à un mélange des deux dans la population, selon la valeur de la TMM. Selon un raisonnement un peu différent, certains auteurs proposent de considérer que les effets des températures les plus faibles ou élevées sont majoritairement des effets directs de la température, et les températures dans une zone intermédiaire majoritairement des effets indirects de la température, via une influence sur le système immunitaire par exemple [16]. Dans tous les cas, il n'est pas possible de fixer des seuils distinguant les températures avec un effet essentiellement direct, et celles avec un effet essentiellement indirect.

Considérant, ces difficultés d'interprétation, nous avons fait des choix de calculs orientés par une logique de prévention. Lorsque les températures sont très faibles ou très élevées, on peut accepter une causalité d'un effet direct prédominant du froid, ou de la chaleur. L'objet de la prévention est alors en priorité de réduire l'exposition et améliorer la prise en charge en cas d'exposition, pour limiter cet effet direct. Pour les températures intermédiaires, la causalité est probablement majoritairement un effet peu différencié de la chaleur ou du froid, ainsi que des effets indirects. Dans ce cas, la prévention vise plutôt à améliorer l'état de santé et la capacité de thermorégulation.

Les fractions attribuables à des températures non-optimales ont été calculées pour chaque année à partir de la TMM (TMM annuelle). Elles donnent la mesure du poids global de la température sur la mortalité.

Nous avons également calculé les fractions attribuables au 10% des températures les plus froides, et les plus chaudes, de la distribution 1970-2015 des températures de chaque ville (fractions attribuables aux températures respectivement inférieures aux percentiles 10 ou supérieures aux percentiles 90 de chaque ville, de la période 1970-2015). Un calcul similaire a enfin été réalisé pour les 10% des jours les plus froids et les plus chauds de chaque année

dans chaque ville (fraction attribuables aux températures respectivement inférieures aux percentiles 10 ou supérieures au percentile 90 de chaque ville, et de chaque année).

Ces résultats donnent la mesure des effets directs de la chaleur et du froid, nécessitant une prévention *ad hoc*.

3. RÉSULTATS

3.1 Caractéristiques et principales évolutions des zones d'études sur la période d'étude

L'annexe 1 présente des analyses descriptives des données météorologiques et de mortalité par zone d'étude.

Pour ne pas alourdir la présentation, nous décrivons les données de populations pour les recensements 1975, 1990, 1999 et 2010, ce qui donne des points de repères en début, milieu et fin de période.

En 2010, les zones d'études rassemblaient 15,65 millions d'habitants, dont 1,7 millions âgés de 75 ans et plus. Entre 1975 et 2010, la population a augmenté de 1,3 millions d'habitants, dont 0,96 millions âgés de 75 ans et plus. En 1975, 5,2 % de la population des zones d'études avaient 75 ans et plus, une part qui monte à 10,9 % en 2010. Lille et Paris se distinguent par une population plus jeune, et Nice par une population plus âgée (Tableau 3). Seules trois zones d'étude ont vu leur population diminuer entre 1975 et 2010 (Le Havre, Lens-Douai et Marseille). Dans les autres zones, la population, et la densité de population, ont augmenté de +0,5 (Rouen) à +63 % (Montpellier). En 2010, Paris se distingue par une densité de population six fois plus élevée que la deuxième zone d'étude la plus dense (Lille), et 28 fois plus élevée que la zone d'étude la moins dense (Dijon) (Tableau 3).

En 1975, le taux de mortalité variait de 680 décès pour 100 000 habitants à Grenoble, à 1 308 décès pour 100 000 habitants à Nice. En 2010, il variait de 595 décès pour 100 000 habitants à Toulouse, et à 1 033 décès pour 100 000 habitants à Lens-Douai. Dans la majorité des zones, le taux de mortalité a diminué entre les années 70 et 2000, puis ré-augmenté à partir de 2010 (Tableau 3).

Au total, l'étude a porté sur 5 522 473 décès. Neuf villes ont en moyenne moins de 10 décès par jours (Rennes, Clermont-Ferrand, Dijon, Le Havre, Montpellier, Nancy, Grenoble, Strasbourg et Lens-Douai). Trois villes ont en moyenne plus de 20 décès par jour (Lyon, Lille, Marseille), les autres se situant entre 11 et 14 décès par jour (Nantes, Rouen, Toulouse, Bordeaux, Nice). Paris se distingue nettement avec en moyenne 135 décès journaliers (Tableau 4).

Tableau 3. Caractéristiques de population des zones d'études

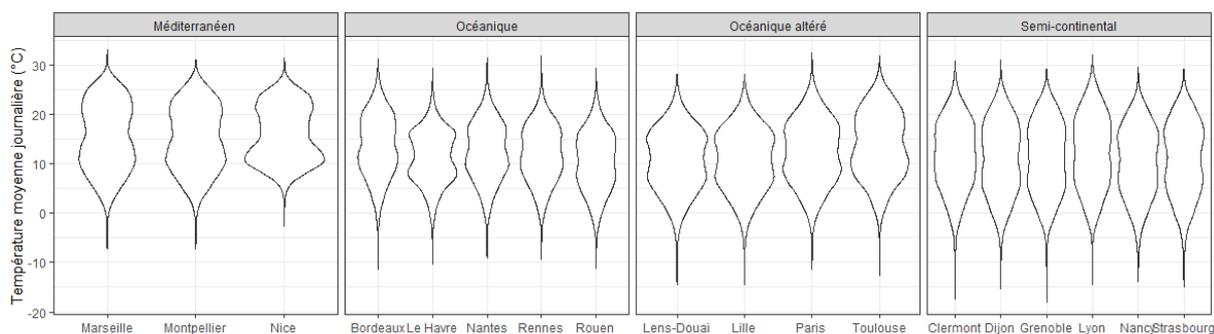
	Part des 75 ans et plus parmi la population (%)					Superficie	Densité	Nombre total	Taux de mortalité pour 100 000 habitants			
	1975	1990	1999	2010	2015		de population (hab. / km ²) 2015	de décès entre 1970 et 2015	1975	1990	1999	2010
Bordeaux	5,4	6,8	7,2	8,6	8,1	334	2 090	236 788	1 059	871	839	737
Le Havre	4,1	5,7	6,4	8,9	9,2	183,04	1 285	108 787	963	901	886	928
Nantes	3,9	5,4	5,8	7,8	8,0	598,39	1 077	180 511	848	726	690	669
Rennes	3,0	5,0	5,7	7,7	7,6	111,81	2 259	66 286	687	584	658	622
Rouen	3,8	6,4	6,6	9,0	9,1	356,32	1 260	177 136	860	803	828	858
Lens-Douai	3,4	5,2	6,0	8,5	8,7	228,8	1 414	160 855	1 077	989	985	1 033
Lille	4,3	5,3	5,2	6,7	6,8	611,52	1 857	432 191	1 077	851	823	722
Paris	4,9	6,6	6,1	6,8	6,9	762,24	8 886	2 260 938	954	807	719	607
Toulouse	4,4	6,2	6,1	7,2	7,2	529,58	1 558	198 975	821	685	660	595
Clermont-Ferrand	3,5	5,4	6,2	9,0	9,5	300,62	952	87 793	774	780	773	1 009
Dijon	3,60	5,6	6,4	9,0	9,3	166,03	1 465	76 461	781	670	766	735
Grenoble	3,2	4,9	5,5	8,0	8,7	478,07	1 015	135 277	680	667	664	643
Lyon	4,1	6,2	6,5	8,1	8,0	231,3	4 737	348 547	875	780	745	664
Nancy	3,8	5,7	6,1	8,4	8,8	325,71	1 015	124 929	879	779	791	828
Strasbourg	3,8	5,8	5,6	7,4	7,7	222,43	2 029	155 354	976	835	742	732
Marseille	5,5	7,8	8,2	9,7	9,8	442,15	2 225	437 369	1 059	1 059	1 002	873
Montpellier	4,9	6,1	6,2	7,7	7,7	309,95	1 384	103 520	804	768	698	646
Nice	8,4	11,1	11,2	12,4	12,4	119,58	3 638	230 756	1 308	1 255	1 052	1 016

Tableau 4. Distribution de la mortalité journalière 1970-2015 par zones

	Moyenne	Min	P25	P50	P75	Max
Bordeaux	14	2	11	14	17	41
Le Havre	6	0	5	6	8	19
Nantes	11	1	8	11	13	39
Rennes	4	0	2	4	5	14
Rouen	11	0	8	10	13	31
Lens-Douai	10	0	7	9	12	41
Lille	26	7	21	25	30	66
Paris	135	66	114	132	152	876
Toulouse	12	1	9	12	14	34
Clermont-Ferrand	5	0	3	5	7	16
Dijon	5	0	3	4	6	16
Grenoble	8	0	6	8	10	47
Lyon	21	4	17	20	24	82
Nancy	7	0	5	7	9	25
Strasbourg	9	0	7	9	11	38
Marseille	26	2	22	26	30	74
Montpellier	6	0	4	6	8	20
Nice	14	0	11	13	16	36

Le Tableau 5 résume la distribution des températures moyennes journalières entre 1970 et 2015 par zone d'étude. Les températures sont globalement plus élevées dans les zones de type méditerranéen et océanique altéré, mais les températures les plus chaudes sont d'ordre de grandeur similaire dans l'ensemble des zones. Les différences sont plus marquées vers le froid, avec des températures négatives très rares dans les villes méditerranéennes (Figure 2).

Figure 2. Distribution des températures moyennes journalières par ville et type de climat entre 1970 et 2015



La Figure 3 présente, pour chaque zone, les estimations de la différence entre le percentile 1 de la distribution des températures moyennes en 2015 et le percentile 1 de la distribution des températures moyennes en 1970 et celle entre le percentile 99 de la distribution des températures moyennes en 2015 et le percentile 99 de la distribution des températures moyennes en 1970 modélisées par une régression quantile.

Les percentiles 99 sont significativement plus élevés en 2015 qu'en 1970 pour l'ensemble des zones sauf trois zones de climat océanique. Les écarts moyens sont de l'ordre de +2,8°C dans les zones de climat semi-continentale, +2,3 °C dans les zones de climat océanique altéré, +2,0°C dans les zones de climat méditerranéen, et +1,2°C dans les zones de climat océanique.

La situation est plus contrastée pour les percentiles 1, qui ont tendance à être plus élevés en 2015 qu'en 1970 dans toutes les zones, sauf Marseille (plus faibles), Montpellier, Nice, Bordeaux, Toulouse et Grenoble (stables).

Les écarts moyens sont de l'ordre de 0,8°C dans les zones de climat océanique, 1,2°C dans les zones de climat semi-continentale, et 1,3°C dans les zones de climat océanique altéré.

Figure 3. Estimations des écarts (°C) entre le percentile 1 de la distribution des températures moyennes en 2015 et le percentile 1 de la distribution des températures moyennes en 1970 et celui entre le percentile 99 de la distribution des températures moyennes en 2015 et le percentile 99 de la distribution des températures moyennes en 1970

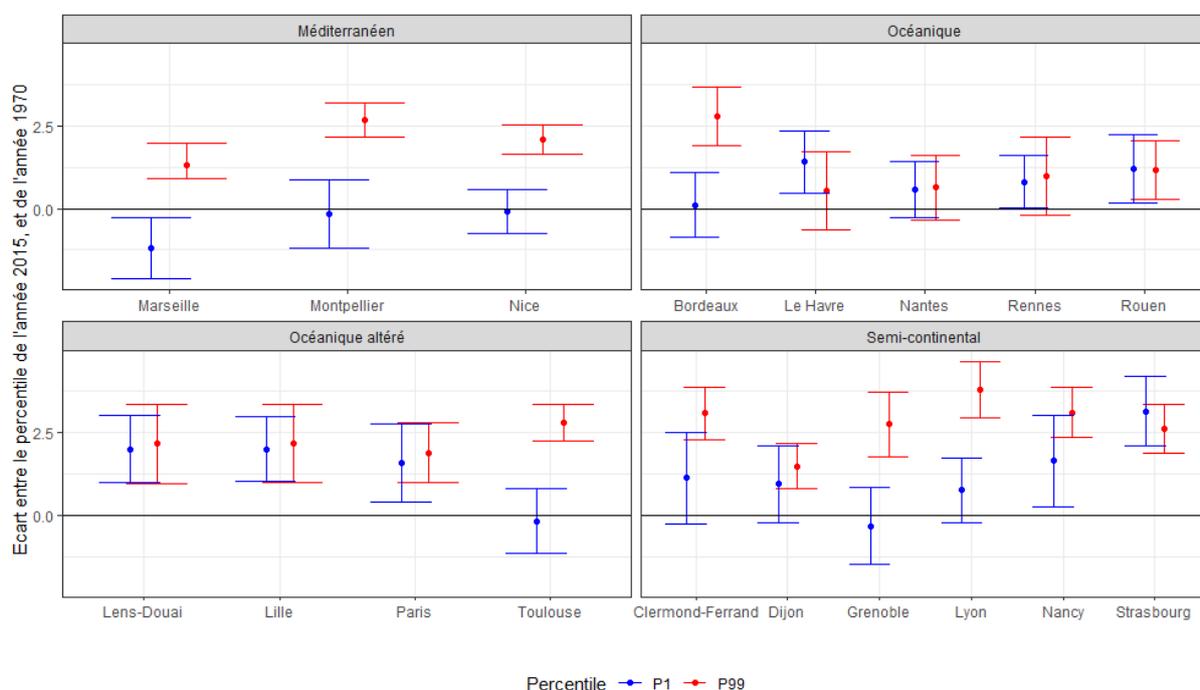


Tableau 5. Distribution de la température moyenne journalière 1970-2015 par zones

	Moyenne	Min	P0,1	P1	P2,5	P10	P25	P50	P75	P90	P97,5	P99,5	P99,9	Max
Bordeaux	13,5	-11,3	-5,4	-0,8	1,4	5,3	9,0	13,7	18,4	21,5	24,7	27,4	29,0	31,3
Le Havre	11,3	-10,3	-5,4	-1,2	0,6	4,5	7,4	11,2	15,5	17,9	20,9	24,1	26,4	29,3
Nantes	12,3	-9,2	-4,9	-1,0	0,8	4,7	8,2	12,3	16,9	19,9	23,1	25,9	28,4	31,3
Rennes	11,9	-9,4	-4,9	-1,1	0,7	4,4	7,8	12,0	16,3	19,3	22,3	25,0	26,8	31,8
Rouen	10,3	-11,1	-8,1	-3,2	-1,4	2,4	6,00	10,4	14,9	17,9	21,3	24,1	26,3	29,3
Lens-Douai	10,6	-14,6	-9,0	-3,6	-1,5	2,4	6,1	10,7	15,5	18,5	21,8	24,5	26,4	28,1
Lille	10,6	-14,6	-9,0	-3,6	-1,5	2,4	6,1	10,7	15,5	18,5	21,8	24,5	26,4	28,1
Paris	12,3	-11,4	-6,6	-1,9	0,1	3,8	7,5	12,3	17,3	20,7	24,1	27,0	29,2	32,4
Toulouse	13,6	-12,7	-6,3	-1,0	1,00	5,0	8,5	13,4	18,9	22,4	25,4	27,7	29,5	31,8
Clermont-Ferrand	11,5	-17,4	-9,9	-4,1	-2,1	2,3	6,4	11,7	17,0	20,5	23,9	26,8	29,2	30,7
Dijon	11,0	-15,4	-9,8	-4,7	-2,7	1,3	5,4	11,1	16,8	20,5	23,7	26,1	28,1	31,1
Grenoble	11,0	-17,9	-11,0	-4,5	-2,3	1,4	5,4	11,1	16,8	20,5	23,6	25,7	27,6	29,2
Lyon	12,3	-14,4	-8,7	-3,2	-1,6	2,4	6,5	12,4	18,2	22,0	25,6	28,0	30,0	32,0
Nancy	10,3	-13,9	-11,0	-5,7	-3,4	0,9	5,0	10,5	15,9	19,5	22,7	25,2	27,4	29,6
Strasbourg	10,8	-14,9	-11,2	-6,0	-3,5	0,8	5,1	11,0	16,8	20,3	23,4	25,7	27,6	29,2
Marseille	15,3	-7,2	-3,1	1,5	3,0	6,4	9,9	15,0	21,1	24,5	26,9	28,3	29,6	33,1
Montpellier	14,9	-7,3	-3,2	1,5	3,2	6,4	9,9	14,7	20,4	23,6	26,2	27,9	29,5	30,9
Nice	15,8	-2,7	2,3	5,4	6,6	8,8	11,1	15,3	20,8	23,7	25,9	27,5	28,9	31,4

3.2 Analyse de la relation température-mortalité sur la période 1970-2015

La Figure 4 représente la relation température-mortalité cumulée sur les 21 jours suivant l'exposition pour la période 1970-2015, issue de la méta-analyse. On retrouve la forme habituelle indiquant une augmentation modérée du risque de mortalité vers des percentiles bas de températures, et une augmentation non-linéaire abrupte vers des percentiles élevés. L'hétérogénéité entre zones est importante ($I^2=82\%$). Les RR cumulés sur 0-21 jours pour des percentiles extrêmes de températures sont rapportés dans le Tableau 6.

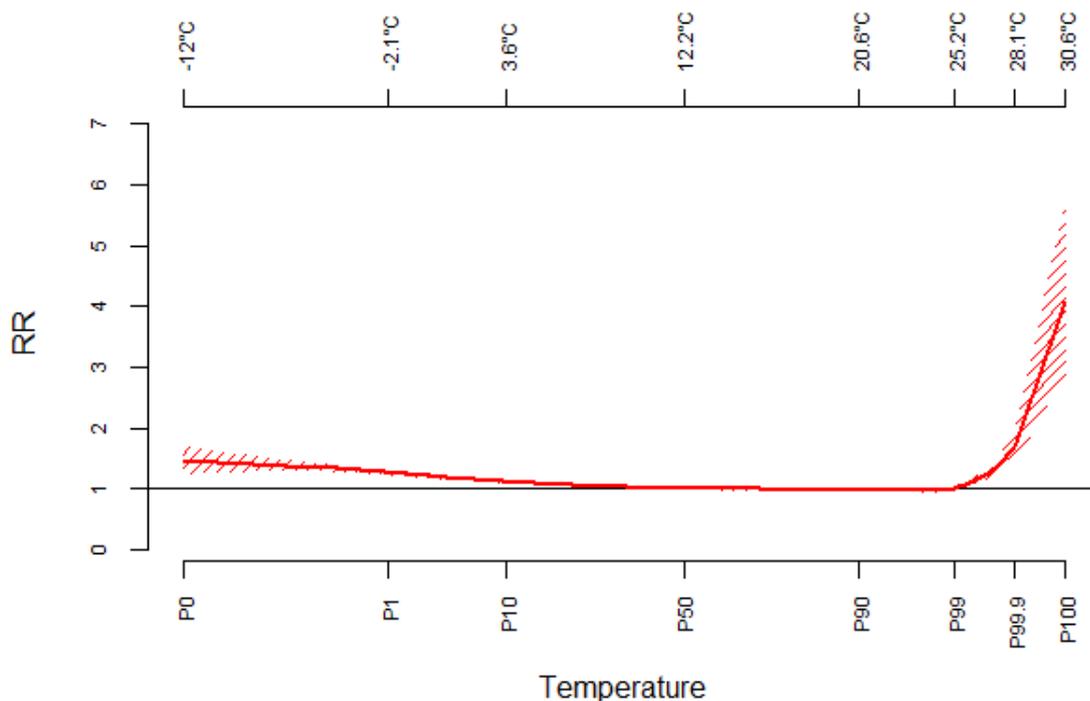
On n'observe pas d'influence du type de climat sur la forme générale de la relation et sur l'ordre de grandeur des RR (Tableau 6).

Tableau 6. RR cumulés sur 21 jours pour différents percentiles de températures par rapport au P50 – méta-analyse – période 1970-2015

	RR associé au percentile (en référence au P50)					
	0,1	1	2,5	97,5	99,5	99,9
Toutes les zones	1,39 [1,32 :1,46]	1,26 [1,24 :1,29]	1,21 [1,19 :1,23]	0,98 [0,96 :1,00]	1,13 [1,07 :1,18]	1,69 [1,47 :1,94]
Océanique altéré	1,40 [1,27 :1,54]	1,28 [1,23 :1,33]	1,22 [1,18 :1,25]	0,96 [0,93 :1,00]	1,09 [0,99 :1,20]	1,61 [1,19 :2,17]
Océanique	1,48 [1,33 :1,63]	1,30 [1,24 :1,35]	1,22 [0,18 :1,26]	0,94 [0,91 :0,98]	1,07 [0,97 :1,17]	1,63 [1,23 :2,17]
Semi-continental	1,32 [1,20 :1,44]	1,23 [1,18 :1,28]	1,18 [1,14 :1,22]	1,00 [0,96 :1,03]	1,15 [1,06 :1,25]	1,65 [1,29 :2,11]
Méditerranéen	1,33 [1,17 :1,51]	1,26 [1,20 :1,33]	1,21 [1,61 :1,27]	1,01 [0,97 :1,06]	1,24 [1,11 :1,40]	2,06 [1,43 :3,00]

Figure 4. Risques relatifs cumulés sur 21 jours (en référence au P50) pour la période 1970-2015

$I^2 = 82\%$. Les RR sont exprimés pour les percentiles (moyenne des percentiles de l'ensemble des zones) de la période 1970-2015, les températures absolues correspondantes sont reportées au-dessus



3.3 Évolutions temporelles de la relation température mortalité et de la température de mortalité minimale

3.3.1 Forme générale de la relation température-mortalité (association cumulée sur 0-21 jours)

La Figure 5 illustre les relations observées pour 1980 et 2010. On note que la forme globale de la relation change peu au cours du temps, avec le maintien d'une forme en J, une augmentation progressive de la mortalité vers le froid, et une augmentation plus marquée vers la chaleur. L'effet des percentiles bas est plus marqué en fin de période, et l'effet des percentiles élevés plus faible, comme illustré par le ratio des RR entre 2010 et 1980 dans la Figure 5. Cette tendance est progressive sur toute la période (cf. ci-dessous pour un détail sur les RR, et l'annexe 2 pour les ratios de RR entre 2010 et 2000, et 2015 et 1970).

A noter qu'on retrouve peu de variation par type de climat, mais que dans les années 70 et 80, les risques associés des températures supérieures au percentile 99 étaient légèrement plus marqués dans les zones de climat méditerranéen. A partir des années 90, on n'observe plus d'influence du type de climat sur les résultats. Aussi, ce rapport présente uniquement les méta-analyses pour l'ensemble des zones, sans distinction des types de climat.

3.3.2 Profils temporels de la relation température -mortalité

Les Figures 6 et 7 détaillent les évolutions des RR par lags pour un percentile de température donné (P1 pour illustrer la réponse au froid, P99 pour la chaleur), pour les années 1970, 1985, 2000 et 2015. Les formes générales ne changent pas selon la période. On note pour le P99 une tendance à un impact immédiat (lag 0 et 1) qui diminue au fil du temps.

Figure 5. RR cumulés sur 21 jours (en référence au P50) pour 1980 et 2010

Les RR sont exprimés pour les percentiles (moyenne des percentiles de l'ensemble des zones) de la période 1970-2015, les températures absolues correspondantes sont reportées au-dessus.

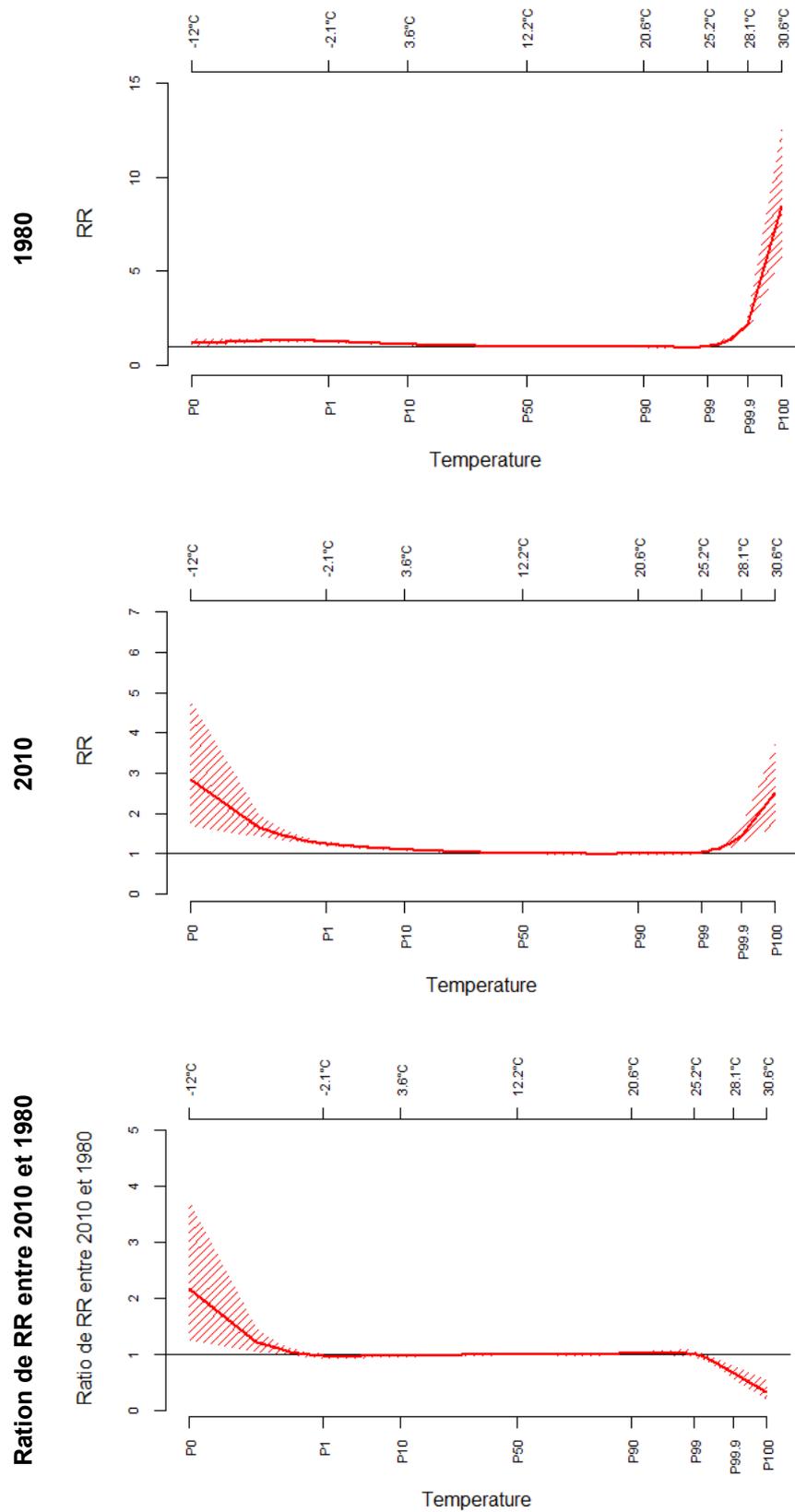


Figure 6. Graphe des RR par retard pour le percentile 1 (moyenne des percentiles 1 de chaque zone) de la période 1970-2015, pour les années 1970, 1985, 2000 et 2015

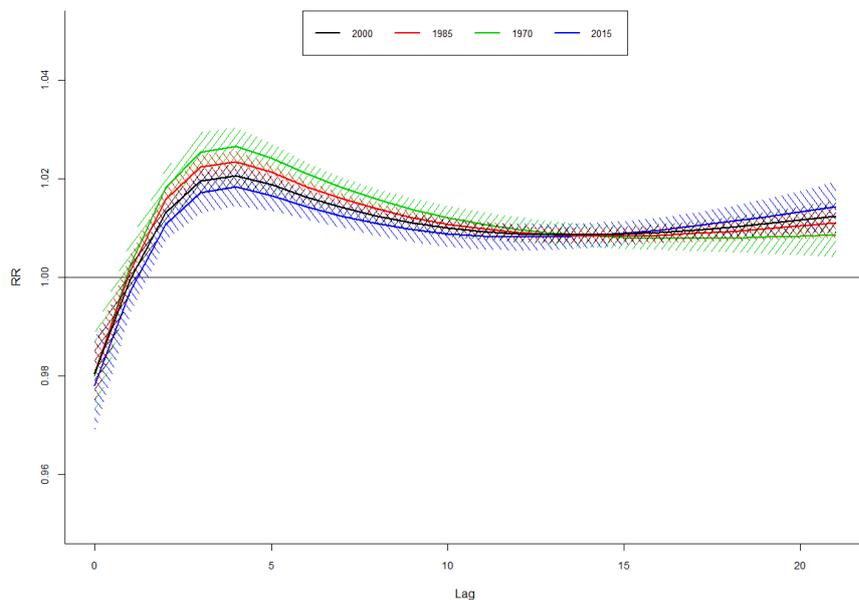
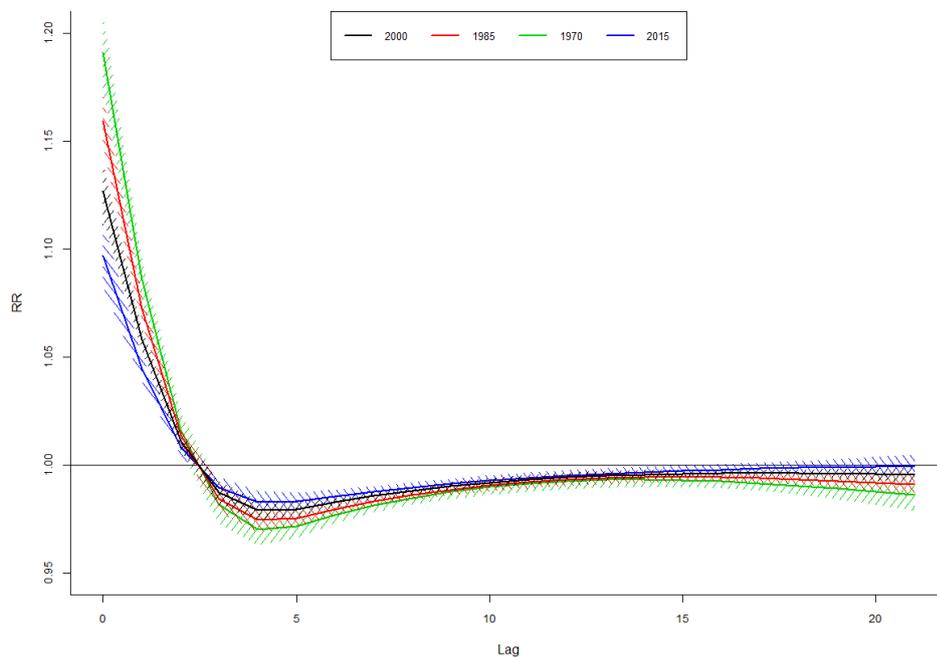


Figure 7. Graphe des RR par retard percentile 99 (moyenne des percentiles 99 de chaque zone) de la période 1970-2015, pour les années 1970, 1985, 2000 et 2015



3.3.3 Évolution de la TMM

En 1980, la moyenne des TMM était de 21,3°C dans les villes de climat océanique, 21,8°C dans les villes de climat océanique altéré, 22,2° dans les villes de climat semi-continentale, et 25,5°C dans les villes de climat méditerranéen. En 2010, elle était respectivement de 17,7°C, 18,0 °C, 18,0°C et 21,2°C dans ces villes. Cette évolution à la baisse, progressive sur l'ensemble de la période, est associée à une augmentation de l'incertitude autour de la TMM (les IC sont en moyenne de 10°C en 2010, vs 4°C en 1980), qui rend les tendances difficilement interprétables (Tableau 7).

Tableau 7. TMM (IC95%, °C) en 1970, 1980, 2000 et 2015

	1970	1980	2000	2010	2015
Bordeaux	23,6 [19,6:24]	22,6 [19,8:22,8]	23 [18:25,2]	19,3 [14,9:25,1]	18,5 [14,4:25,2]
Le Havre	21,1 [16,8:21,7]	20,4 [17:20,8]	19,8 [15,6:21,6]	16,8 [12,6:20,9]	15,9 [12,1:21,5]
Nantes	22,2 [18,3:22,6]	21,8 [18,2:22,1]	21,6 [17:23,7]	18,2 [13,7:22,9]	17,2 [13,2:23,4]
Rennes	21,9 [17,9:22,4]	21,2 [18:21,5]	20,9 [16,4:22,8]	17,5 [13,1:21,7]	16,7 [12,8:22,7]
Rouen	21 [16,6:21,5]	20,3 [16,8:20,7]	23 [18:25,2]	16,6 [11,8:21,8]	18,5 [14,4:25,2]
Lens-Douai	20,8 [16,7:21,2]	20,6 [16,7:21]	19,7 [14,8:21,6]	16,8 [12,1:22,2]	15,7 [11,5:22,3]
Lille	20,7 [16,4:21,2]	20,6 [16,8:21]	19,7 [15,3:21,6]	16,7 [12,2:22,2]	15,7 [11,5:22,2]
Paris	23,8 [18,9:24,3]	22,6 [19:23]	22,5 [17:24,6]	18,7 [13,7:24,7]	17,8 [13,3:24,7]
Toulouse	24,7 [20:25,1]	23,2 [19,9:23,5]	23,3 [18,2:25,4]	19,9 [14,9:25,8]	19,1 [14,7:25,8]
Clermont-Ferrand	23,2 [18,1:23,7]	22,3 [18,1:22,7]	22 [16,5:24,2]	18 [13,1:24,3]	17,1 [12,5:24,3]
Dijon	23 [17,9:23,6]	22,5 [18:23]	21,5 [16,3:23,6]	18,1 [12,9:24,2]	16,9 [12,3:24,2]
Grenoble	22,7 [17,5:23,4]	21,6 [17,9:22]	21,5 [15,7:24]	17,5 [12,5:24]	16,7 [12,1:24]
Lyon	24,5 [19,8:24,9]	23,3 [19,4:23,6]	23,3 [17,5:26]	19,3 [14,2:26]	18,1 [13,4:26]
Nancy	21,1 [17,2:21,4]	21 [17,5:21,3]	20,4 [15,5:22,4]	17,3 [12,2:23,1]	15,9 [11,6:23,1]
Strasbourg	22 [17,4:22,5]	22,2 [17,6:22,8]	21 [15,9:23,2]	17,8 [12,9:23,7]	16,6 [12,3:23,7]
Marseille	26,3 [21,5 :26,8]	26,2 [21,8:26,7]	24,9 [19,9:27,2]	21,6 [17:27,2]	20,5 [16,4:27,2]
Montpellier	24,9 [20,8 :25,3]	25,4 [20,9:25,8]	23,9 [19,1:25,9]	20,8 [16,4:26,5]	20 [16:26,5]
Nice	25,0 [21,4 :25,4]	24,9 [21,8:25,2]	23,8 [20,1:25,2]	21,3 [17,1:26,2]	20,4 [16,8:26,2]

L'annexe 3 décrit l'évolution de la TMM par année et par zone, en la superposant à la distribution des températures observées chaque année. On n'observe pas d'évolution nette de la TMM, qui tend à diminuer, mais avec une incertitude associée qui augmente.

3.4 Évolutions temporelles des risques relatifs

L'annexe 4 présente le détail des RR obtenus tous les cinq ans pour les différentes modalités de calcul, avec, pour chaque période de référence de calcul des percentiles, les températures correspondantes. Les principaux enseignements sont résumés ci-dessous.

3.4.1 Risques relatifs associés à une température donnée

Le Tableau 8 détaille les RR pour différentes années, en se concentrant sur les percentiles très bas ou très élevés, puisque les ratios des RR présentés précédemment ne montrent pas d'évolutions temporelles pour les percentiles intermédiaires. Les résultats sont présentés tous les 10 ans à partir de 1975, et tous les 5 ans en Annexe 4.

On note une augmentation progressive des risques associés à une température extrêmement froide (percentile 0,1, soit -6,95°C). En 1975, cette température est associée à un RR de 1,258 [1,188 : 1,333], vs 1,723 [1,443 : 2,057] en 2015. Cette tendance n'est plus significative pour des températures froides moins extrêmes ; par exemple, le RR associé à une diminution du percentile 50 (12,15°C) au percentile 2,5 (-0,14°C) est de 1,223 [1,193:1,254] en 1975, et de 1,171 [1,137:1,205] en 2015 (Tableau 8).

Dans le même temps, les risques associés à une température extrêmement chaude (percentile 99,9 soit 28,12°C) diminuent progressivement. En 1975, le RR associé à cette température est de 2,333 [1,949:2,792], vs 1,333 [1,143:1,554] en 2015. La baisse des risques liés à la chaleur est observée jusqu'au percentile 99,5. Pour des chaleurs moins extrêmes, les risques sont stables, voire en légère augmentation. Ainsi le RR associé au percentile 97,5 (23,72°C) est de 0,955 [0,919:0,993] en 1975 vs 1,005 [0,975:1,036] en 2015. À noter qu'un RR cumulé sur 0-21 jours non significatif n'est pas étonnant pour ce percentile ; pour les chaleurs non extrêmes, un effet moisson compensant l'augmentation immédiate de la mortalité peut être observé au-delà des trois premiers jours suivant l'exposition, comme décrit par des études précédentes dans ces mêmes villes [3].

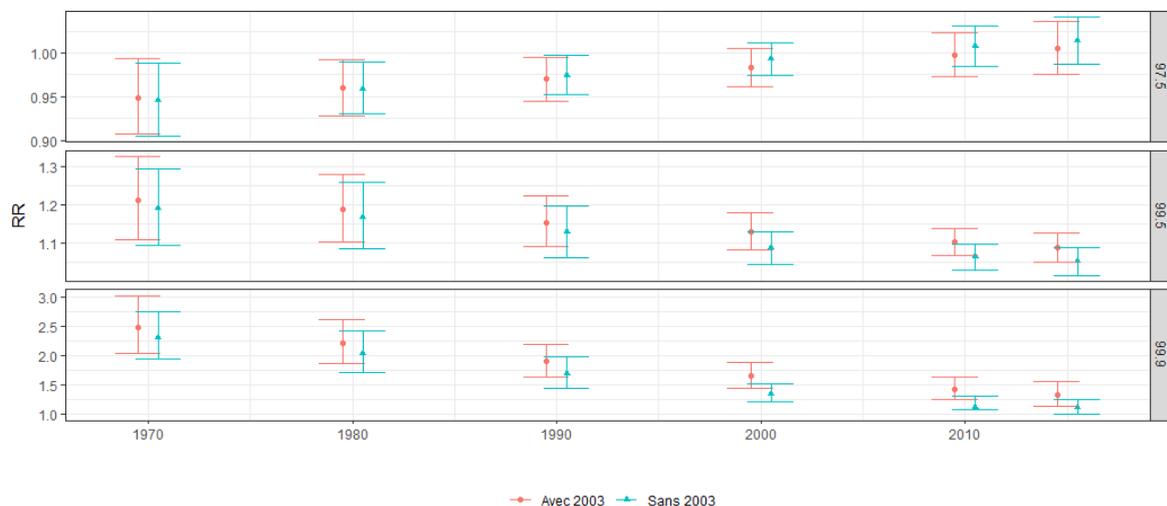
Ainsi, ces résultats indiquent une tendance à l'augmentation des risques associés au froid extrême et à la chaleur usuelle, et une diminution des risques associés à la chaleur extrême. Ils pourraient s'interpréter comme l'indication d'un décalage de la relation température mortalité se traduisant par une acclimatation progressive à la chaleur extrême, et une désacclimatation progressive au froid extrême.

Tableau 8. RR cumulés sur 21 jours pour différents percentiles et année, exprimés pour la distribution 1970-2015

Incrément en percentile	Incrément en °C	1975	1985	1995	2005	2015
Percentile 0,1 vs 50	-6,95 vs 12,15	1,258 [1,188:1,333]	1,382 [1,318:1,448]	1,492 [1,372:1,622]	1,607 [1,411:1,829]	1,723 [1,443:2,057]
Percentile 1 vs 50	-2,01 vs 12,15	1,281 [1,241:1,323]	1,267 [1,237:1,299]	1,258 [1,230:1,287]	1,246 [1,213:1,280]	1,236 [1,194:1,279]
Percentile 2,5 vs 50	-0,14 vs 12,15	1,223 [1,193:1,254]	1,208 [1,186:1,229]	1,196 [1,177:1,217]	1,183 [1,157:1,209]	1,171 [1,137:1,205]
Percentile 97,5 vs 50	23,72 vs 12,15	0,955 [0,919:0,993]	0,964 [0,937:0,992]	0,976 [0,953:0,999]	0,991 [0,968:1,015]	1,005 [0,975:1,036]
Percentile 99,5 vs 50	26,18 vs 12,15	1,199 [1,105:1,302]	1,171 [1,097:1,250]	1,140 [1,085:1,198]	1,117 [1,076:1,159]	1,089 [1,051:1,127]
Percentile 99,9 vs 50	28,12 vs 12,15	2,333 [1,949:2,792]	2,051 [1,753:2,400]	1,769 [1,544:2,027]	1,543 [1,357:1,755]	1,333 [1,143:1,554]

La canicule de 2003 n'a pas d'influence sur les évolutions temporelles observées. Lorsqu'on exclut août 2003 de la modélisation, les RR associés au percentile 99,9, sont significativement moins élevés sur la période 2000-2015 (Figure 11).

Figure 11. Influence de la canicule de 2003 sur les RR associés à des percentiles élevés de la distribution des températures sur la période 1970-2015



3.4.2 Risques relatifs associés à une température inhabituelle par rapport aux années précédentes

Le Tableau 9 détaille les RR pour différentes années. Les résultats sont présentés tous les 10 ans à partir de 1975, et tous les 5 ans en Annexe 4.

Les températures inhabituellement très froides (percentile 1 des années N à N-4) diminuent sur la période, tandis que les températures inhabituellement chaudes (percentile 97,5 et au-delà) augmentent. Les températures inhabituellement froides par rapport aux années précédentes ont plus d'impact en fin de période, même si elles sont en valeur absolue moins importantes. Par exemple, en 1985 sur une période où les températures ont été très basses par rapport au reste de la période d'étude, le percentile 0,1 (correspondant à $-10,07^{\circ}\text{C}$) est associé à un RR de 1,415 [1,280 : 1,565], plus faible que celui observé en 2015 (RR de 1,522 [1,371 : 1,690]) associé à un percentile correspondant à $-5,51^{\circ}\text{C}$). Si on enlève la vague de froid de l'hiver 1985 de la période de référence pour le calcul des percentiles, le percentile 0,1 est alors de $-3,3^{\circ}\text{C}$, le percentile 50 de $11,71^{\circ}\text{C}$, et le RR associé de 1,314 [1,278 : 1,352].

Symétriquement, les températures inhabituellement chaudes sont associées à des RR plus élevés en fin de période. On note de nouveau une augmentation des RR associés au percentile 97,5 (par exemple, 0,976 [0,950 : 1,003] en 1995 vs 1,012 [0,980 : 1,045] en 2015). En 1975, le RR associé au percentile 99,9 (soit à une température de $26,44^{\circ}\text{C}$) est de 1,271 [1,163 : 1,389]. En 2015, il est de 1,373 [1,157 : 1,628] (pour un percentile correspondant à une température de $28,31^{\circ}\text{C}$). On note qu'en 2005 le percentile 99,9 est associé à une valeur très haute ($29,60^{\circ}\text{C}$) car la vague de chaleur de 2003 est incluse dans les 4 années précédentes, et est donc associé à un RR également très élevé (2,269 [1,769 : 2,911]). Si on enlève août 2003 de la période de référence pour calculer les percentiles, le percentile 99,9 de la période 2001-2005 est alors de $27,08^{\circ}\text{C}$, le percentile 50 de $12,69^{\circ}\text{C}$, et le RR associé à cet écart de 1,269 [1,184 : 1,359].

Ainsi, ces résultats indiquent que les températures inhabituelles, très froides et chaudes, ont plus d'impact en fin de période.

Tableau 9. RR cumulés sur 21 jours pour différents percentiles et année, exprimés pour la distribution des années précédentes (N à N-4)

Incrément en percentile	1975		1985		1995		2005		2015	
	Incrément en °C	RR	Incrément en °C	RR	Incrément en °C	RR	Incrément en °C	RR	Incrément en °C	RR
Percentile 0,1 vs 50	-6,54 vs 11,02	1,261 [1,199:1,326]	-10,07 vs 11,71	1,415 [1,280:1,565]	-4,55 vs 12,11	1,361 [1,310:1,414]	-4,40 vs 12,72	1,380 [1,313:1,450]	-5,51 vs 13,24	1,522 [1,371:1,690]
Percentile 1 vs 50	-1,44 vs 11,02	1,257 [1,217:1,297]	-3,00 vs 11,71	1,291 [1,257:1,326]	-1,64 vs 12,11	1,243 [1,217:1,270]	-1,75 vs 12,72	1,237 [1,204:1,270]	-1,22 vs 13,24	1,205 [1,166:1,247]
Percentile 2,5 vs 50	0,44 vs 11,02	1,196 [1,169:1,224]	-0,44 vs 11,71	1,214 [1,191:1,238]	0,03 vs 12,11	1,191 [1,172:1,211]	-0,01 vs 12,72	1,183 [1,157:1,209]	1,03 vs 13,24	1,147 [1,119:1,177]
Percentile 97,5 vs 50	22,80 vs 11,02	0,954 [0,929:0,981]	23,27 vs 11,71	0,964 [0,941:0,988]	24,29 vs 12,11	0,976 [0,950:1,003]	24,67 vs 12,72	1,003 [0,977:1,030]	24,28 vs 13,24	1,012 [0,980:1,045]
Percentile 99,5 vs 50	25,16 vs 11,02	1,000 [0,945:1,058]	25,71 vs 11,71	1,078 [1,023:1,137]	26,22 vs 12,11	1,148 [1,091:1,209]	27,37 vs 12,72	1,333 [1,226:1,449]	26,85 vs 13,24	1,156 [1,086:1,231]
Percentile 99,9 vs 50	26,44 vs 11,02	1,271 [1,163:1,389]	27,48 vs 11,71	1,632 [1,450:1,837]	27,45 vs 12,11	1,473 [1,335:1,626]	29,60 vs 12,72	2,269 [1,769:2,911]	28,31 vs 13,24	1,373 [1,157:1,628]

3.4.3 Risques relatifs exprimés pour une température inhabituelle pour l'année

Le Tableau 10 détaille les RR pour différentes années. Les résultats sont présentés tous les 10 ans à partir de 1975, et tous les 5 ans en Annexe 4. Ils sont très dépendants de la présence ou non d'évènements spécifiques chaque année, et soulignent l'importance de ne pas s'appuyer sur des résultats établis uniquement par année pour interpréter des tendances temporelles.

Tableau 10. RR cumulés sur 21 jours pour différents percentiles et année, exprimés pour la distribution de l'année en cours

Incrément en percentile	1975		1985		1995		2005		2015	
	Incrément en °C	RR	Incrément en °C	RR	Incrément en °C	RR	Incrément en °C	RR	Incrément en °C	RR
Percentile 0,1 vs 50	-2,26 vs 10,98	1,275 [1,234:1,319]	-11,23 vs 11,71	1,421 [1,250:1,616]	-2,95 vs 12,46	1,294 [1,261:1,327]	-3,73 vs 13,22	1,338 [1,287:1,390]	-0,24 vs 13,32	1,178 [1,143:1,214]
Percentile 1 vs 50	-0,40 vs 10,98	1,223 [1,190:1,257]	-8,85 vs 11,71	1,404 [1,302:1,514]	-1,02 vs 12,46	1,225 [1,201:1,249]	-1,99 vs 13,22	1,248 [1,215:1,283]	1,06 vs 13,32	1,147 [1,118:1,177]
Percentile 2,5 vs 50	1,16 vs 10,98	1,173 [1,150:1,197]	-5,70 vs 11,71	1,355 [1,308:1,404]	0,80 vs 12,46	1,172 [1,156:1,189]	-0,95 vs 13,22	1,211 [1,181:1,241]	2,12 vs 13,32	1,124 [1,100:1,150]
Percentile 97,5 vs 50	23,46 vs 10,98	0,950 [0,918:0,983]	22,29 vs 11,71	0,968 [0,952:0,985]	24,84 vs 12,46	0,995 [0,965:1,027]	24,62 vs 13,22	1,004 [0,978:1,031]	25,35 vs 13,32	1,042 [1,013:1,071]
Percentile 99,5 vs 50	25,99 vs 10,98	1,143 [1,061:1,231]	24,10 vs 11,71	0,960 [0,930:0,991]	26,70 vs 12,46	1,249 [1,169:1,334]	26,20 vs 13,22	1,125 [1,083:1,168]	27,62 vs 13,32	1,255 [1,122:1,405]
Percentile 99,9 vs 50	26,94 vs 10,98	1,466 [1,314:1,636]	25,15 vs 11,71	1,006 [0,963:1,051]	27,54 vs 12,46	1,508 [1,360:1,672]	26,98 vs 13,22	1,250 [1,172:1,333]	28,53 vs 13,32	1,419 [1,171:1,721]

3.4.4 Focus sur les années de canicules exceptionnelles

Le Tableau 11 reprend les RR associés aux percentiles 99,5 pour des années connues comme étant exceptionnelles du point de vue des canicules pour les différentes modalités de calculs des percentiles.

On retrouve comme précédemment que les RR associés à une température de 26,18°C (percentile 99,5 de la période 1970-2015) diminuent au cours du temps, et que cette diminution n'est pas plus marquée après 2003. Les RR sont d'ordre de grandeurs très similaires, avec des IC se chevauchant largement en 2003, 2006 et 2015. De même, en comparant en détail les résultats obtenus pour des augmentations équivalentes de températures, par exemple, les RR obtenus en 2006 et 2015 à partir de la distribution des températures de l'année : en 2006, une augmentation de 13,74 à 27,47°C est associée à un RR de 1,350 [1,234 : 1,475]. En 2015, une augmentation de 13,32 à 27,62°C est associée à un RR de 1,255 [1,122 : 1,405].

Tableau 11. RR cumulés sur 21 jours associés au P99,5 pour les années les plus exceptionnelles du point de vue des canicules pour différentes période de calcul des percentiles

Pour une température donnée (distribution 1970-2015)			
	P50 (en °C)	P99,5 (en °C)	RR associé à une augmentation du P50 au P99,5
1976	12,15	26, 18	1,197 [1,105 :1,297]
1983	12,15	26, 18	1,178 [1,099 :1,262]
2003	12,15	26, 18	1,122 [1,078 :1,167]
2006	12,15	26, 18	1,114 [1,075 :1,155]
2015	12,15	26, 18	1,089 [1,051 :1,127]
Pour une température inhabituelle par rapport aux années précédentes (distribution N à N+4)			
	P50 (en °C)	P99,5 (en °C)	RR associé à une augmentation du P50 au P99,5
1976	11,14	26,39	1,254 [1,150 :1,366]
1983	11,62	25,49	1,046 [0,993 :1,101]
2003	12,70	27,32	1,342 [1,236 :1,456]
2006	12,89	27,76	1,419 [1,277 :1,578]
2015	13,24	26,85	1,156 [1,086 :1,231]
Pour une température inhabituelle pour l'année (distribution N)			
	P50 (en °C)	P99,5 (en °C)	RR associé à une augmentation du P50 au P99,5
1976	10,93	25,93	1,128 [1,050 :1,211]
1983	11,77	27,20	1,524 [1,367 :1,699]
2003	12,81	29,55	2,369 [1,863 :3,012]
2006	13,74	27,47	1,350 [1,234 :1,475]
2015	13,32	27,62	1,255 [1,122 :1,405]

3.5 Calcul des fractions attribuables à des températures non optimales

Entre 1970 et 2015, 302 456 [IC 95 % 292 723 : 311 392] décès sont attribuables à des températures non optimales (différentes des TMM annuelles), soit 5,5 % [5,3 :5,6] de la mortalité totale sur la période.

Cette fraction attribuable diminue au fil des années ; elle est de 7,2 [6,7 : 7,7] % entre 1970 et 1979, vs 3,4 [3,2 : 3,6] % entre 2000 et 2015 (Tableau 12).

Parmi ces décès, 34 597 [34 182 : 34 989] sont attribuables aux températures les plus froides de la période (températures < percentile 10 de la distribution 1970-2015), soit 0,63% de la mortalité totale. 10 200 [9 544 : 10 471] sont attribuables aux températures les plus élevées (températures > p90 de la distribution 1970-2015), soit 0,19% de la mortalité totale. Au cours de la période, la fraction de la mortalité attribuable à ces températures les plus froides est stable depuis les années 90s. En effet, bien que les RR liés aux températures les plus froides augmentent sur la période, la fraction de la mortalité attribuable au froid est principalement due à des températures non extrêmes, très fréquentes, moins impactées par les évolutions climatiques que les températures extrêmes, et associées à des RR stables au cours du temps. La fraction attribuable aux températures les plus chaudes est en augmentation, reflétant l'augmentation du nombre de jours chauds. Ainsi, l'augmentation des températures compense la baisse des RR observées aux températures les plus extrêmes. On peut d'ailleurs souligner le nombre de décès important observé en 5 ans entre 2010 et 2015, par comparaison aux impacts observés les décennies précédentes.

Dans toutes les zones, la fraction de la mortalité attribuable à des températures non-optimales a diminué au cours du temps. La Figure 12 illustre l'évolution des fractions attribuables aux températures extrêmes. On retrouve la stabilité des impacts liés aux températures les plus froides dans la plupart des zones, avec une tendance à l'augmentation dans les années les plus récentes dans les zones méditerranéennes. On observe peu d'augmentation de la fraction attribuable aux températures les plus chaudes dans les zones de climat océanique, à l'exception de Bordeaux. Les augmentations sont par contre très marquées dans les zones semi-continentales. Dans ces zones, la contribution des températures les plus chaudes est équivalente à la celle des plus froides sur la période récente.

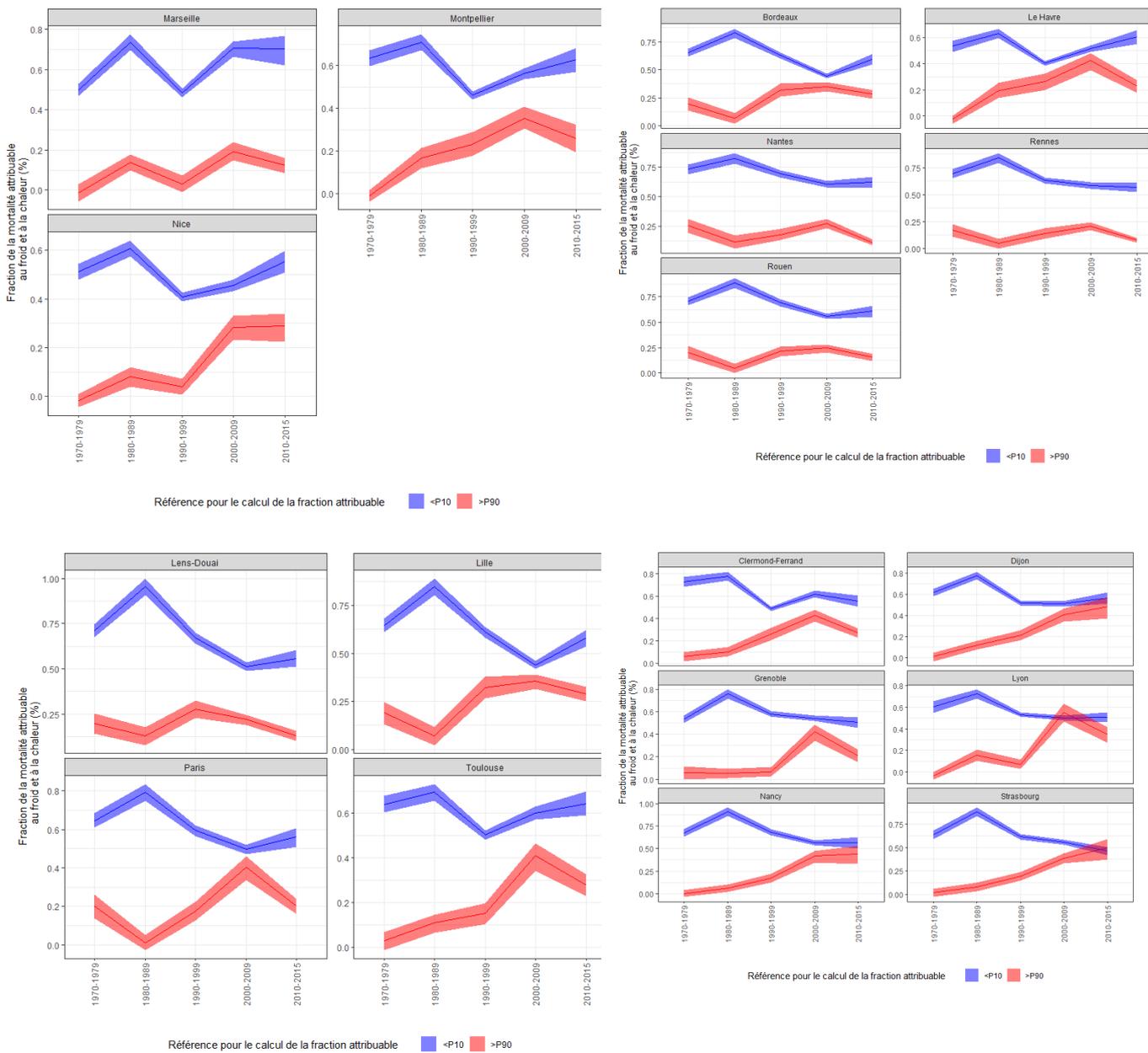
Les ordres de grandeur et les tendances sont similaires si on prend comme référence les percentiles 10 et 90 de chaque année, plutôt que ceux de l'ensemble de la période (Tableau 12).

Ainsi, au cours du temps, la part de la mortalité attribuable à des températures non – optimales a progressivement diminué. Pour autant, la part attribuable aux températures les plus froides est restée relativement stable, et la part attribuable aux températures les plus chaudes est en augmentation.

Tableau 12. Evolution de la fraction de la mortalité attribuable à des températures non-optimales et aux températures inférieures au percentile 10 de la période 1970-2015, ou supérieures au percentile 90

Période	Fraction de la mortalité attribuable à des températures non optimales		Fraction de la mortalité attribuable aux températures les plus froides 1970-2015		Fraction de la mortalité attribuable aux températures les plus chaudes 1970-2015		Fraction de la mortalité attribuable aux températures les plus froides de chaque année		Fraction de la mortalité attribuable aux températures les plus chaudes de chaque année	
	Nbre de décès correspondant		Nbre de décès correspondant		Nbre de décès correspondant		Nbre de décès correspondant		Nbre de décès correspondant	
1970-2015	5,5 [5,3:5,6]	302 456 [292 723 : 311 392]	0,63 [0,62 :0,63]	34 597 [34 182 :34 989]	0,19 [0,17 :0,20]	10 200 [9 544 :10 741]	0,58 [0,57 :0,58]	31 868 [31 459 :32 175]	0,18 [0,17 :0,19]	9 816 [9 219 :10 306]
1970-1979	7,2 [6,7:7,7]	96 588 [90 015:102 633]	0,63 [0,62 :0,65]	8 465 [8 242 : 8 718]	0,13 [0,10 :0,16]	1 720 [1 329 :2 083]	0,56 [0,54 :0,58]	7 479 [7 256 :7 691]	0,11 [0,08 :0,13]	1 419 [1 039 :1 716]
1980-1989	6,5 [6,1:6,9]	82 289 [77 688:86 919]	0,79 [0,77 :0,80]	9 924 [9 677 :10 155]	0,07 [0,05 :0,08]	829 [585 :1 064]	0,63 [0,61 :0,65]	7 946 [7 723 :8 167]	0,06 [0,04 :0,08]	762 [555 :980]
1990-1999	5,0 [4,6:5,3]	57 938 [53 972:61 391]	0,57 [0,56 :0,58]	6 647 [6 501 :6 774]	0,18 [0,15 :0,20]	2 052 [1 797 :2 291]	0,61 [0,6 :0,62]	7 139 [6 995 :7 258]	0,19 [0,17 :0,20]	2 168 [1 964 :2 365]
2000-2009	3,9 [3,8:4,1]	43 193 [41 036:45 341]	0,53 [0,52 :0,54]	5 794 [5 679 :5 908]	0,37 [0,34 :0,39]	4 044 [3 748 :4 288]	0,52 [0,51 :0,53]	5 690 [5 574 :5 795]	0,37 [0,34 :0,39]	4 000 [3 700 : 4 252]
2010-2015	3,4 [3,2:3,6]	22 447 [20 988:23 806]	0,58 [0,56 :0,60]	3 767 [3 621 :3 885]	0,24 [0,22 :0,26]	1 554 [1 438 :1 657]	0,55 [0,54 :0,57]	3 614 [3 500 :3 723]	0,23 [0,21 :0,24]	1 466 [1 355 :1 550]

Figure 12. Evolution de la fraction de la mortalité attribuable aux températures inférieures au percentile 10 ou supérieures au percentile 90 de la période 1970-2015 par zone d'étude



4. DISCUSSION

4.1 Synthèses des principaux résultats

Une relation température-mortalité en forme de J est observée sur l'ensemble de la période et des zones étudiées. Cette forme ne dépend ni de la période considérée ni du type de climat sous-jacent.

On n'observe pas d'évolution de la forme globale de la relation température-mortalité, tant dans sa forme globale que dans les profils des lags, ni de tendances claires concernant la TMM. Au cours du temps, on observe une augmentation du risque associé aux températures les plus froides de la période 1970-2015, et une augmentation du risque associé aux températures les plus chaudes. Ainsi, une température de 26,18°C (percentile 99,5 de la période 1970-2015) est associée à un risque plus faible en 2015 qu'en 1970. La diminution des RR associés aux températures les plus chaudes n'est pas concomitante à la mise en place des mesures de prévention à partir de 2004, mais est observée dès les années 1970s. Elle pourrait être principalement expliquée par une amélioration générale de l'état de santé de la population, de sa prise en charge médicale, et par une modification des conditions d'exposition à la chaleur. Pour autant, la majorité de la gamme des températures (hors extrêmes chauds et froids) sont associés à des RR stables. On note même une légère tendance à l'augmentation des risques liés à une chaleur non-extrême dans les années les plus récentes. Ces observations peuvent indiquer une acclimatation progressive aux très fortes chaleurs, et une dés-habitude du très grand froid. A noter qu'une tendance à la diminution des RR liés aux fortes chaleurs est globalement observée dans la littérature [12, 17-23], mais n'est pas systématique dans toutes les zones analysées [12, 21, 24, 25]. De plus, la diversité des méthodes employées par la littérature ne permet pas de comparaison fine des études entre elles [17].

Pour autant, on observe également que les températures inhabituellement très froides ou chaudes par rapport aux années précédentes, sont associées à des risques plus élevés en fin de période qu'en début de période.

Enfin, les résultats exprimés à partir de la distribution des températures de l'année considérée soulignent la forte plasticité de la réponse, et la possibilité d'observer des risques très importants une année donnée, malgré une tendance à la baisse. Ils soulignent l'importance de ne pas se fonder uniquement sur la comparaison de deux années pour conclure à des évolutions.

Cette étude n'observe pas de tendance nette sur la TMM mais une augmentation de l'incertitude associée à l'estimation de cette TMM. La TMM est une sortie statistique du modèle interprétée comme la température la plus optimale au niveau populationnelle, i.e. celle associée au risque le plus faible pour une majorité de la population. L'augmentation de l'incertitude pourrait indiquer une augmentation de la variabilité individuelle au sein de la population, qui pourrait refléter des différences de vulnérabilités individuelles, ou de variabilité dans l'exposition par exemple.

Quelques articles de la littérature retrouvent une augmentation de la TMM avec l'augmentation des températures, et l'interprète comme la marque d'une adaptation, mais sans intégrer cette incertitude autour de la TMM [17-19]. Dès lors qu'on prend en compte les intervalles de confiance, il nous semble impossible de juger d'une acclimatation de la population à partir des évolutions de la TMM.

Ainsi, les résultats sur la forme de la relation température-mortalité, les RR et la TMM ne permettent pas de conclure clairement sur une adaptation de la population. On peut néanmoins faire l'hypothèse d'un décalage progressif de la relation-température mortalité vers des températures plus chaudes. Pour autant, les températures inhabituelles chaudes sur la période récente sont associées à des RR plus élevées que sur les périodes plus anciennes.

De plus, les évolutions des RR, notamment la baisse des RR liés aux températures les plus chaudes, ne suffisent pas à contrebalancer l'augmentation de l'intensité et de la fréquence d'exposition de la population à ces températures. La fraction de la mortalité attribuable à la chaleur augmente, alors que la contribution des températures extrêmes froides est stable. On retrouve une mortalité attribuable aux températures les plus froides plus importantes que la mortalité attribuable à la chaleur, reflet de RR plus faibles, mais appliqués à un plus grand nombre de jours. En effet, l'effet du froid est persistant sur les 21 jours suivant l'exposition, alors que l'effet de la chaleur est concentré sur les 3 premiers jours, et uniquement pour les chaleurs les plus extrêmes, persistant jusqu'à 10 jours après l'exposition. Pour autant, sur la dernière partie de la période d'étude, dans certaines zones de climat semi-continental, la fraction attribuable à la chaleur est désormais équivalente à celle attribuable au froid.

Dans la littérature, les observations concernant l'évolution des fractions attribuables diffèrent selon les études, avec des auteurs qui retrouvent une diminution de la fraction attribuable à la chaleur et au froid au cours du temps [17, 18], alors que d'autres rapportent des augmentations de la fraction attribuable à la chaleur dans certaines zones [21, 23, 26, 27]. Cette diversité n'est pas étonnante, puisque le calcul de la fraction attribuable dépend largement des choix de modélisation, et de la référence prise pour calculer la fraction attribuable. Les études observant des résultats divergents selon les zones, à partir d'un même design statistique, comme par exemple les travaux de Lee *et al* en Asie, mettent en évidence l'influence de l'augmentation du nombre de jours chauds, qui finit par contrebalancer la baisse des RR dans certaines zones [23].

Dans cette étude, nous avons examiné la mortalité totale, tous âges, et sans distinction de sexes. Plusieurs études rapportent des tendances à la baisse plus marquée pour des causes cardiovasculaires et respiratoires [17, 19, 20, 28]. Les tendances concernant l'âge ou le sexe sont plus variables [17]. Enfin, nous n'avons pris en compte que la température du jour, qui n'est qu'un paramètre météorologique parmi d'autres. Les influences croisées entre humidité et températures sont encore mal comprises [29], et nous n'avons pas d'indication sur les tendances temporelles possibles. Dans la littérature, une seule étude a examiné l'impact des variations inter-journalières des températures, et observe une augmentation de la fraction de la mortalité attribuable à ces variations [30].

Enfin, une des limites de l'étude est de ne pas intégrer les années postérieures à 2015. L'augmentation des températures a été marquée dans la majorité des départements depuis 2015, et plusieurs vagues de chaleur notables ont été observées, notamment en 2019 et en 2020. Dans un contexte d'évolution rapide des expositions, le délai de plusieurs années nécessaire à l'obtention des données de mortalité est un obstacle important à l'acquisition de connaissances.

Ainsi, la question des évolutions temporelles de la relation température-mortalité est rendu très complexe à analyser du fait de la non-linéarité, de la très grande sensibilité à quelques événements et des évolutions de températures et de structures de la population. Les conclusions observées sur une période ne seront pas nécessairement celles observées dans les prochaines années, au fur et à mesure que le climat se modifie, mais également qu'évoluent les stratégies de réponses, les structures démographiques et sociales pouvant jouer sur la vulnérabilité de la population à la chaleur.

4.2 Implications pour l'adaptation au changement climatique

L'adaptation doit prendre en compte d'une part le niveau de risque associé à une température donnée, et d'autre part la fraction attribuable à cette température. RR et fractions attribuables peuvent présenter des évolutions différentes, et un RR en diminution peut conduire à une augmentation de l'impact total lorsqu'il s'applique à un nombre de jours en augmentation.

Les résultats observés ici mettent en évidence l'absence d'évolution de la forme de la relation et de la TMM, des RR associés à des températures inhabituelles demeurant élevés, et une fraction de la mortalité attribuable aux températures les plus extrêmes en augmentation. Aussi, nous considérons qu'ils ne permettent pas de conclure à l'existence d'une adaptation déjà observable. Les résultats pourraient indiquer une acclimatation progressive de la population, éventuellement une adaptation incrémentale à un nouveau climat, avec un niveau de risque qui se maintient stable alors que les températures augmentent, comme l'illustrent les résultats exprimés à partir de 5 années précédentes. Toutefois, cette adaptation disparaît si on raisonne non plus en termes de risque, mais en termes de fraction attribuable (on pourrait définir une adaptation incrémentale comme le maintien une fraction attribuable constante alors que les températures augmentent, plutôt que de maintenir un niveau de risque).

Concernant la chaleur, il est de même notable d'observer une diminution du risque cantonné aux percentiles les plus élevés lorsqu'on exprime les RR pour la période 1970-2015, et que cette diminution survienne avant que la chaleur extrême soit perçue comme un risque pour la santé, et fasse l'objet de prévention spécifique. Cette diminution reflète probablement en partie l'amélioration de la prise en charge des patients, et l'amélioration des conditions de vie. Certains auteurs relient la baisse de la mortalité liée à la chaleur dans les années 70s voir antérieure à l'amélioration des conditions de travail en extérieur, s'appuyant sur les tendances plus fortes observées chez les hommes que chez les femmes [17]. De même, dans les années récentes, des auteurs font l'hypothèse que les baisses de RR observées traduisent davantage les améliorations socio-économiques et médicales qu'une réelle acclimatation à la chaleur [22, 28]. Vicedo-Cabra *et al* concluent que les baisses observées de la mortalité attribuable à la chaleur sont plus importantes que celles qu'on attendrait si la seule acclimatation à la température était en jeu [27]. Des travaux récents suggèrent également une influence de la climatisation sur la réduction des risques liés à la chaleur, mais qui demeure limitée [32]. Cette étude, de par son design, permet d'estimer l'évolution de la relation température mortalité mais ne permet pas d'évaluer précisément l'impact des déterminants cités ci-dessous ou des politiques mises en place comme le plan national canicule instauré en 2004.

La prévention des effets du grand froid reposant essentiellement sur des technologies pérennes (chauffage, habillement), il est à noter que les RR associés au froid extrême augmentent avec le temps, mais pas ceux liés au froid non-extrême. Il est possible qu'une partie de l'effet du froid reflète une influence des maladies respiratoires, la température pouvant favoriser la survie et la transmission d'agents pathogènes, et accroître la vulnérabilité de l'organisme à ces agents [33]. Les analyses captent peut-être également un effet délétère de conditions météorologiques extrêmes associé au très grand froid (ex neige, verglas), et dont l'impact serait plus important sur les années récentes. Il serait donc intéressant dans une logique d'adaptation, de s'intéresser d'une part à ces conditions météorologiques particulières, et d'autre part à la précarité énergétique, qui peut contribuer à une aggravation du risque.

Par ailleurs, on observe une diminution de la fraction de la mortalité attribuable à la température, correspondant principalement à des températures intermédiaires. Cette

diminution de l'impact reflète probablement une amélioration des conditions de vie, de l'état de santé et des prises en charges médicales, conduisant à une meilleure capacité de thermorégulation dans la population.

Dans notre étude, la part attribuable aux températures les plus froides est 2 fois supérieure à la part attribuable à la chaleur sur la période la plus récente (vs. 3 fois plus importante entre 1970 et 1979), et dans certaines zones les parts sont désormais équivalentes. De plus, on note que la part du froid définie à partir du percentile 10 est stable au cours du temps, alors que la part de la chaleur définie à partir du percentile 90 est en augmentation. Ces résultats suggèrent que la contribution de la chaleur à la mortalité totale pourrait à l'avenir devenir équivalente voir supérieure à la contribution du froid.

Une part de la mortalité attribuable à la chaleur est par ailleurs déjà directement attribuable au changement climatique. Vicedo cabra et al ont comparé dans plusieurs centaines de villes dans le monde, dont les 18 villes de cette étude, la fraction de la mortalité attribuable à la chaleur à partir des températures observées, et des températures attendues en l'absence de changement climatique. Ils évaluent qu'environ 30% de la mortalité attribuable à la chaleur entre 1990 et 2018 serait attribuable au changement climatique [34].

À plus long-terme, plusieurs auteurs émettent l'hypothèse que le réchauffement pourrait se traduire par une baisse de la mortalité hivernale, qui compenserait l'augmentation de la mortalité liée à la chaleur. Ils s'appuient fréquemment sur l'hypothèse que la surmortalité saisonnière observée en hiver est majoritairement attribuable au froid, et néglige les autres facteurs saisonniers possibles (ex maladies infectieuses, modification des modes de vie...). Cette hypothèse est contestée par les connaissances épidémiologiques, qui indiquent que la contribution directe du froid à la surmortalité saisonnière hivernale est modeste [35, 36]. Enfin, même si l'augmentation des températures diminue la fraction de la mortalité attribuable au froid, cette diminution est faible, et ne compensera pas l'augmentation de la fraction de la mortalité attribuable à la chaleur [37].

Par exemple, des projections réalisées dans le cadre d'études internationales pour l'horizon 2100 concluent à une baisse modérée de la mortalité attribuable au froid, et à une augmentation plus marquée de celle attribuable à la chaleur. Dans la majorité des pays étudiés, l'augmentation de la mortalité attribuable à la chaleur dépasse rapidement la baisse de la mortalité attribuable au froid. En France, on s'attend dès la période 2050-2059 à une différence d'impact marquée sous un scénario de faibles émissions (RCP2.6., seul compatible avec le maintien d'un réchauffement à moins de +2°C) et hautes émissions (RCP8.5., correspondant au réchauffement le plus marqué, et actuellement plus faible que les émissions observées) (Tableau 13).

Tableau 13. Part de la mortalité attribuable à la chaleur ou au froid selon différents scénarios climatiques et horizons temporels, pour une sélection de pays [37]

	% de la mortalité attribuable à la chaleur selon le scénario et l'horizon temporel				% de la mortalité attribuable au froid selon le scénario et l'horizon temporel			
	RCP 2.6		RCP 8.5		RCP 2.6		RCP 8.5	
	2050-2059	2090-2099	2050-2059	2090-2099	2050-2059	2090-2099	2050-2059	2090-2099
France	1,8 %	1,7 %	3,5 %	7,7 %	7,5 %	7,7 %	6,8 %	5,6 %
Royaume-Uni	0,5 %	0,5 %	1,1 %	2,6 %	6,5 %	6,9 %	5,8 %	4,5 %
Suisse	1,3 %	1,2 %	2,5 %	6,2 %	5,1 %	5,2 %	4,6 %	3,7 %
Italie	2,8 %	2,6 %	4,7 %	10,0 %	6,1 %	6,2 %	5,3 %	4,1 %
États-Unis	0,8 %	0,7 %	1,5 %	3,5 %	4,7 %	4,8 %	4,2 %	3,3 %
Chine	1,4 %	1,4 %	2,4 %	6,1 %	10 %	10,1 %	8,9 %	7,1 %
Brésil	1,7 %	1,7 %	3,3 %	8,2 %	2,1 %	2,1 %	1,3 %	0,6 %

5. CONCLUSION

Les résultats suggèrent une diminution des RR liés aux très fortes chaleurs depuis les années 1970, et une augmentation des RR liés aux très grands froids, ce qui semble marquer une acclimatation à la chaleur (pouvant résulter d'une adaptation de la population, des améliorations socio-économiques et médicales et/ou d'une efficacité des mesures de prévention organisées à partir de 2004). Cependant, cette évolution à la baisse n'est observée que pour les températures les plus extrêmes. Les évolutions des RR sont progressives au cours du temps. Néanmoins, les RR liés aux températures inhabituellement chaudes pour une année donnée par rapport aux années précédentes augmentent depuis les années 1970.

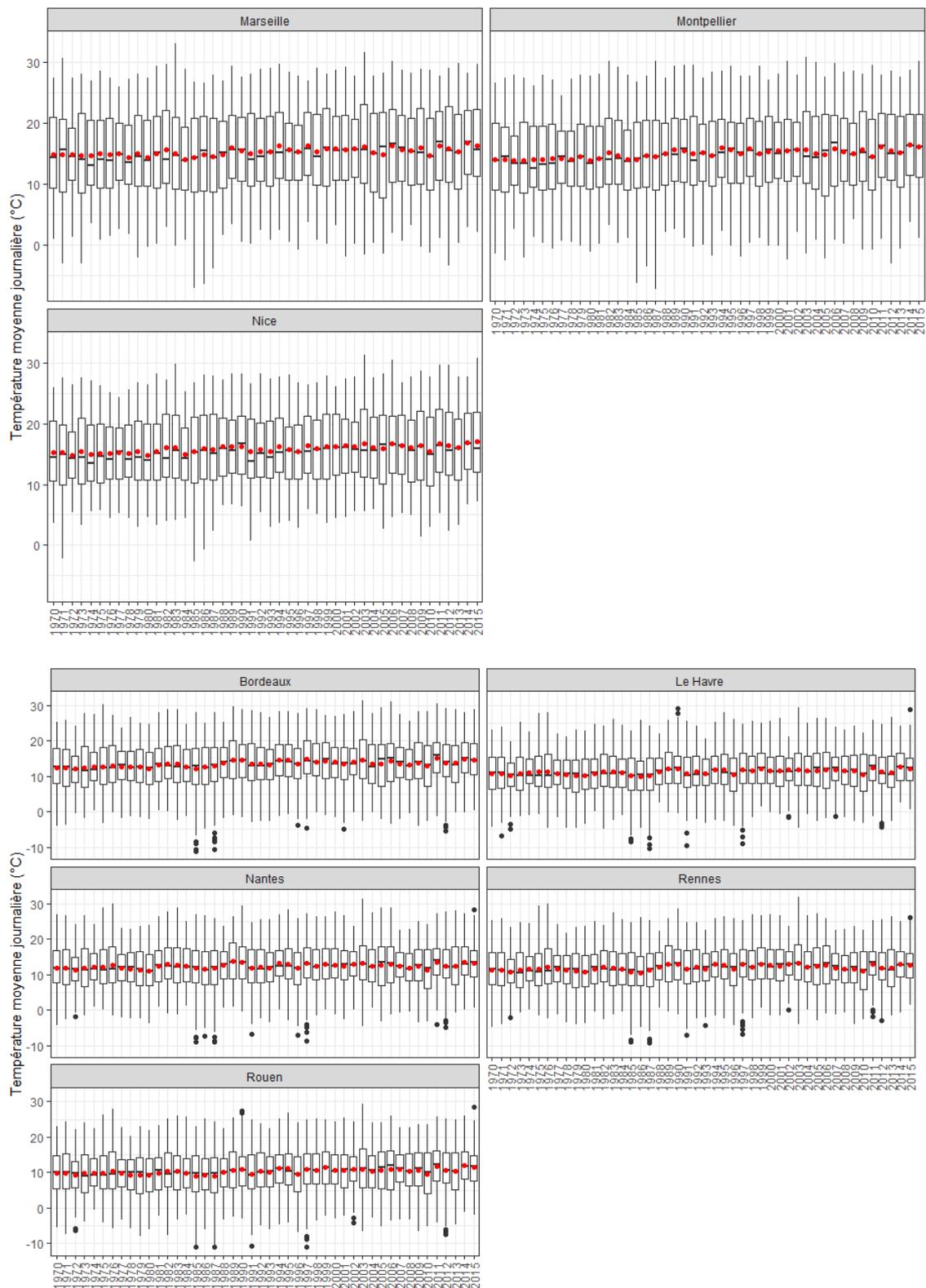
La fraction de la mortalité attribuable aux températures les plus froides (< percentiles 10) est stable, au cours du temps, représentant 0,63 [0,62 :0,65] % de la mortalité totale dans les années 1970 et 0,58 [0,56 :0,60] % dans les années 2010. La fraction attribuable aux températures les plus chaudes (> percentiles 90) augmente, passant de 0,11 [0,08 :0,13] % de la mortalité dans les années 70s à 0,23 [0,21 :0,24] % dans les années 2010.

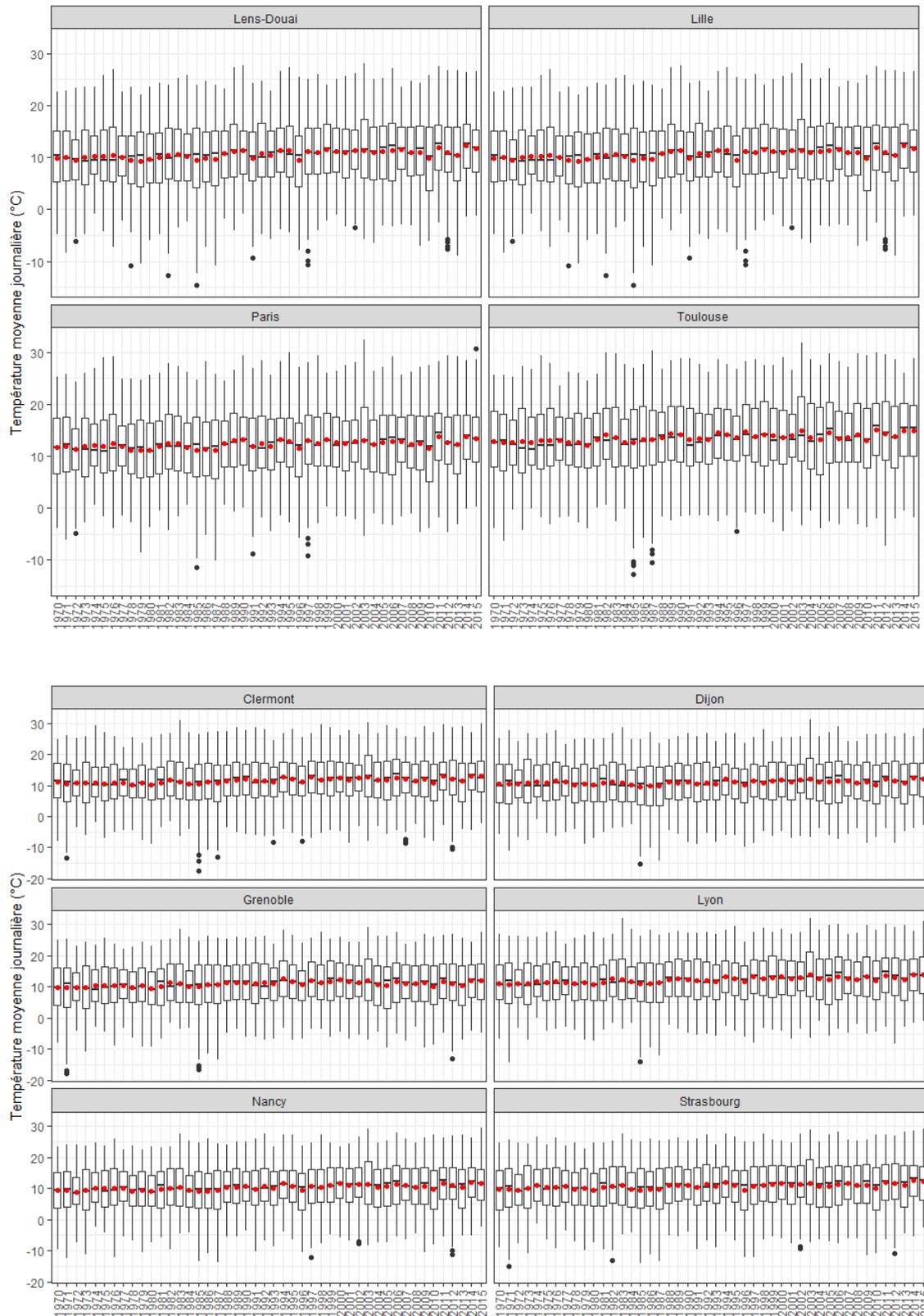
Les évolutions observées ne mettent pas en évidence de rupture notable à partir de la mise en place des mesures de prévention à partir de 2004. Elles sont donc plutôt en faveur d'une possible acclimatation de la population vers un nouveau climat et/ou des améliorations socio-économiques et médicales, i.e. des risques qui diminuent lorsqu'une température autrefois inhabituelle devient plus fréquente (et inversement lorsqu'une température devient inhabituelle). Pour autant, le risque associé aux températures inhabituelles demeure. De plus, la diminution des RR liés à la chaleur ne compense pas l'augmentation du nombre de jours chauds, et on observe donc une augmentation des impacts de la chaleur.

Ces résultats soulignent l'importance de poursuivre les efforts pour réduire l'impact des températures froides et chaudes sur la mortalité et d'agir pour atténuer le changement climatique et ainsi éviter les scénarios les plus défavorables. En matière d'adaptation, il faut à la fois agir sur l'état de santé de la population pour améliorer sa capacité de thermorégulation, sur l'environnement pour réduire les expositions aux températures les plus extrêmes, et sur la réponse immédiate à ces événements extrêmes.

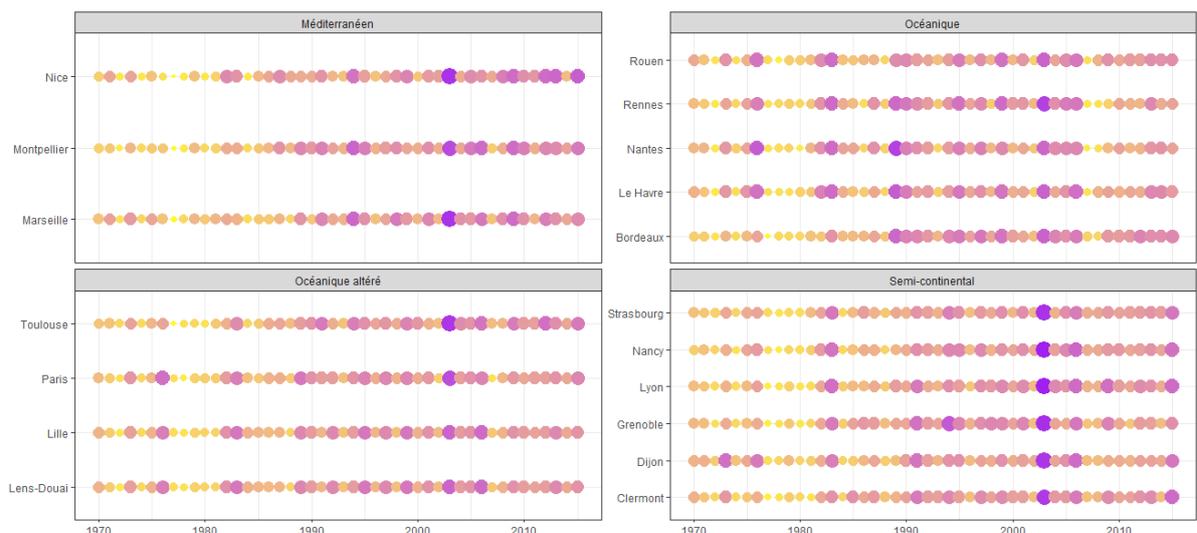
Annexe 1. Descriptif par zones

Distribution annuelle des températures moyennes journalières par zone

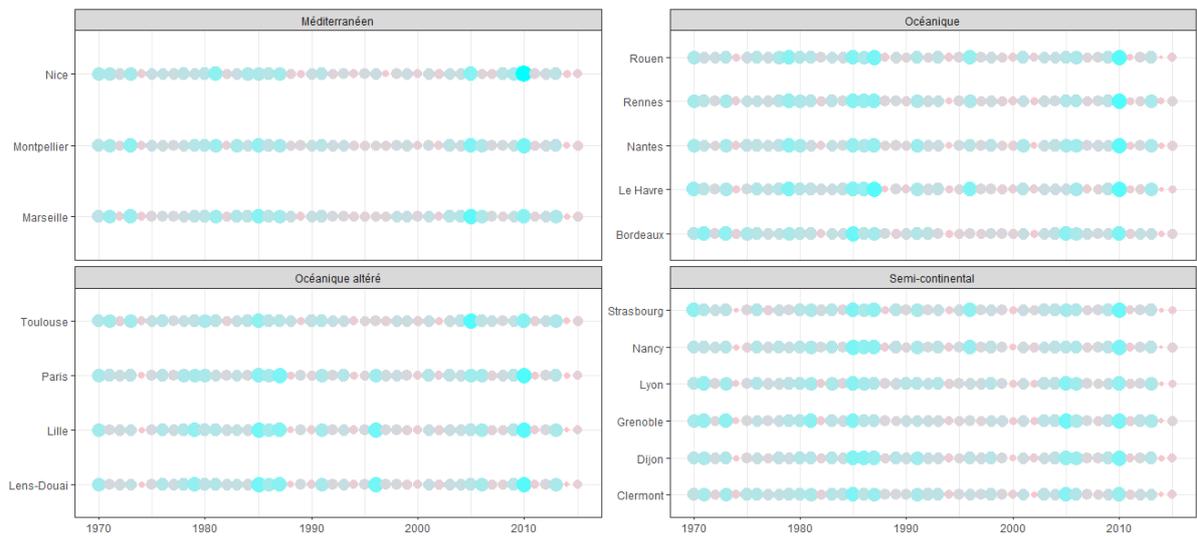




Nombre de jours dépassant les percentiles 10 et 90 de la période 1970-2015 par année et par zone

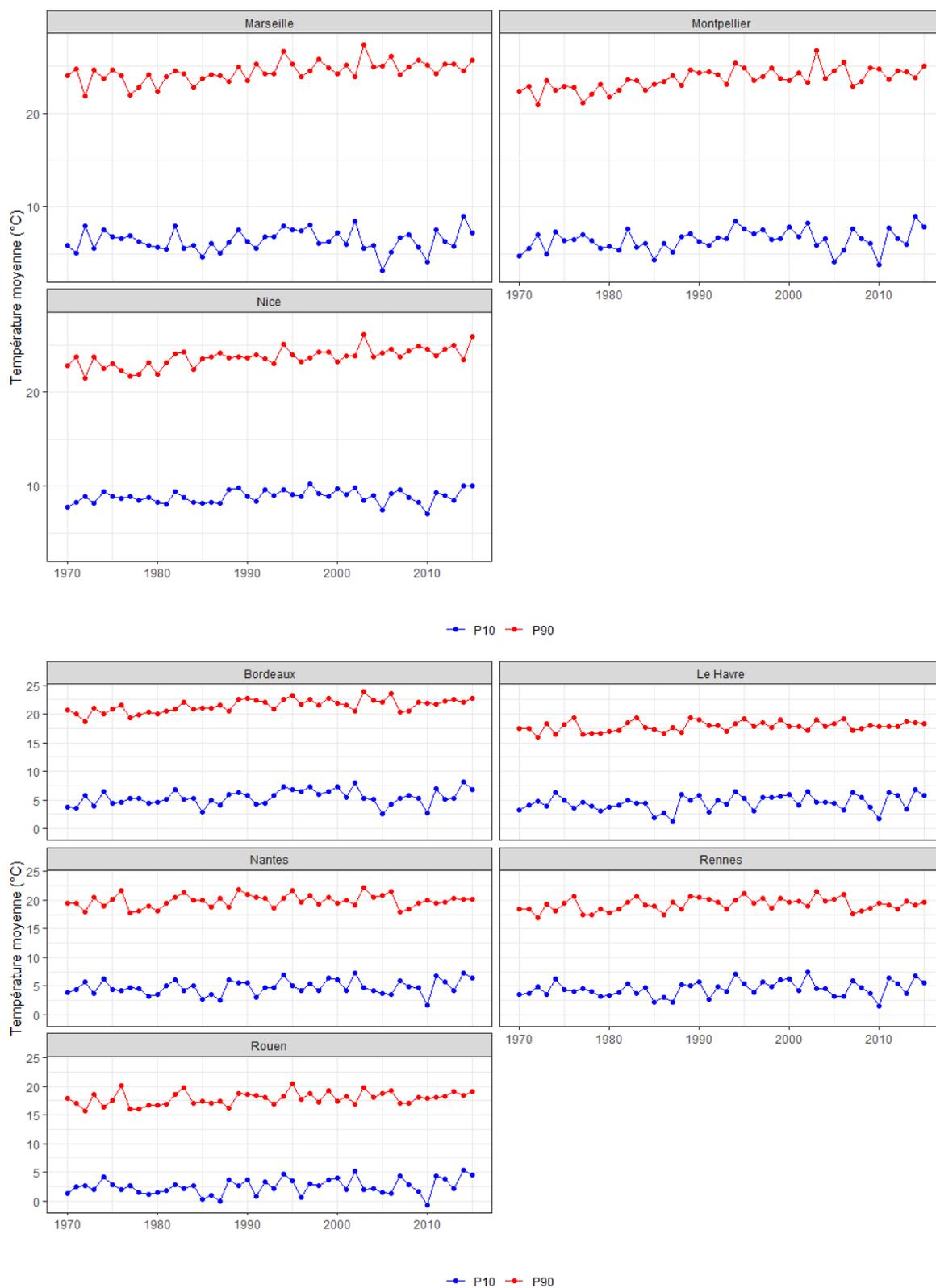


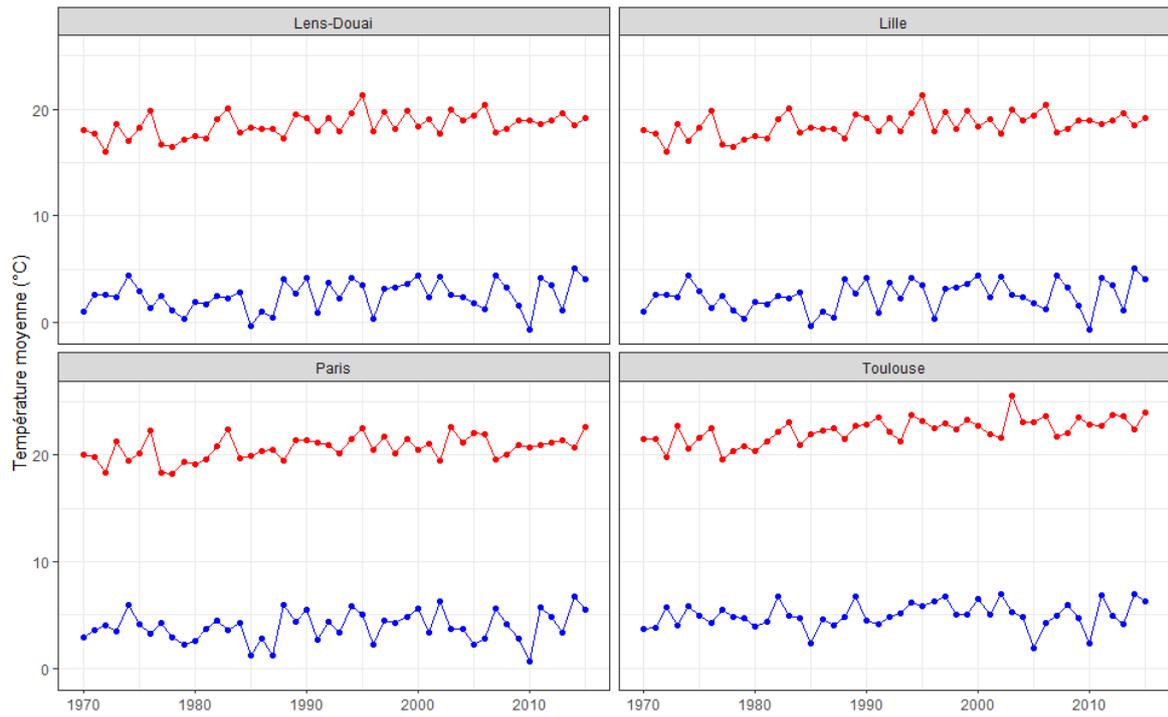
Nombre de jours avec une température moyenne supérieure au P90 de la période 1970-2015



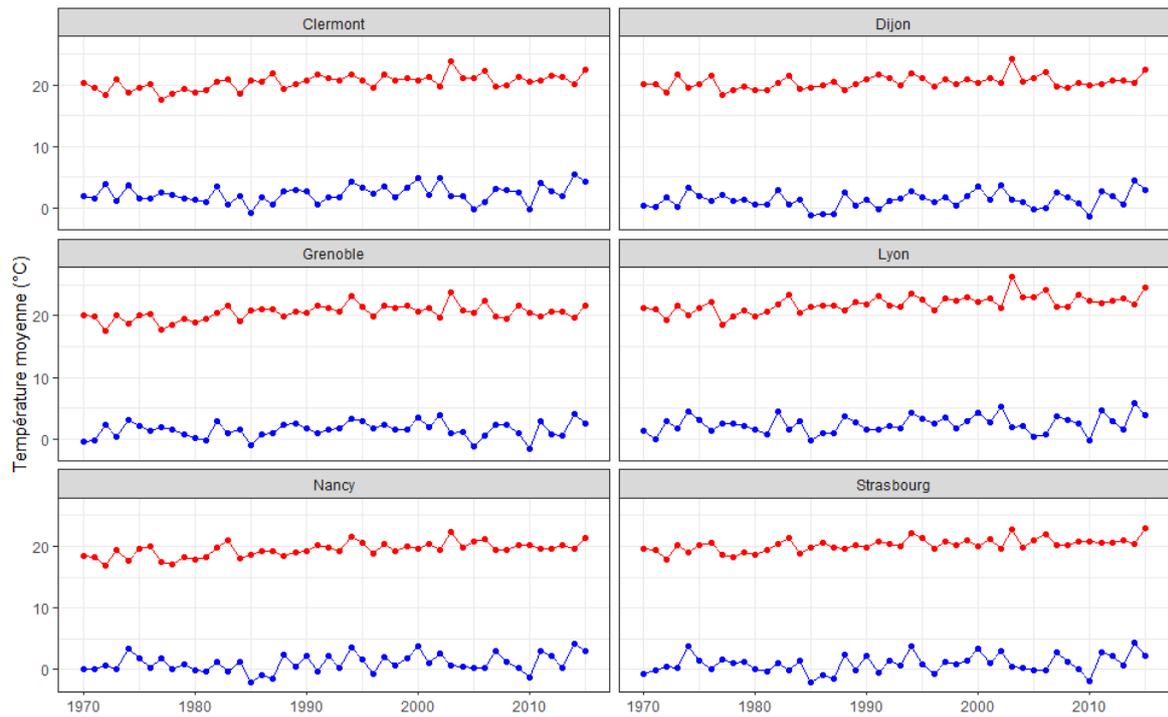
Nombre de jours avec une température moyenne inférieure au P10 de la période 1970-2015

Percentiles 10 et 90 de la température moyenne calculés chaque année et par zone

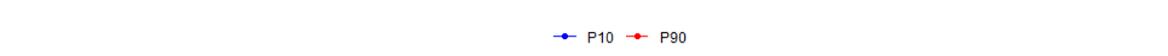




— P10 — P90

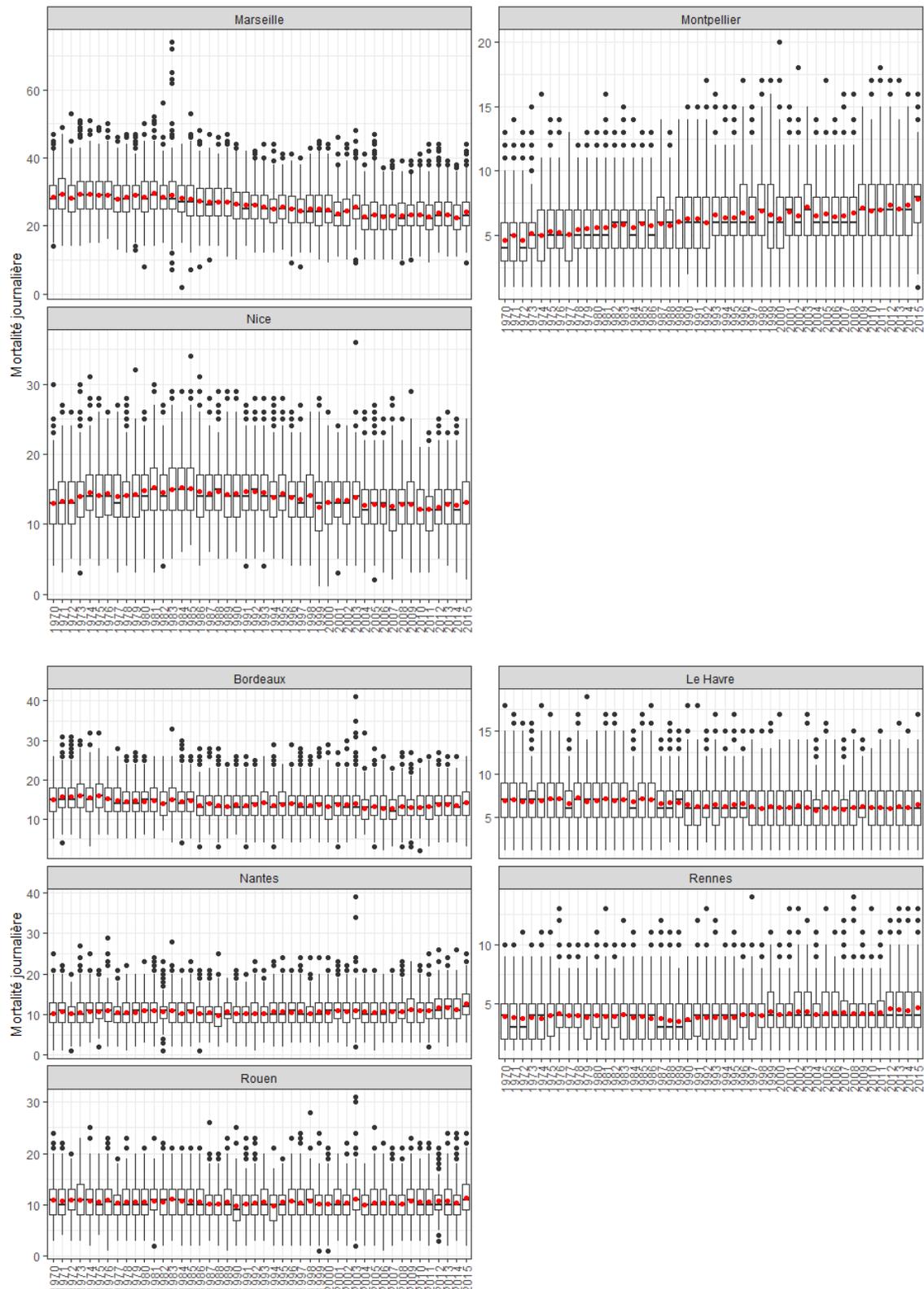


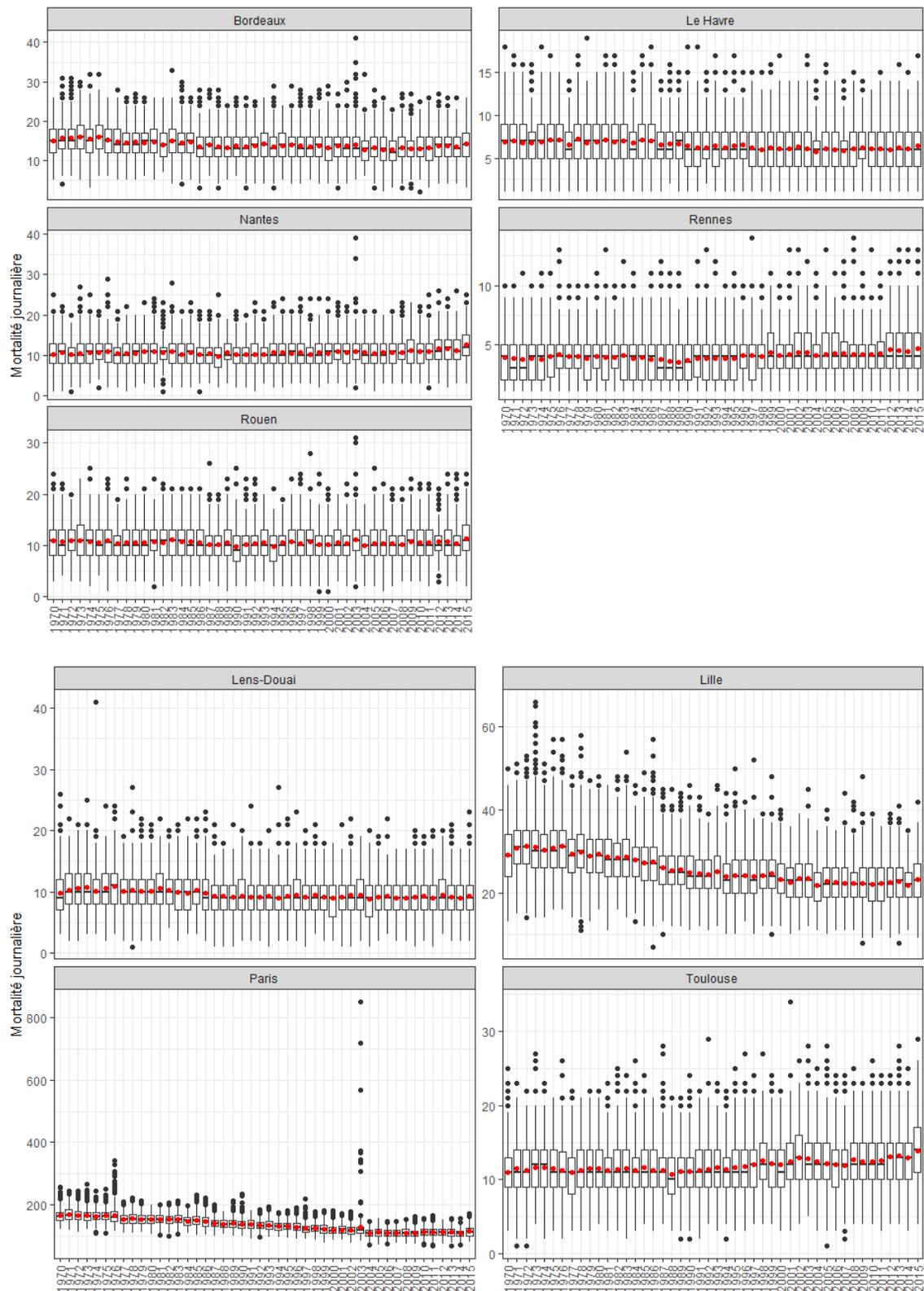
— P10 — P90



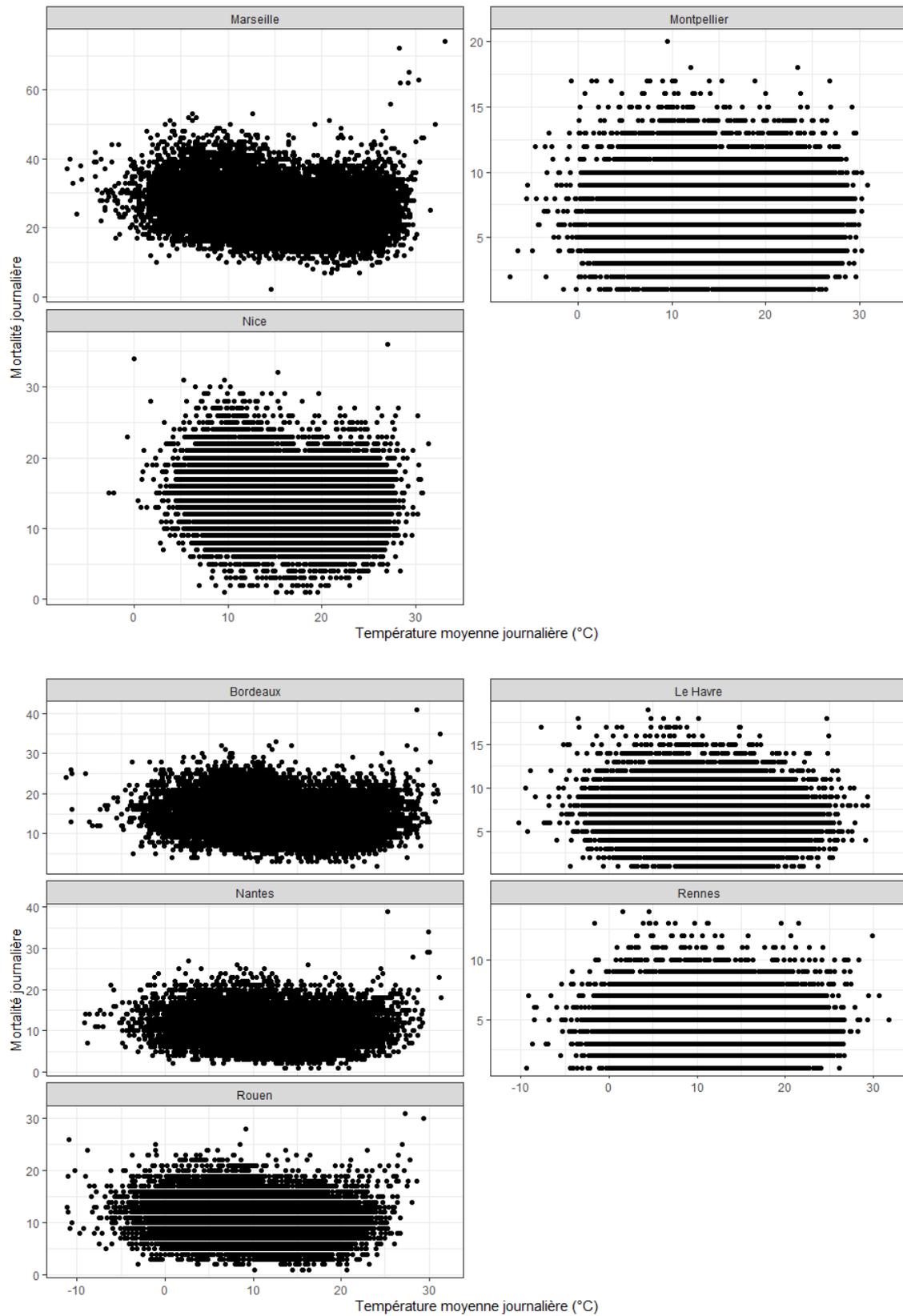
— P10 — P90

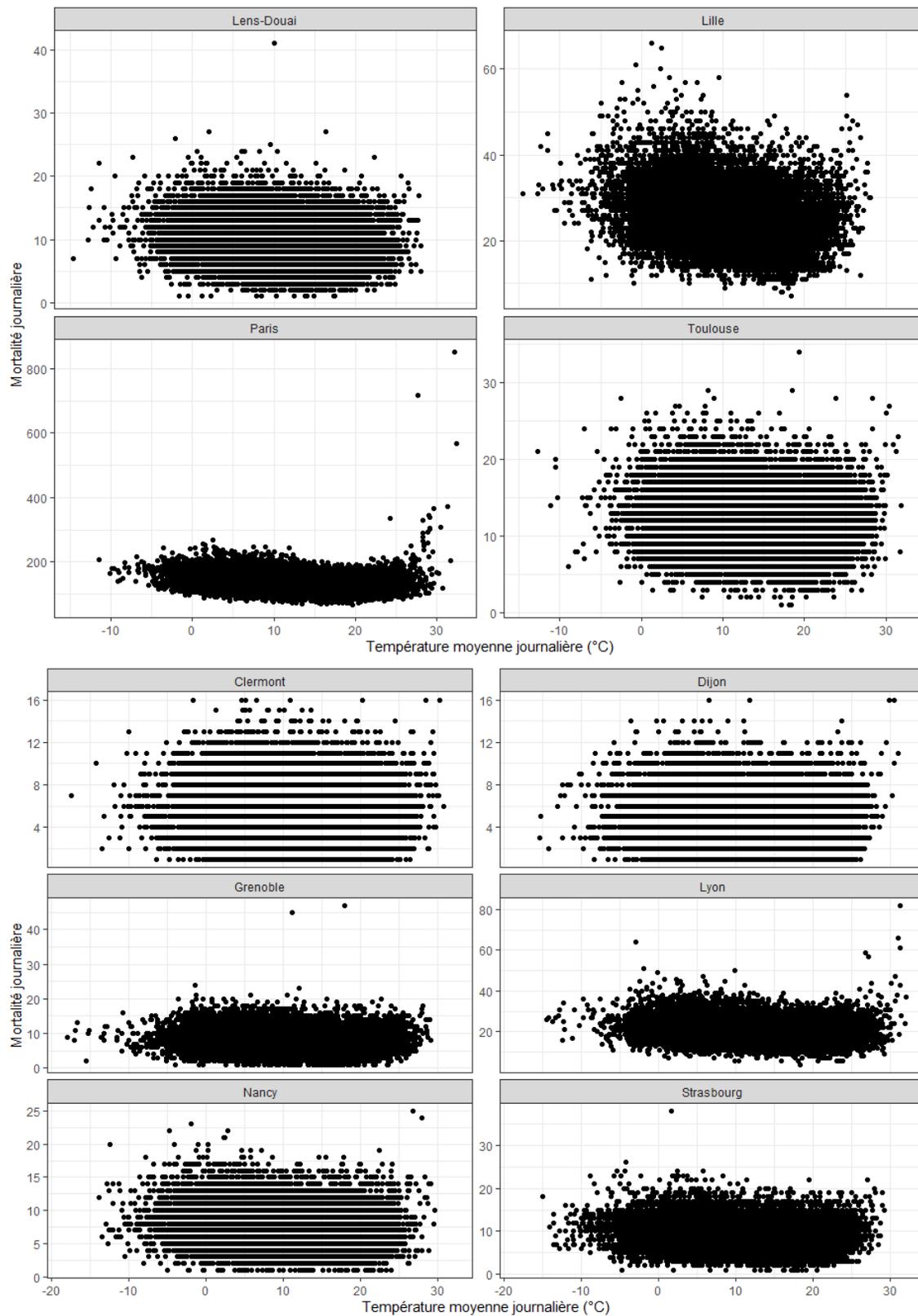
Distribution annuelle de la mortalité journalière par zone





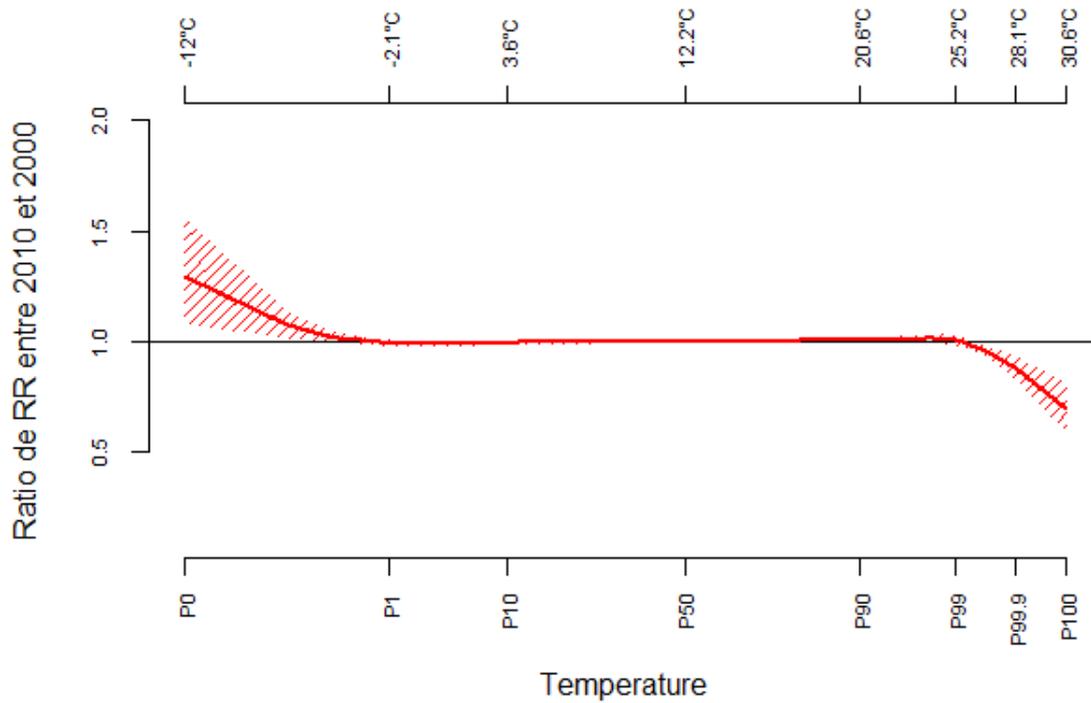
Mortalité journalière vs Température moyenne journalière par zone



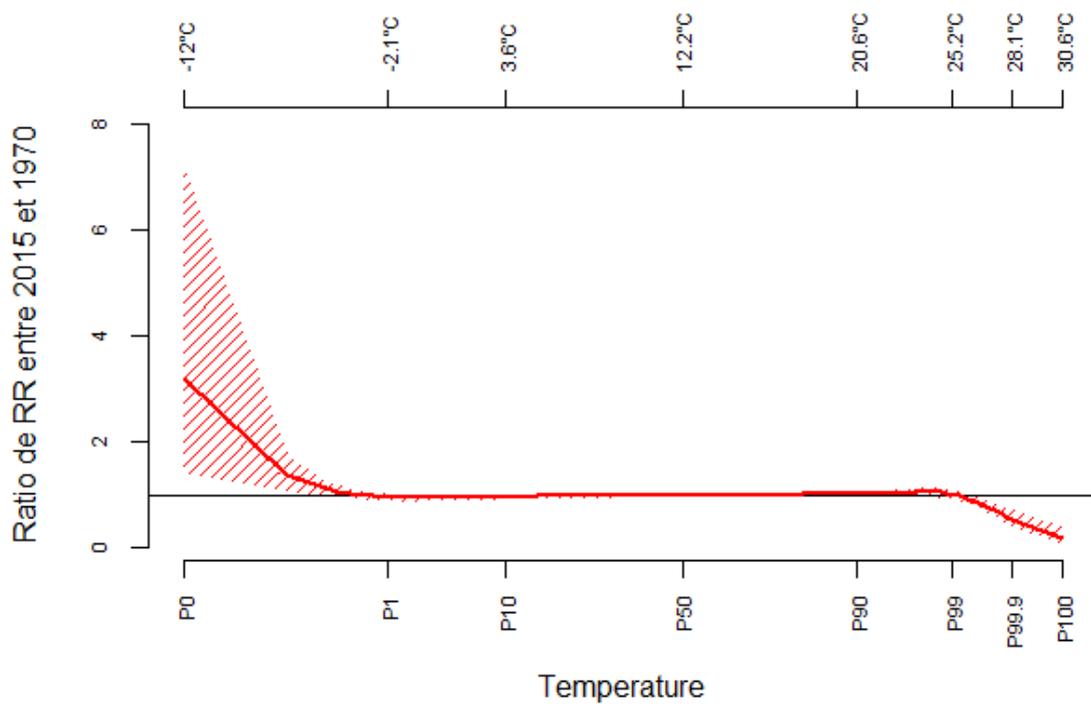


Annexe 2. Ratio de RR entre différentes années, en prenant comme référence pour le calcul des RR la distribution 1970-2015

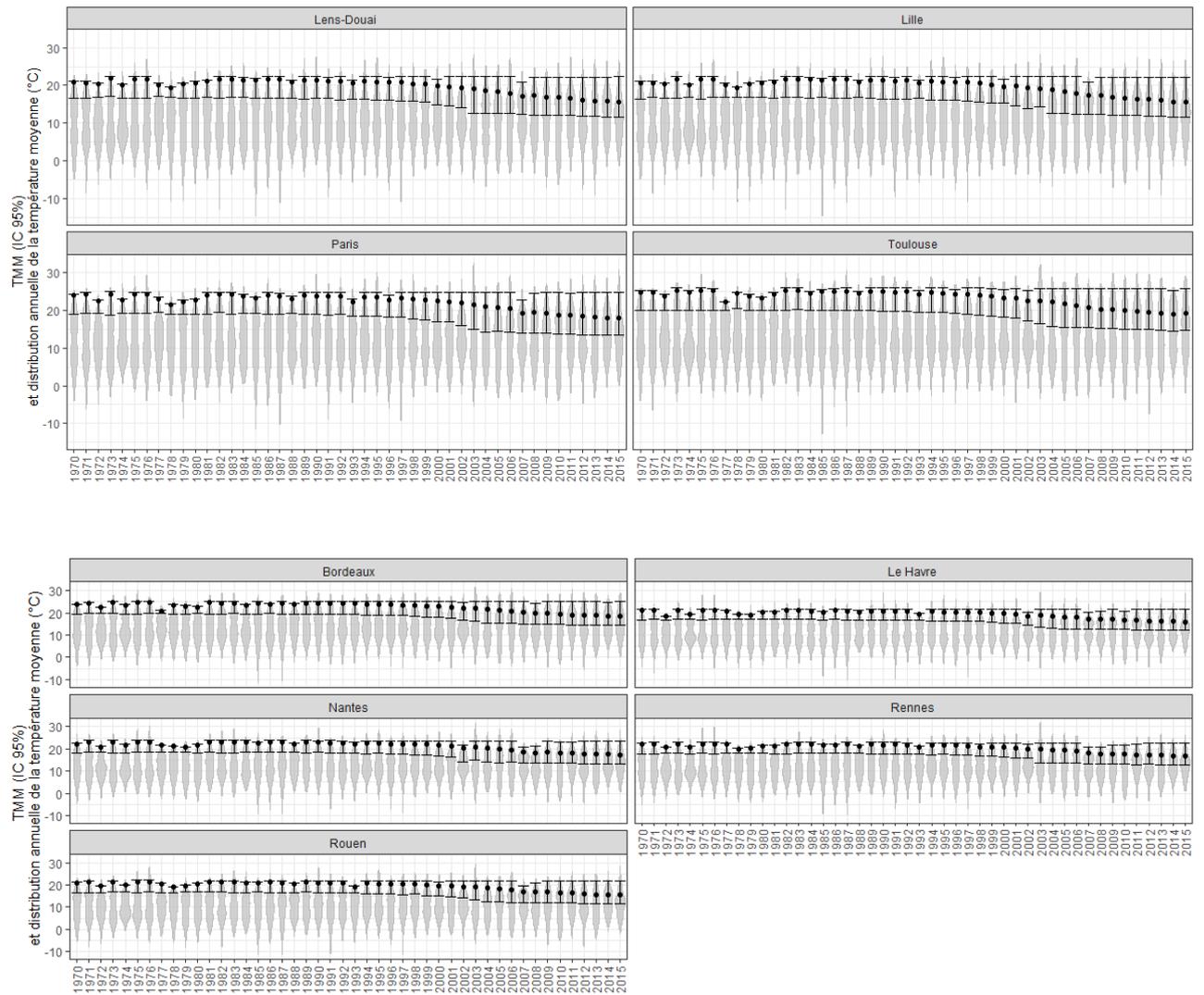
Entre 2010 et 2000

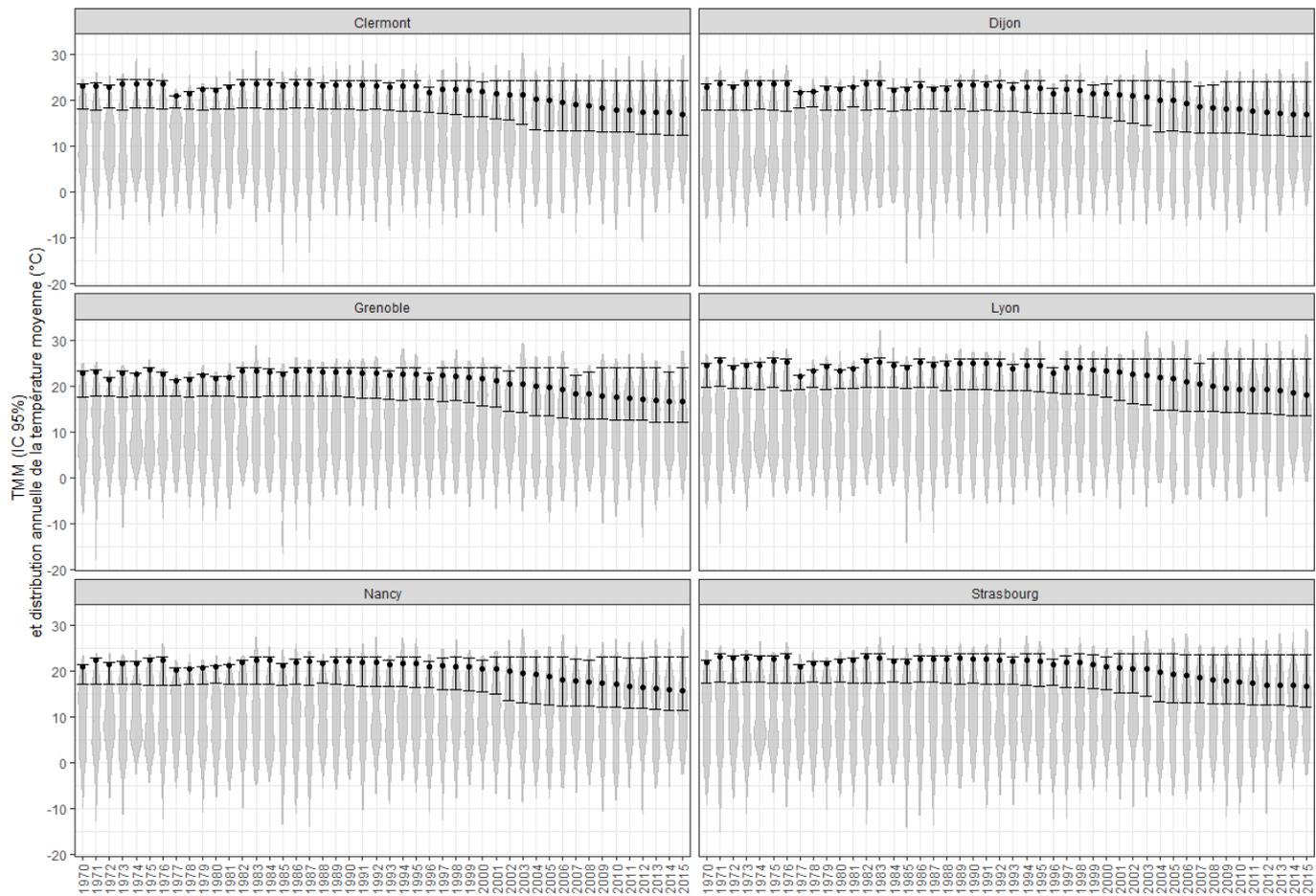


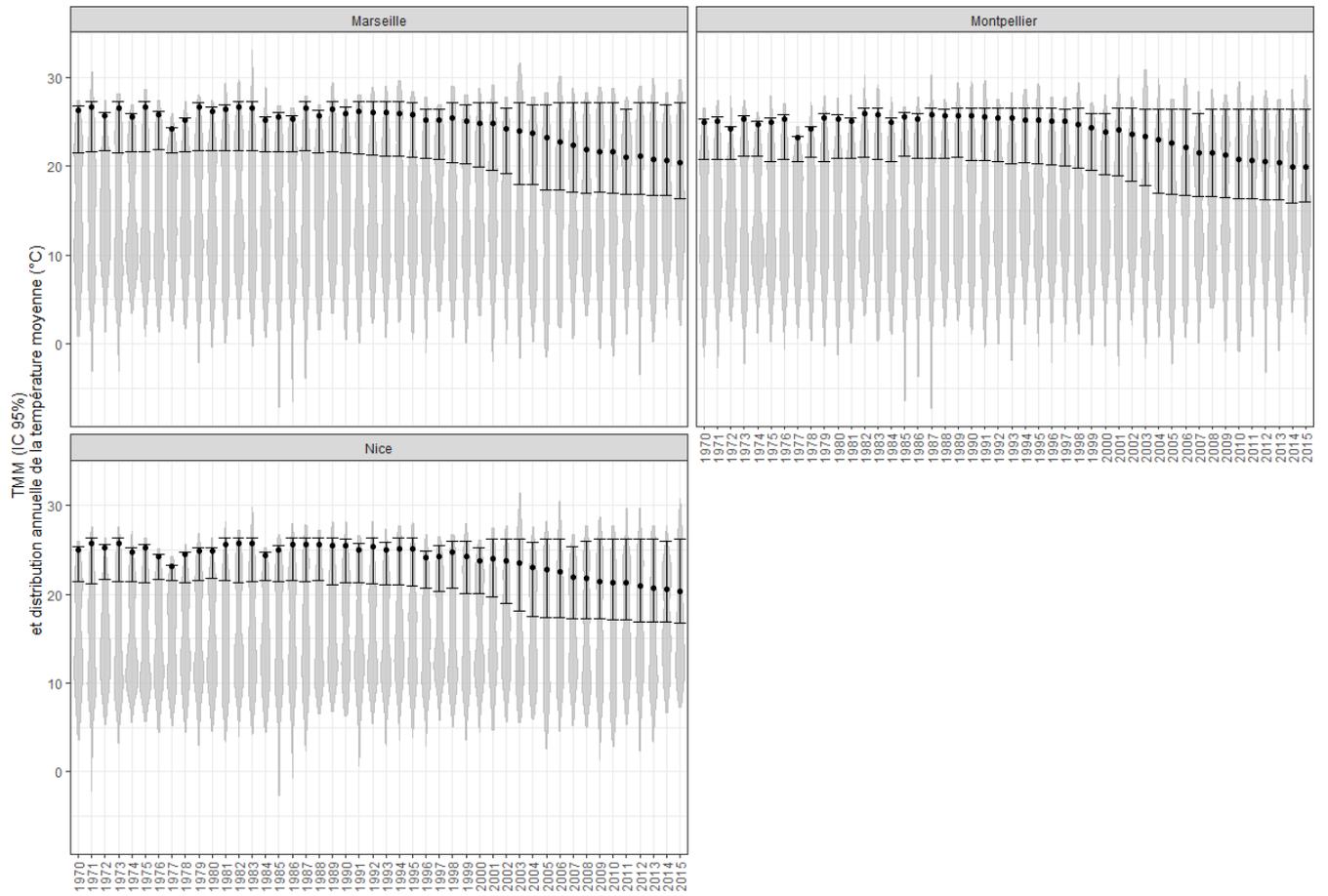
Entre 2015 et 1970



Annexe 3. Évolutions de la TMM par zone







Annexe 4. RR cumulés sur 0-21 jours pour différentes années

RR pour une température donnée

	Année	Incrément en percentile	Incrément en °C	RR associé
Percentile 0,1	1975	Percentile 0,1 vs 50	-6,95 vs 12,15	1,258 [1,188:1,333]
	1980	Percentile 0,1 vs 50	-6,95 vs 12,15	1,312 [1,258:1,367]
	1985	Percentile 0,1 vs 50	-6,95 vs 12,15	1,382 [1,318:1,448]
	1990	Percentile 0,1 vs 50	-6,95 vs 12,15	1,440 [1,349:1,537]
	1995	Percentile 0,1 vs 50	-6,95 vs 12,15	1,492 [1,372:1,622]
	2000	Percentile 0,1 vs 50	-6,95 vs 12,15	1,548 [1,393:1,721]
	2005	Percentile 0,1 vs 50	-6,95 vs 12,15	1,607 [1,411:1,829]
	2010	Percentile 0,1 vs 50	-6,95 vs 12,15	1,661 [1,426:1,936]
	2015	Percentile 0,1 vs 50	-6,95 vs 12,15	1,723 [1,443:2,057]
Percentile 1	1975	Percentile 1 vs 50	-2,01 vs 12,15	1,281 [1,241:1,323]
	1980	Percentile 1 vs 50	-2,01 vs 12,15	1,273 [1,238:1,309]
	1985	Percentile 1 vs 50	-2,01 vs 12,15	1,267 [1,237:1,299]
	1990	Percentile 1 vs 50	-2,01 vs 12,15	1,263 [1,236:1,292]
	1995	Percentile 1 vs 50	-2,01 vs 12,15	1,258 [1,230:1,287]
	2000	Percentile 1 vs 50	-2,01 vs 12,15	1,252 [1,222:1,283]
	2005	Percentile 1 vs 50	-2,01 vs 12,15	1,246 [1,213:1,280]
	2010	Percentile 1 vs 50	-2,01 vs 12,15	1,240 [1,202:1,279]
	2015	Percentile 1 vs 50	-2,01 vs 12,15	1,236 [1,194:1,279]
Percentile 2,5	1975	Percentile 2,5 vs 50	-0,14 vs 12,15	1,223 [1,193:1,254]
	1980	Percentile 2,5 vs 50	-0,14 vs 12,15	1,215 [1,189:1,241]
	1985	Percentile 2,5 vs 50	-0,14 vs 12,15	1,208 [1,186:1,229]
	1990	Percentile 2,5 vs 50	-0,14 vs 12,15	1,202 [1,183:1,222]
	1995	Percentile 2,5 vs 50	-0,14 vs 12,15	1,196 [1,177:1,217]
	2000	Percentile 2,5 vs 50	-0,14 vs 12,15	1,190 [1,168:1,213]
	2005	Percentile 2,5 vs 50	-0,14 vs 12,15	1,183 [1,157:1,209]
	2010	Percentile 2,5 vs 50	-0,14 vs 12,15	1,176 [1,146:1,207]
	2015	Percentile 2,5 vs 50	-0,14 vs 12,15	1,171 [1,137:1,205]
Percentile 97,5	1975	Percentile 97,5 vs 50	23,72 vs 12,15	0,955 [0,919:0,993]
	1980	Percentile 97,5 vs 50	23,72 vs 12,15	0,960 [0,928:0,992]
	1985	Percentile 97,5 vs 50	23,72 vs 12,15	0,964 [0,937:0,992]
	1990	Percentile 97,5 vs 50	23,72 vs 12,15	0,970 [0,945:0,995]
	1995	Percentile 97,5 vs 50	23,72 vs 12,15	0,976 [0,953:0,999]
	2000	Percentile 97,5 vs 50	23,72 vs 12,15	0,983 [0,961:1,005]
	2005	Percentile 97,5 vs 50	23,72 vs 12,15	0,991 [0,968:1,015]
	2010	Percentile 97,5 vs 50	23,72 vs 12,15	0,998 [0,973:1,023]
	2015	Percentile 97,5 vs 50	23,72 vs 12,15	1,005 [0,975:1,036]
Percentile 99,5	1975	Percentile 99,5 vs 50	26,18 vs 12,15	1,199 [1,105:1,302]
	1980	Percentile 99,5 vs 50	26,18 vs 12,15	1,187 [1,102:1,278]
	1985	Percentile 99,5 vs 50	26,18 vs 12,15	1,171 [1,097:1,250]
	1990	Percentile 99,5 vs 50	26,18 vs 12,15	1,154 [1,090:1,222]
	1995	Percentile 99,5 vs 50	26,18 vs 12,15	1,140 [1,085:1,198]

	2000	Percentile 99,5 vs 50	26,18 vs 12,15	1,128 [1,081:1,178]
	2005	Percentile 99,5 vs 50	26,18 vs 12,15	1,117 [1,076:1,159]
	2010	Percentile 99,5 vs 50	26,18 vs 12,15	1,103 [1,068:1,139]
	2015	Percentile 99,5 vs 50	26,18 vs 12,15	1,089 [1,051:1,127]
Percentile 99,9	1975	Percentile 99,9 vs 50	28,12 vs 12,15	2,333 [1,949:2,792]
	1980	Percentile 99,9 vs 50	28,12 vs 12,15	2,201 [1,859:2,605]
	1985	Percentile 99,9 vs 50	28,12 vs 12,15	2,051 [1,753:2,400]
	1990	Percentile 99,9 vs 50	28,12 vs 12,15	1,900 [1,642:2,198]
	1995	Percentile 99,9 vs 50	28,12 vs 12,15	1,769 [1,544:2,027]
	2000	Percentile 99,9 vs 50	28,12 vs 12,15	1,655 [1,454:1,883]
	2005	Percentile 99,9 vs 50	28,12 vs 12,15	1,543 [1,357:1,755]
	2010	Percentile 99,9 vs 50	28,12 vs 12,15	1,433 [1,251:1,642]
	2015	Percentile 99,9 vs 50	28,12 vs 12,15	1,333 [1,143:1,554]

RR associés à une température inhabituelle par rapport aux années précédentes

	Année	Référence pour le calcul des percentiles	Incrément en percentile	Incrément en °C	RR associé
Percentile 0,1	1975	1971-1975	Percentile 0,1 vs 50	-6,54 vs 11,02	1,261 [1,199:1,326]
	1980	1976-1980	Percentile 0,1 vs 50	-5,32 vs 11,35	1,312 [1,273:1,351]
	1985	1981-1985	Percentile 0,1 vs 50	-10,07 vs 11,71	1,415 [1,280:1,565]
	1990	1986-1990	Percentile 0,1 vs 50	-8,38 vs 12,32	1,499 [1,363:1,650]
	1995	1991-1995	Percentile 0,1 vs 50	-4,55 vs 12,11	1,361 [1,310:1,414]
	2000	1996-2000	Percentile 0,1 vs 50	-5,65 vs 12,47	1,448 [1,353:1,551]
	2005	2001-2005	Percentile 0,1 vs 50	-4,40 vs 12,72	1,380 [1,313:1,450]
	2010	2006-2010	Percentile 0,1 vs 50	-4,60 vs 12,6	1,405 [1,321:1,494]
	2015	2011-2015	Percentile 0,1 vs 50	-5,51 vs 13,24	1,522 [1,371:1,690]
Percentile 1	1975	1971-1975	Percentile 1 vs 50	-1,44 vs 11,02	1,257 [1,217:1,297]
	1980	1976-1980	Percentile 1 vs 50	-2,14 vs 11,35	1,269 [1,233:1,306]
	1985	1981-1985	Percentile 1 vs 50	-3,00 vs 11,71	1,291 [1,257:1,326]
	1990	1986-1990	Percentile 1 vs 50	-2,73 vs 12,32	1,287 [1,256:1,318]
	1995	1991-1995	Percentile 1 vs 50	-1,64 vs 12,11	1,243 [1,217:1,270]
	2000	1996-2000	Percentile 1 vs 50	-1,58 vs 12,47	1,236 [1,208:1,265]
	2005	2001-2005	Percentile 1 vs 50	-1,75 vs 12,72	1,237 [1,204:1,270]
	2010	2006-2010	Percentile 1 vs 50	-2,06 vs 12,6	1,242 [1,204:1,281]
	2015	2011-2015	Percentile 1 vs 50	-1,22 vs 13,24	1,205 [1,166:1,247]
Percentile 2,5	1975	1971-1975	Percentile 2,5 vs 50	0,44 vs 11,02	1,196 [1,169:1,224]
	1980	1976-1980	Percentile 2,5 vs 50	-0,45 vs 11,35	1,219 [1,191:1,248]
	1985	1981-1985	Percentile 2,5 vs 50	-0,44 vs 11,71	1,214 [1,191:1,238]
	1990	1986-1990	Percentile 2,5 vs 50	-0,46 vs 12,32	1,213 [1,193:1,234]
	1995	1991-1995	Percentile 2,5 vs 50	0,03 vs 12,11	1,191 [1,172:1,211]
	2000	1996-2000	Percentile 2,5 vs 50	0,27 vs 12,47	1,181 [1,160:1,201]
	2005	2001-2005	Percentile 2,5 vs 50	-0,01 vs 12,72	1,183 [1,157:1,209]
	2010	2006-2010	Percentile 2,5 vs 50	-0,62 vs 12,6	1,191 [1,159:1,225]
	2015	2011-2015	Percentile 2,5 vs 50	1,03 vs 13,24	1,147 [1,119:1,177]

Percentile 97,5	1975	1971-1975	Percentile 97,5 vs 50	22,80 vs 11,02	0,954 [0,929:0,981]
	1980	1976-1980	Percentile 97,5 vs 50	22,26 vs 11,35	0,963 [0,945:0,982]
	1985	1981-1985	Percentile 97,5 vs 50	23,27 vs 11,71	0,964 [0,941:0,988]
	1990	1986-1990	Percentile 97,5 vs 50	23,56 vs 12,32	0,971 [0,947:0,995]
	1995	1991-1995	Percentile 97,5 vs 50	24,29 vs 12,11	0,976 [0,950:1,003]
	2000	1996-2000	Percentile 97,5 vs 50	23,57 vs 12,47	0,985 [0,963:1,006]
	2005	2001-2005	Percentile 97,5 vs 50	24,67 vs 12,72	1,003 [0,977:1,030]
	2010	2006-2010	Percentile 97,5 vs 50	23,88 vs 12,6	1,000 [0,975:1,026]
	2015	2011-2015	Percentile 97,5 vs 50	24,28 vs 13,24	1,012 [0,980:1,045]
Percentile 99,5	1975	1971-1975	Percentile 99,5 vs 50	25,16 vs 11,02	1,000 [0,945:1,058]
	1980	1976-1980	Percentile 99,5 vs 50	25,16 vs 11,35	1,004 [0,956:1,056]
	1985	1981-1985	Percentile 99,5 vs 50	25,71 vs 11,71	1,078 [1,023:1,137]
	1990	1986-1990	Percentile 99,5 vs 50	25,87 vs 12,32	1,100 [1,047:1,157]
	1995	1991-1995	Percentile 99,5 vs 50	26,22 vs 12,11	1,148 [1,091:1,209]
	2000	1996-2000	Percentile 99,5 vs 50	25,52 vs 12,47	1,050 [1,017:1,085]
	2005	2001-2005	Percentile 99,5 vs 50	27,37 vs 12,72	1,333 [1,226:1,449]
	2010	2006-2010	Percentile 99,5 vs 50	26,11 vs 12,6	1,099 [1,066:1,133]
	2015	2011-2015	Percentile 99,5 vs 50	26,85 vs 13,24	1,156 [1,086:1,231]
Percentile 99,9	1975	1971-1975	Percentile 99,9 vs 50	26,44 vs 11,02	1,271 [1,163:1,389]
	1980	1976-1980	Percentile 99,9 vs 50	26,69 vs 11,35	1,338 [1,222:1,466]
	1985	1981-1985	Percentile 99,9 vs 50	27,48 vs 11,71	1,632 [1,450:1,837]
	1990	1986-1990	Percentile 99,9 vs 50	27,36 vs 12,32	1,507 [1,359:1,671]
	1995	1991-1995	Percentile 99,9 vs 50	27,45 vs 12,11	1,473 [1,335:1,626]
	2000	1996-2000	Percentile 99,9 vs 50	27,07 vs 12,47	1,306 [1,214:1,406]
	2005	2001-2005	Percentile 99,9 vs 50	29,60 vs 12,72	2,269 [1,769:2,911]
	2010	2006-2010	Percentile 99,9 vs 50	27,64 vs 12,6	1,326 [1,198:1,469]
	2015	2011-2015	Percentile 99,9 vs 50	28,31 vs 13,24	1,373 [1,157:1,628]

RR associés à une température inhabituelle pour l'année

	Année	Référence pour le calcul des percentiles	Incrément en percentile	Incrément en °C	RR associé
Percentile 0,1	1975	1975	Percentile 0,1 vs 50	-2,26 vs 10,98	1,275 [1,234:1,319]
	1980	1980	Percentile 0,1 vs 50	-4,26 vs 10,85	1,301 [1,264:1,340]
	1985	1985	Percentile 0,1 vs 50	-11,23 vs 11,71	1,421 [1,250:1,616]
	1990	1990	Percentile 0,1 vs 50	-1,54 vs 12,94	1,251 [1,226:1,276]
	1995	1995	Percentile 0,1 vs 50	-2,95 vs 12,46	1,294 [1,261:1,327]
	2000	2000	Percentile 0,1 vs 50	-1,83 vs 12,51	1,246 [1,217:1,275]
	2005	2005	Percentile 0,1 vs 50	-3,73 vs 13,22	1,338 [1,287:1,390]
	2010	2010	Percentile 0,1 vs 50	-4,29 vs 11,88	1,375 [1,302:1,451]
	2015	2015	Percentile 0,1 vs 50	-0,24 vs 13,32	1,178 [1,143:1,214]
Percentile 1	1975	1975	Percentile 1 vs 50	-0,40 vs 10,98	1,223 [1,190:1,257]
	1980	1980	Percentile 1 vs 50	-2,23 vs 10,85	1,267 [1,230:1,305]
	1985	1985	Percentile 1 vs 50	-8,85 vs 11,71	1,404 [1,302:1,514]
	1990	1990	Percentile 1 vs 50	-0,01 vs 12,94	1,203 [1,185:1,221]
	1995	1995	Percentile 1 vs 50	-1,02 vs 12,46	1,225 [1,201:1,249]

	2000	2000	Percentile 1 vs 50	0,23 vs 12,51	1,182 [1,161:1,203]
	2005	2005	Percentile 1 vs 50	-1,99 vs 13,22	1,248 [1,215:1,283]
	2010	2010	Percentile 1 vs 50	-2,73 vs 11,88	1,271 [1,230:1,314]
	2015	2015	Percentile 1 vs 50	1,06 vs 13,32	1,147 [1,118:1,177]
Percentile 2,5	1975	1975	Percentile 2,5 vs 50	1,16 vs 10,98	1,173 [1,150:1,197]
	1980	1980	Percentile 2,5 vs 50	-1,05 vs 10,85	1,235 [1,203:1,268]
	1985	1985	Percentile 2,5 vs 50	-5,70 vs 11,71	1,355 [1,308:1,404]
	1990	1990	Percentile 2,5 vs 50	1,04 vs 12,94	1,173 [1,159:1,187]
	1995	1995	Percentile 2,5 vs 50	0,80 vs 12,46	1,172 [1,156:1,189]
	2000	2000	Percentile 2,5 vs 50	2,12 vs 12,51	1,135 [1,121:1,150]
	2005	2005	Percentile 2,5 vs 50	-0,95 vs 13,22	1,211 [1,181:1,241]
	2010	2010	Percentile 2,5 vs 50	-1,75 vs 11,88	1,225 [1,188:1,263]
	2015	2015	Percentile 2,5 vs 50	2,12 vs 13,32	1,124 [1,100:1,150]
Percentile 97,5	1975	1975	Percentile 97,5 vs 50	23,46 vs 10,98	0,950 [0,918:0,983]
	1980	1980	Percentile 97,5 vs 50	21,49 vs 10,85	0,964 [0,950:0,978]
	1985	1985	Percentile 97,5 vs 50	22,29 vs 11,71	0,968 [0,952:0,985]
	1990	1990	Percentile 97,5 vs 50	24,35 vs 12,94	0,973 [0,943:1,005]
	1995	1995	Percentile 97,5 vs 50	24,84 vs 12,46	0,995 [0,965:1,027]
	2000	2000	Percentile 97,5 vs 50	23,02 vs 12,51	0,985 [0,966:1,004]
	2005	2005	Percentile 97,5 vs 50	24,62 vs 13,22	1,004 [0,978:1,031]
	2010	2010	Percentile 97,5 vs 50	23,90 vs 11,88	0,997 [0,971:1,024]
	2015	2015	Percentile 97,5 vs 50	25,35 vs 13,32	1,042 [1,013:1,071]
Percentile 99,5	1975	1975	Percentile 99,5 vs 50	25,99 vs 10,98	1,143 [1,061:1,231]
	1980	1980	Percentile 99,5 vs 50	23,68 vs 10,85	0,952 [0,923:0,982]
	1985	1985	Percentile 99,5 vs 50	24,10 vs 11,71	0,960 [0,930:0,991]
	1990	1990	Percentile 99,5 vs 50	26,64 vs 12,94	1,267 [1,178:1,363]
	1995	1995	Percentile 99,5 vs 50	26,70 vs 12,46	1,249 [1,169:1,334]
	2000	2000	Percentile 99,5 vs 50	24,93 vs 12,51	1,006 [0,978:1,035]
	2005	2005	Percentile 99,5 vs 50	26,20 vs 13,22	1,125 [1,083:1,168]
	2010	2010	Percentile 99,5 vs 50	25,68 vs 11,88	1,058 [1,032:1,085]
	2015	2015	Percentile 99,5 vs 50	27,62 vs 13,32	1,255 [1,122:1,405]
Percentile 99,9	1975	1975	Percentile 99,9 vs 50	26,94 vs 10,98	1,466 [1,314:1,636]
	1980	1980	Percentile 99,9 vs 50	24,48 vs 10,85	0,955 [0,917:0,993]
	1985	1985	Percentile 99,9 vs 50	25,15 vs 11,71	1,006 [0,963:1,051]
	1990	1990	Percentile 99,9 vs 50	27,52 vs 12,94	1,579 [1,412:1,765]
	1995	1995	Percentile 99,9 vs 50	27,54 vs 12,46	1,508 [1,360:1,672]
	2000	2000	Percentile 99,9 vs 50	25,99 vs 12,51	1,104 [1,061:1,148]
	2005	2005	Percentile 99,9 vs 50	26,98 vs 13,22	1,250 [1,172:1,333]
	2010	2010	Percentile 99,9 vs 50	26,26 vs 11,88	1,111 [1,073:1,150]
	2015	2015	Percentile 99,9 vs 50	28,53 vs 13,32	1,419 [1,171:1,721]

Références

- [1] Hanna EG, Tait PW. Limitations to Thermoregulation and Acclimatization Challenge Human Adaptation to Global Warming. *Int J Environ Res Public Health*. 2015;12(7):8034-74.
- [2] Pascal M, Wagner V, Corso M. Impacts de la température sur la mortalité dans dix-huit zones urbaines françaises entre 2000 et 2010. Saint-Maurice: Santé publique France; 2017. 61 p.
- [3] Pascal M, Wagner V, Corso M, Laaidi K, Ung A, Beaudreau P. Heat and cold related-mortality in 18 French cities. *Environment International*. 2018;121:189-98.
- [4] Barrett JR. Increased minimum mortality temperature in France: Data suggest humans are adapting to climate change. *Environmental Health Perspectives*. 2015;123(7).
- [5] Folkerts MA, Bröde P, Botzen WJW, Martinius ML, Gerrett N, Harmsen CN, et al. Long Term Adaptation to Heat Stress: Shifts in the Minimum Mortality Temperature in the Netherlands. *Frontiers in Physiology*. 2020;11.
- [6] Follos F, Linares C, Vellón JM, López-Bueno JA, Luna MY, Sánchez-Martínez G, et al. The evolution of minimum mortality temperatures as an indicator of heat adaptation: The cases of Madrid and Seville (Spain). *Science of the Total Environment*. 2020;747.
- [7] Tobías A, Armstrong B, Gasparrini A. Brief report: Investigating uncertainty in the minimum mortality temperature. *Epidemiology*. 2017;28(1):72-6.
- [8] Schaeffer L, de Crouy-Chanel P, Wagner V, Desplat J, Pascal M. How to estimate exposure when studying the temperature-mortality relationship? A case study of the Paris area. *International Journal of Biometeorology*. 2016;60(1):73-83.
- [9] Gasparrini A, Armstrong B, Kenward MG. Distributed lag non-linear models. *Statistics in medicine*. 2010;29(21):2224-34.
- [10] Gasparrini A, Armstrong B, Kenward MG. Multivariate meta-analysis for non-linear and other multi-parameter associations. *Statistics in medicine*. 2012;31(29):3821-39.
- [11] Gasparrini A, Armstrong B. Reducing and meta-analysing estimates from distributed lag non-linear models. *BMC Medical Research Methodology*. 2013;13(1).
- [12] Gasparrini A, Guo Y, Hashizume M, Kinney PL, Petkova EP, Lavigne E, et al. Temporal variation in heat-mortality associations: A multicountry study. *Environmental Health Perspectives*. 2015;123(11):1200-7.
- [13] Gasparrini A, Leone M. Attributable risk from distributed lag models. *BMC Medical Research Methodology*. 2014;14(1).
- [14] Melnikov V, Krzhizhanovskaya VV, Lees MH, Sloom PMA. System dynamics of human body thermal regulation in outdoor environments. *Building & Environment*. 2018;143:760-9.
- [15] Havenith G, Fiala D. Thermal indices and thermophysiological modeling for heat stress. *Comprehensive Physiology*. 2016;6(1):255-302.

- [16] Arbuthnott K, Hajat S, Heaviside C, Vardoulakis S. What is cold-related mortality? A multi-disciplinary perspective to inform climate change impact assessments. *Environment International*. 2018;121:119-29.
- [17] Sheridan SC, Allen MJ. Temporal trends in human vulnerability to excessive heat. *Environmental Research Letters*. 2018;13(4).
- [18] Achebak H, Devolder D, Ballester J. Trends in temperature-related age-specific and sex-specific mortality from cardiovascular diseases in Spain: a national time-series analysis. *The Lancet Planetary Health*. 2019;3(7):e297-e306.
- [19] Achebak H, Devolder D, Ballester J. Heat-related mortality trends under recent climate warming in Spain: A 36-year observational study. *PLoS Medicine*. 2018;15(7).
- [20] Díaz J, Carmona R, Mirón IJ, Luna MY, Linares C. Time trend in the impact of heat waves on daily mortality in Spain for a period of over thirty years (1983–2013). *Environment International*. 2018;116:10-7.
- [21] Kim H, Kim H, Byun G, Choi Y, Song H, Lee JT. Difference in temporal variation of temperature-related mortality risk in seven major South Korean cities spanning 1998–2013. *Science of the Total Environment*. 2019;656:986-96.
- [22] Kyselý J, Plavcová E. Declining impacts of hot spells on mortality in the Czech Republic, 1986-2009: Adaptation to climate change? *Climatic Change*. 2012;113(2):437-53.
- [23] Lee W, Choi HM, Kim D, Honda Y, Guo YLL, Kim H. Temporal changes in mortality attributed to heat extremes for 57 cities in Northeast Asia. *Science of the Total Environment*. 2018;616-617:703-9.
- [24] Mirón IJ, Montero JC, Criado-Álvarez JJ, Díaz J, Linares C. Effects of temperature extremes on daily mortality in Castile-La Mancha (Spain): trends from 1975 to 2003. *Gaceta Sanitaria*. 2010;24(2):117-22.
- [25] Scortichini M, De'Donato F, De Sario M, Leone M, Åström C, Ballester F, et al. The inter-annual variability of heat-related mortality in nine European cities (1990-2010). *Environmental Health: A Global Access Science Source*. 2018;17(1).
- [26] Martínez-Solanas È, Basagaña X. Temporal changes in temperature-related mortality in Spain and effect of the implementation of a Heat Health Prevention Plan. *Environmental Research*. 2019:102-13.
- [27] Vicedo-Cabrera AM, Sera F, Guo Y, Chung Y, Arbuthnott K, Tong S, et al. A multi-country analysis on potential adaptive mechanisms to cold and heat in a changing climate. *Environment International*. 2018;111:239-46.
- [28] Chung Y, Noh H, Honda Y, Hashizume M, Bell ML, Guo YLL, et al. Temporal Changes in Mortality Related to Extreme Temperatures for 15 Cities in Northeast Asia: Adaptation to Heat and Maladaptation to Cold. *American Journal of Epidemiology*. 2017;185(10):907-13.
- [29] Armstrong B, Sera F, Vicedo-Cabrera AM, Abrutzky R, Åström DO, Bell ML, et al. The Role of Humidity in Associations of High Temperature with Mortality: A Multiauthor, Multicity Study. *Environmental health perspectives*. 2019;127(9):97007.

- [30] Lee W, Bell ML, Gasparrini A, Armstrong BG, Sera F, Hwang S, et al. Mortality burden of diurnal temperature range and its temporal changes: A multi-country study. *Environment International*. 2018;110:123-30.
- [31] de'Donato F, Scortichini M, De Sario M, de Martino A, Michelozzi P. Temporal variation in the effect of heat and the role of the Italian heat prevention plan. *Public Health*. 2018;161:154-62.
- [32] Sera F, Armstrong B, Tobias A, Vicedo-Cabrera AM, Åström C, Bell ML, et al. How urban characteristics affect vulnerability to heat and cold: A multi-country analysis. *International Journal of Epidemiology*. 2019;48(4):1101-12.
- [33] Moriyama M, Hugentobler WJ, Iwasaki A. Seasonality of Respiratory Viral Infections. *Annual Review of Virology*. 2020.
- [34] Vicedo-Cabrera AM, Scovronick N, Sera F, Royé D, Schneider R, Tobias A, et al. The burden of heat-related mortality attributable to recent human-induced climate change. *Nature Climate Change*. 2021;11(6):492-500.
- [35] Ebi KL. Greater understanding is need of whether warmer and shorter winters associated with climate change could reduce winter mortality. *Environmental Research Letters*. 2015;10(11):111002.
- [36] Kinney PL, Schwartz J, Pascal M, Petkova EP, Le Tertre A, Medina S, et al. Winter season mortality: will climate warming bring benefits? *Environmental Research Letters*. 2015;10(6):064016.
- [37] Gasparrini A, Guo Y, Sera F, Vicedo-Cabrera A, Huber V, Tong S, et al. Projections of temperature-related excess mortality under climate change scenarios. *The Lancet Planetary Health*. 2017;1(9):e360-e7.

Citation suggérée : Évolution de la relation température-mortalité en France depuis 1970. Saint-Maurice : Santé publique France, 2022. 57 p. Disponible à partir de l'URL : www.santepubliquefrance.fr

ISSN : 2609-2174/ ISBN-NET 979-10-289-0763-1 / RÉALISÉ PAR LA DIRECTION DE LA COMMUNICATION,
SANTÉ PUBLIQUE FRANCE / DÉPÔT LÉGAL : FÉVRIER 2022