



Programme "Gestion et Impacts  
du Changement Climatique"  
(GICC)  
(2<sup>ème</sup> tranche)

Convention Medias n° 9/00

**Rapport final**

**La mortalité selon le contexte thermique  
Réalité présente et scénarios pour le XXI<sup>ème</sup> siècle  
Le cas de la France**

**Responsable scientifique**  
Jean-Pierre BESANCENOT  
*Directeur de recherche CNRS*

---

CLIMAT ET SANTÉ

Centre Universitaire d'Épidémiologie de Population

Faculté de Médecine

BP 87900

21079 DIJON Cedex

Tél. : 03.80.39.33.77 – Fax : 03.80.39.33.00

E-mail : jean-pierre.besancenot@u-bourgogne.fr

Ont participé à ce programme de recherche :

- Mr Jean-Pierre BESANCENOT, *directeur de recherche au CNRS, Laboratoire Climat et Santé, Faculté de Médecine de l'Université de Bourgogne*
- Mme Karine LAAIDI, *Ingénieur de recherche, Laboratoire Climat et Santé, Faculté de Médecine de l'Université de Bourgogne*<sup>1</sup>
- Mr Mohamed LAAIDI, *Ingénieur de recherche, Laboratoire Climat et Santé, Faculté de Médecine de l'Université de Bourgogne*
- Mlle Candice LEGRIS, *Interne en Pharmacie spécialisée, Laboratoire Climat et Santé, Faculté de Médecine de l'Université de Bourgogne*
- Mlle Clotilde ROYER, *Interne en Médecine, Service de Cardiologie, CHU du Bocage et Laboratoire Climat et Santé, Faculté de Médecine de l'Université de Bourgogne*

Les participants tiennent à assurer de leur profonde gratitude Mme Éliane MICHEL, *Ingénieur de recherche à l'INSERM, Antenne de Marseille du SC8*, ainsi qu'à Mr Denis THÉVENIN, *Directeur du Centre Départemental de Météo-France de la Côte d'Or*, sans qui les données nécessaires à cette recherche n'auraient pas pu être rassemblées.

---

1. Mme Karine Laaidi est à présent épidémiologiste spécialiste des relations climat-santé au Département Santé et Environnement de l'Institut de Veille Sanitaire (InVS).

## 1. Introduction : les objectifs initiaux du projet, la place de ce projet dans le contexte scientifique général

L'objectif de ce programme était d'analyser les fluctuations actuelles du nombre des décès selon le contexte thermique, de façon à en tirer des extrapolations raisonnables dans le cadre de différents scénarios d'évolution du climat pour le XXI<sup>ème</sup> siècle, compte étant tenu de la dérive prévisible des structures démographiques (vieillesse de la population).

- Afin de faciliter les comparaisons avec les pays voisins, la méthode mise en œuvre devait s'écarter le moins possible de celle utilisée dans l'étude européenne "Eurosummer" dont les résultats ont été diffusés en septembre 2000, mais d'où le territoire français était malencontreusement absent (W.R. Keatinge *et al.*, 2000), de la même façon qu'il l'avait été antérieurement d'une enquête relative à l'exposition au froid et à la mortalité hivernale (W.R. Keatinge *et al.*, 1997).
- À travers l'analyse statistique de la série complète des décès survenus pendant les cinq années 1991-1995 sur l'ensemble de la France métropolitaine (Corse exclue du fait de la médiocre validité de certaines données, ainsi bien évidemment que les DOM-TOM qui relèvent de conditions climatiques très différentes), l'ambition était de *mettre en évidence, de quantifier et de régionaliser l'effet des dispositions thermiques, éventuellement corrigées d'autres variables météorologiques.*
- Des réponses devaient ainsi pouvoir être apportées à cinq séries de questions majeures :

(a) *Quel type de liaison existe-t-il, au pas de temps journalier, entre la mortalité (prise comme variable dépendante) et la température (prise comme variable explicative) ? Si le nombre des décès ne reste pas le même tout au long du spectre thermique, quelles sont les températures les plus et les moins favorables, et quelle est l'ampleur des écarts constatés entre les jours les plus froids, les jours plus chauds et les jours thermiquement "moyens" ? Peut-on définir une ou des température(s) pour lesquelles la mortalité est respectivement à son niveau le plus bas et à son niveau le plus élevé ?*

(b) *Le lien température-mortalité varie-t-il d'un sous-groupe de la population à l'autre, notamment en fonction du sexe et de la tranche d'âge ?*

(c) *Est-il identique pour toutes les causes de décès ? Quelles sont les plus thermosensibles ?*

(d) *Y a-t-il, à l'intérieur du territoire métropolitain, des différences quant à l'action de la température sur la mortalité ? En particulier, s'il existe une température optimale, qui fait chuter la mortalité à son niveau le plus bas, cet optimum thermique est-il uniforme ou varie-t-il à l'intérieur du pays, en fonction de l'inégale adaptation au stress climatique ou en fonction d'autres variables ?*

(e) *Enfin, d'autres paramètres météorologiques viennent-ils moduler, dans quel sens et avec quelle intensité, les effets des températures sur la mortalité ?*

- L'extrapolation de ces résultats concernant une période très récente devait ensuite fournir une première série d'*indications sur le futur*. Après l'élaboration d'un modèle simple liant le nombre (actuel) des décès à la température, les projections d'impact sur les températures quotidiennes du dérèglement climatique annoncé devait permettre de réaliser une prévision de l'évolution de la mortalité au XXI<sup>ème</sup> siècle, en présence de différents scénarios plausibles d'évolution du climat – et d'évolution des structures démographiques.
- Enfin, l'ensemble devait déboucher sur l'énoncé de propositions concrètes visant à minimiser, si faire se peut, les conséquences néfastes du changement climatique considéré aujourd'hui comme inéluctable, même si l'on en discerne encore mal les modalités.

Il s'agissait donc, avant tout, d'une *étude rétrospective* mais s'ouvrant, dans un second temps, sur les impacts prévisibles dans les prochaines décennies. À notre connaissance, si l'on met à part quelques travaux précurseurs de la seconde moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle (qui, bien évidemment, ne se plaçaient pas dans la perspective du *global change*), le rapport température-mortalité n'avait fait l'objet en France, antérieurement à la présente recherche, que d'une seule étude d'envergure (M. Le Berre *et al.*, 1982)<sup>2</sup>. La série analysée était particulièrement longue (1949-1977) et les traitements statistiques mis en œuvre restent aujourd'hui parfaitement valables. Malheureusement, l'échelle adoptée (France entière, sans la moindre différenciation régionale) et, surtout, le choix de ne prendre en compte qu'une station météorologique, assez abusivement qualifiée de "moyenne", ont singulièrement réduit la portée des résultats obtenus. Il s'ensuit que tout, ou presque, restait à faire.

---

2. D'autres travaux de qualité ont été consacrés à la saisonnalité des décès (M. Aubenque, P. Damiani et H. Massé, 1979a et b), mais ils répondent à un questionnement totalement différent et, bien qu'ils remontent à plus d'un quart de siècle, n'ont jamais été actualisés.

## **2. Résumé étendu**

La relation entre la température et la mortalité, qui pendant longtemps n'a guère intéressé les chercheurs, est en train de prendre une importance toute nouvelle dans le contexte d'un possible ou probable réchauffement planétaire. L'objectif du présent programme de recherche, réalisé par le Laboratoire Climat & Santé de la Faculté de Médecine de Dijon, était d'analyser les fluctuations actuelles du nombre des décès selon le contexte thermique, de façon à en tirer des extrapolations raisonnables dans le cadre de différents scénarios d'évolution du climat pour le XXI<sup>ème</sup> siècle, compte étant tenu de la dérive prévisible des structures démographiques (vieillesse de la population).

L'étude a porté, au pas de temps journalier, sur les décès enregistrés en France, chez les hommes comme chez les femmes, et quelle que soit la tranche d'âge, durant les années 1991-1995. Les données ont d'abord été exploitées pour l'ensemble de la population, puis en introduisant des subdivisions selon l'âge (moins d'un an, entre 1 et 64 ans, au-dessus de 64 ans), selon le sexe et selon la cause de décès (maladies respiratoires, accidents vasculaires cérébraux, cardiopathies ischémiques, autres maladies de l'appareil circulatoire, et toutes autres causes). Tous les taux de mortalité ont été rapportés à un million d'habitants, les effectifs de la population étant interpolés à partir des recensements. Une vague de froid hivernale (janvier-février 1985) et une vague de chaleur estivale (août 2003) ont également été prises en compte, afin de mieux cerner étudier le risque de surmortalité associé à des conditions environnementales extrêmes.

Durant la période considérée, la température moyenne extérieure s'est montrée capable d'expliquer 30,9 à 33,4% (moyenne : 31,8%) de la variation interjournalière de la mortalité.

La démonstration a ensuite été faite que la relation entre la température moyenne journalière et la mortalité, toutes classes d'âge et toutes causes de décès confondues, présentait partout une allure générale parabolique (courbe en "U" ou en "V"), avec un pic de mortalité très saillant lors des situations de grand froid ou, plus encore, de forte chaleur.

Entre ces extrêmes, la mortalité passe par un minimum en présence d'une température que l'on qualifie d'optimum thermique. Nous avons donc calculé la mortalité moyenne pour chaque bande de température de 3°C, de façon à identifier dans chaque région l'intervalle de 3°C, déterminé à 0,1°C près, où la mortalité était la plus faible. Cet optimum peut être pris comme une mesure, relativement grossière mais instructive, de la tolérance à son environnement thermique de la population vivant en un endroit donné. Il s'est alors confirmé que les effets de la température dépendaient fortement du climat de la région étudiée. L'optimum thermique est ainsi notablement plus élevé dans les climats chauds (21,1 à 24,1°C dans le département du Var) et à Paris (20,6 à 23,6°C, probablement en raison d'un effet calorique urbain) qu'il ne l'est pour la France entière (17,2 à 20,2°C). Ceci est en accord avec l'hypothèse selon laquelle les êtres humains s'adaptent aux conditions climatiques de la région où ils vivent.

L'optimum varie également selon le sexe (il est plus bas chez la femme, sauf à Paris), selon l'âge (c'est au-delà de 64 ans qu'il est le plus marqué) et selon la cause du décès. Si certaines pathologies ressortent comme n'étant quasiment pas influencées par les dispositions thermiques (cas des cancers), les cardiopathies ischémiques, les accidents vasculaires cérébraux et les autres maladies de l'appareil circulatoire

En revanche, la mortalité par maladies des voies respiratoires diminue de façon presque linéaire à mesure que la température augmente, et c'est seulement en présence de situations caniculaires que l'on assiste à une discrète inversion de tendance.

Les autres paramètres météorologiques ne jouent qu'un rôle assez faible. Toutefois, le pouvoir réfrigérant de l'air et l'indice thermo-hygrométrique renforcent légèrement la qualité de la relation température-mortalité, respectivement au-dessous et au-dessus de l'optimum thermique.

Mais quand les températures extérieures changent, soit du fait de nouvelles conditions climatiques locales, soit parce que la population se déplace vers une région climatiquement différente, la question se pose de savoir à quelles conséquences on peut s'attendre sur la mortalité. Un réchauffement uniforme dans le temps comme dans l'espace – simple hypothèse d'école, mais par laquelle il est indispensable de passer – se traduirait par une diminution du nombre de jours inférieurs à l'optimum et par une augmentation du nombre de jours supérieurs à ce même optimum. Compte tenu de la pente plus forte de la courbe température-mortalité du côté des fortes chaleurs, la mortalité générale pourrait s'en trouver légèrement accrue, notamment à Paris et dans le Midi méditerranéen. Mais la répercussion la plus franche serait une inversion du rythme annuel de la mortalité, avec passage de l'actuelle surmortalité d'hiver à une surmortalité d'été. Un relèvement thermique de 2,5°C serait suffisant pour entraîner une telle inversion. Encore le développement de phénomènes d'adaptation est-il susceptible de neutraliser ou, à tout le moins, de ralentir cette évolution.

Le plus inquiétant pour l'avenir réside sans aucun doute dans la multiplication des paroxysmes thermiques, canicules et grandes vagues de froid – ces dernières n'étant nullement incompatibles avec un réchauffement "moyen". Dans ce cas, il est permis de redouter de dramatiques épisodes de surmortalité, à l'image de ce que la France a vécu, par exemple, durant l'hiver 1985 ou l'été 2003.

**Mots clés :** Température – Mortalité – Biométéorologie – Météoropathologie – Stress climatique – Démographie – Changement global – Réchauffement planétaire – France.

*The temperature-mortality relationship, that did not greatly interest the research workers for a long time, is becoming more important because of a possible or probable global warming. The purpose behind the present work, conducted by the Climate & Health department in the Faculty of Medicine of Dijon, was to analyse the present-time fluctuations of the daily number of deaths according to the ambient air temperature, in order to infer from that sensible extrapolations within the scope of various scenarios of climate evolution for the XXI<sup>st</sup> century, also in the light of the expected evolution of the population structures (increasing ratio of old people).*

*The study was concerned with all the daily deaths of men and women of all ages during the years 1991 to 1995 in the whole France. The data were first used for the whole population, and then divided by age (below one year, between 1 and 64 years, and above 64), sex and cause of death (respiratory diseases, cerebrovascular diseases, ischæmic heart diseases, other diseases of the circulatory system, and all other causes). All mortalities were given per million people, with population sizes derived from censuses by interpolation. A winter cold wave (1985, January-February) and a summer heat wave (2003, August) were also taken into account to better define the risks of comparatively high death rates at the time of extreme environmental conditions.*

*During the study period, the mean outdoor temperature was able to explain 30.9 to 33.4% (mean: 31.8%) of the day to day mortality variation.*

*Then we demonstrated the relation between daily mean temperature and mortality, in all age groups and from all causes of death, showed anywhere a general parabolic pattern ("U or V-shape"), with outstanding mortality excesses occurring during extreme cold and still more during hot conditions.*

*Between these extremes mortality reaches its minimum at a temperature value usually referred as "optimal mortality temperature" or, by simplifying, "optimal temperature". We calculated the mean daily mortality for each band of 3°C, with a view to identifying in each region the 3°C band of lowest mortality, determined at increments of 0.1°C. Such an optimum can be taken as a relatively rough but instructive measure of temperature-tolerance of people living in a given area. But temperature effects strongly depend on climate of the area being studied. So the optimal mortality temperature is substantially higher in warmer areas (21.1 to 24.1°C in the Var department) and in Paris (20.6 to 23.6°C, probably because of an urban heat effect) than in the whole France (17.2 to 20.2°C). This supports the suggestion that humans adapt themselves to the climatic conditions of the area where they live.*

*The temperature optimum also changes according to the sex (it is lower among women, except in Paris), the age (it is the most pronounced in the elderly, above 64) and death cause. Some diseases like cancers are hardly temperature-related. On the contrary daily temperature has a major influence on ischæmic heart diseases, on cerebrovascular*

diseases and to a lesser extent on the other diseases of the circulatory system. Lastly, deaths from respiratory diseases decrease almost linearly as temperature increases, and only hot spells bring the trend to reverse.

The other meteorological parameters only play a minor part. However, windchill and temperature-humidity index slightly strengthen the quality of the temperature-mortality relationship, respectively below and above the optimal temperature.

But when the external temperatures changes, either because of new local weather conditions or because people have moved to climatically different areas, the question is what the consequences to mortality are. An across-the-board warming, equal in space and time – that is purely a scholastic hypothesis, but there is not other way around it – would result in more days below the optimum and fewer days above this optimum. Considering the steeper slope of the temperature-mortality curve on the side of heat, general mortality might slightly increase, more particularly in Paris and in the Mediterranean South. But the most marked effect would be an inversion of the yearly mortality rhythm, the actual wintertime excess mortality being transformed into summertime excess mortality. It has been estimated that a thermal increasing of 2.5°C would be enough for such an inversion. But the human body can acclimatise to the new conditions and in such a way cancel the evolution or at least make it slower.

The main concern for the future is undoubtedly related to an increasing number of temperature paroxysms, as heat waves and cold waves – the latter being not incompatible with a "mean" warming. In that case one is entitled to dread tragic excess mortalities, just like France experienced some, for instance, during winter 1985 or summer 2003.

**Key words :** Temperature – Mortality – Biometeorology – Meteoropathology – Climatic stress – Demography – Global change – Global warming – France.

### 3. Les données mises en œuvre et la méthodologie utilisée

La série étudiée couvre les cinq années les plus récentes pour lesquelles, à la date de début de la recherche, les données journalières de mortalité étaient intégralement disponibles, en l'occurrence les années 1991-1995. Du point de vue météorologique, le choix opéré comporte à la fois un avantage et un inconvénient. L'avantage réside dans le fait que ces années ont été très représentatives de la fin du XX<sup>ème</sup> siècle, avec des températures moyennes annuelles en hausse sensible sur la "normale" définie conventionnellement comme la période trentenaire 1961-1990 : à l'échelle nationale, l'écart positif se situe pour la moyenne annuelle à 1,2°C. L'inconvénient est que ces mêmes années ont été relativement exemptes de grands – ou, en tout cas, de très grands – paroxysmes thermiques (vagues de froid hivernales, canicules estivales). Cela renforce, certes, la représentativité des données prises en compte, mais exclut malencontreusement les situations extrêmes, que l'on sait être très souvent les plus meurtrières. C'est la raison qui nous a amenés, *in extremis*, à ajouter quelques indications sur l'hiver 1985 et sur l'été 2003 afin de compléter la série, respectivement, du côté des grands froids et du côté des fortes chaleurs.

Par souci de commodité, l'échelle départementale a été retenue, même si des aménagements se sont à plusieurs reprises révélés nécessaires ; on y reviendra.

Une base de données spécifiques a dû être constituée, qui associe deux fichiers :

- Le premier est relatif à la **mortalité journalière**. Les données ont été fournies par le Service Commun n°8 de l'INSERM (SC8, Service d'Information sur les Causes Médicales de Décès)<sup>3</sup>. L'obtention de ces données nécessitait une double autorisation car, bien qu'anonymes, elles sont considérées en France comme "indirectement nominatives" puisque la notification d'un décès tel jour, dans telle classe d'âge et tel département, peut permettre de remonter à l'identité du défunt. Le *Comité consultatif sur le traitement de l'information en matière de recherche dans le domaine de la santé* (Ministère de la Recherche) a donné un avis favorable le 13 juin 2001, après quoi la *Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés* (CNIL) a délivré une autorisation définitive le 30 septembre 2001.
- Le second concerne les **conditions météorologiques journalières**, fournies par les directions régionales de Météo-France.

Les fichiers transmis par l'INSERM n'étant pas directement exploitables dans l'optique retenue, une longue et ingrate phase préliminaire s'est imposée pour la **constitution d'une base de données informatisées sur la mortalité journalière**. À l'échelle départementale, ont été retenues d'une part la totalité des décès, toutes causes confondues, d'autre part une

---

3. Ce service a, depuis lors, été rebaptisé Centre d'Épidémiologie sur les Causes Médicales de Décès (CépiDC).

liste réduite de causes spécifiques, choisies parmi celles qui étaient ressorties d'études antérieures comme étant les plus influencées par les dispositions thermiques. Il s'agit :

- des cardiopathies ischémiques (codes 410 à 414.9 de la 9<sup>ème</sup> révision de la Classification Internationale des Maladies),
- des "autres" cardiopathies (codes 390 à 398, 428.0 et 420 à 425),
- des accidents cérébrovasculaires (430.9-438.9),
- des maladies de l'appareil respiratoire<sup>4</sup> (460-519.9),
- de la grippe (487.0-487.8)
- et des effets directs de la chaleur (hyperthermies et coups de chaleur, 992-992.9).

Chaque décès se trouve dès lors caractérisé par cinq modalités :

- sa date (jour, mois, année),
- sa localisation géographique (département d'enregistrement – autrement dit, de survenue – du décès, et non département de domicile),
- sa cause,
- le sexe
- et le groupe d'âge décennal du défunt.

Les nombres journaliers de décès ont été systématiquement convertis en valeur relative et rapportés à un million d'habitants.

Parallèlement, il a fallu **constituer, au même pas de temps, une base de données sur les conditions météorologiques**. Ont été cette fois inclus les principaux paramètres enregistrés en routine dans les stations du réseau synoptique, à savoir :

- les températures (minimales, maximales et moyennes, en degrés Celsius),
- la vitesse du vent (moyennes trihoraires et maxima instantanés, en mètres par seconde),
- l'humidité relative (minimale et maximale, en pourcentage),
- la température du point de rosée (en degrés Celsius),
- ainsi que la nébulosité (moyenne journalière, en octas – c'est-à-dire en huitièmes de ciel couvert).

Les rares valeurs manquantes (pas plus de 0,1% de l'ensemble) ont été remplacées par interpolation.

La station retenue est en principe celle du chef-lieu du département mais cette règle souffre une trentaine d'exceptions, soit que le chef-lieu ne possède pas de station principale (10 cas), soit que les séries disponibles aient comporté des lacunes trop nombreuses sur les années retenues (5 cas), soit que le site ait été jugé peu représentatif du climat du département (5 cas, notamment dans les régions de relief accidenté), soit encore que se soient additionnés plusieurs des motifs précédents (9 cas). Par ailleurs, il s'est avéré nécessaire de

---

4. La grippe (codes 487.0 à 487.8) a été exclue des maladies de l'appareil respiratoire pour être considérée à part.

procéder à des regroupements en région parisienne. On trouvera sur le tableau I le détail des stations retenues.

**Tableau I. - Stations météorologiques retenues dans chaque département.**

Ain	Ambérieu-en-Bugey	Lozère	Langogne
Aisne	Saint-Quentin	Maine-et-Loire	Angers-Avrillé
Allier	Vichy	Manche	Cherbourg-Chantereyne
Alpes de Haute-Provence	Saint-Auban-sur-Durance	Marne	Reims-Courcy
Hautes-Alpes	Briançon	Haute-Marne	Langres
Alpes-Maritimes	Nice	Mayenne	Laval
Ardèche	Privas	Meurthe-et-Moselle	Nancy-Tomblaine
Ardennes	Charleville	Meuse	Loxéville
Ariège	Saint-Girons-Antichan	Morbihan	Lorient-Lann-Bihoué
Aube	Romilly-sur-Seine	Moselle	Metz-Frescaty
Aude	Carcassonne-Salvaza	Nièvre	Nevers
Aveyron	Millau	Nord	Lille-Lesquin
Bouches-du-Rhône	Marseille-Marignane	Oise	Beauvais-Tillé
Calvados	Caen-Carpiquet	Orne	Alençon-Valfrembert
Cantal	Aurillac	Pas-de-Calais	Le Touquet
Charente	Angoulême-Bel Air	Puy-de-Dôme	Clermont-Ferrand-Aulnat
Charente-Maritime	La Rochelle	Pyrénées-Atlantiques	Pau-Pont-Long
Cher	Bourges	Hautes-Pyrénées	Tarbes-Ossun
Corrèze	Tulle	Pyrénées-Orientales	Perpignan-Ilabanère
Côte-d'Or	Dijon-Longvic	Bas-Rhin	Strasbourg-Entzheim
Côtes-d'Armor	Rostrenen	Haut-Rhin	Mulhouse-Bâle
Creuse	La Courtine	Rhône	Lyon-Bron
Dordogne	Bergerac	Haute-Saône	Luxeuil-les-Bains
Doubs	Besançon	Saône-et-Loire	Chalon-sur-Saône
Drôme	Montélimar-Ancône	Sarthe	Le Mans-Arnage
Eure	Evreux	Savoie	Bourg-Saint-Maurice
Eure-et-Loir	Chartes-Champhol	Haute-Savoie	Chamonix-Mont-Blanc
Finistère	Brest-Guipavas	Paris + Hauts-de-Seine	Paris-Montsouris
Gard	Nîmes-Courbessac	Seine-Maritime	Rouen-Rouvray
Haute-Garonne	Toulouse-Blagnac	Seine-et-Marne	Melun-Villaroche
Gers	Auch	Yvelines	Trappes
Gironde	Bordeaux-Mérignac	Deux-Sèvres	Niort-Comporté
Hérault	Montpellier-Fréjorgues	Somme	Abbeville
Ille-et-Vilaine	Rennes-Saint-Jacques	Tarn	Albi
Indre	Châteauroux	Tarn-et-Garonne	Montauban
Indre-et-Loire	Tours-Saint-Symphorien	Var	Toulon-La Mitre
Isère	Grenoble	Vaucluse	Orange-Caritat
Jura	Lons-le-Saunier	Vendée	Ile d'Yeu-Saint-Sauveur
Landes	Mont-de-Marsan	Vienne	Poitiers-Biard
Loir-et-Cher	Romorantin	Haute-Vienne	Limoges
Loire	Saint-Étienne-Bouthéon	Vosges	Saint-Dié
Haute-Loire	Le Puy-Chadrac	Yonne	Auxerre
Loire-Atlantique	Nantes	Territoire-de-Belfort	Belfort

*La mortalité selon le contexte thermique*

---

Loiret	Orléans	Essonne	Bretigny-sur-Orge
Lot	Gourdon	Seine-Saint-Denis + Val-de-Marne + Val-d'Oise	Orly
Lot-et-Garonne	Agen-Estillac		

Les deux bases de données ont ensuite été agrégées. L'exploitation a porté, pour les points les plus généraux, sur l'ensemble du pays (91 départements ou groupes de départements), mais il est vite apparu que, pour les études les plus approfondies, un choix devait être fait afin de réduire l'ampleur du travail. Il a donc été décidé de s'en tenir à six départements, aussi représentatifs que possible des grands domaines climatiques du territoire français, mais représentatifs aussi de la diversité humaine (donc incluant, pour les uns, de grandes agglomérations urbaines et, pour d'autres, des zones essentiellement rurales). Dicté également par des considérations statistiques (nécessité d'un nombre de décès suffisant, éventuellement après regroupement de deux départements voisins, pour garantir la puissance des tests statistiques), le choix s'est finalement porté, pour éliminer les phénomènes parasites, sur les Alpes Maritimes, les Hautes-Alpes, l'Hérault, la Côte d'Or, la Saône-et-Loire, le Finistère et Paris.

L'essentiel de la recherche a consisté dans le croisement des fichiers "mortalité" et "météorologie", pour tenter de déterminer le type de liaison existant entre ces deux variables, prises l'une comme variable dépendante (la mortalité) et l'autre comme variable explicative (la météorologie). Les calculs ont été effectués d'abord pour l'ensemble de la population, après quoi des subdivisions ont été introduites en fonction de l'âge, du sexe et de la cause du décès. Pour l'âge, la population a été divisée en trois groupes<sup>5</sup> : moins d'un an, entre 1 et 64 ans, enfin au-delà de 64 ans. Ce découpage repose sur la distribution des décès en fonction de l'âge, qui montre un premier pic dans la première année et un second, largement étalé, après 65 ans. Concernant la cause du décès, nous avons choisi d'individualiser les quatre causes mentionnées plus haut, qui étaient ressorties d'études antérieures comme étant les plus influencées par les dispositions thermiques. Rappelons qu'il s'agit des cardiopathies ischémiques, des "autres" cardiopathies, des accidents cérébrovasculaires et des maladies de l'appareil respiratoire, grippe exclue. De même, le fichier "météorologie" a été dans un premier temps limité à sa composante thermique

Ont ainsi été testés :

- l'existence d'une température optimale (ainsi que l'effet du sexe, de l'âge et de la cause de décès sur cette température) ;
- la nature de la relation température-mortalité au-dessous de l'optimum (rôle du froid) ;
- la nature de la relation température-mortalité au-dessus de l'optimum (rôle de la chaleur) ;
- l'impact différentiel du froid et de la chaleur, par sexe et par âge, pour les principales causes de décès ;
- l'impact différentiel des maxima et des minima (par rapport à la température moyenne) ;
- et le décalage chronologique susceptible d'exister entre un phénomène thermique et son impact sur la mortalité.

---

5. Un plus grand nombre de classes aurait diminué à l'excès les effectifs de certaines d'entre elles et fait courir le risque d'accorder un pouvoir discriminant à de banales fluctuations d'échantillonnage.

Comme les graphiques reliant *directement* la mortalité à la température moyenne journalière n'ont pas mis en évidence de réelle tendance, ainsi qu'on peut le vérifier sur l'exemple de la Côte d'Or (fig. 1), il s'est rapidement confirmé que le taux de mortalité n'avait qu'une probabilité infime de varier pour des différences thermiques de l'ordre du dixième de degré. C'est pour cette raison, mais aussi pour diminuer l'aléa statistique et éviter que les résultats ne soient trop influencés par les fluctuations d'échantillonnage, que le spectre thermique n'a pas été considéré comme continu, mais discrétisé – c'est-à-dire **découpé en "bandes" successives de 3°C**. Ainsi se trouve réalisé une sorte de lissage, qui met en évidence des tendances beaucoup plus nettes et la mortalité journalière moyenne a été calculée à l'intérieur de chacune de ces bandes<sup>6</sup>.

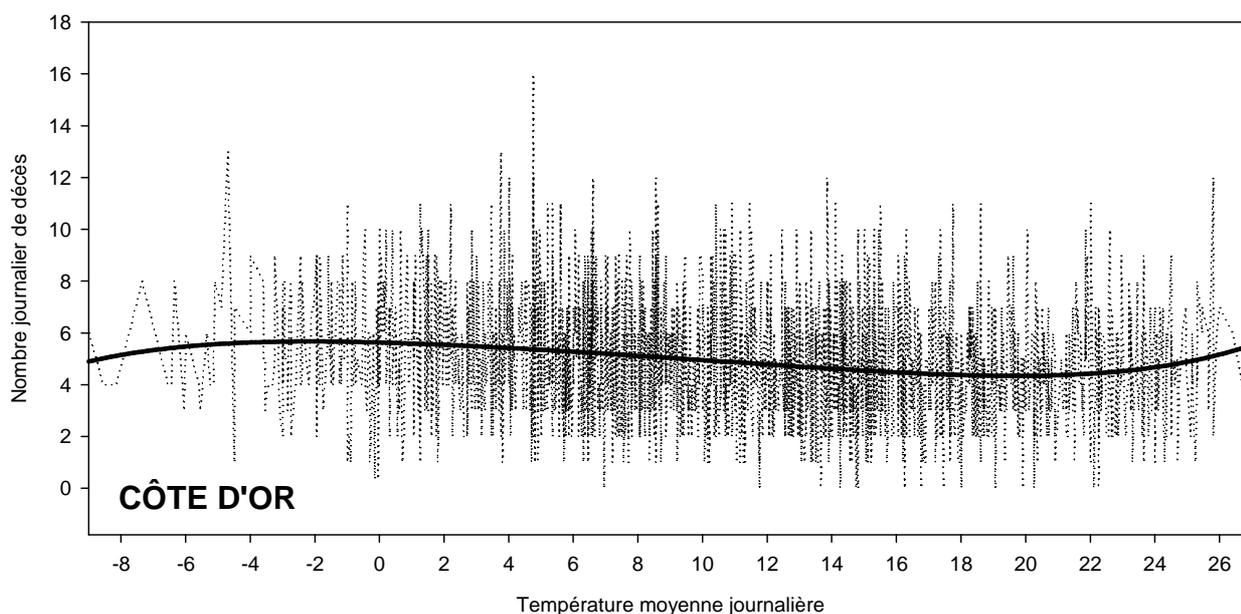


Figure 1. - **Relation température-mortalité au pas de temps journalier :**  
exemple du département de la Côte d'Or.

Un **optimum** a ensuite pu être défini comme l'intervalle de 3°C à l'intérieur duquel la mortalité journalière atteignait sa valeur minimale. Cet intervalle a été à chaque fois déterminé avec la plus extrême précision, en l'occurrence à 0,1°C près, ce qui n'a pu se faire que par tâtonnements successifs.

Une fois la base de données intégralement analysée statistiquement, le modèle "actuel" liant la température à la mortalité a été **projeté dans le futur**, en s'appuyant sur les scénarios d'évolution des températures élaborés par les climatologues de l'Université de Paris VI, par Météo-France et par l'*Intergovernmental Panel on Climatic Change / General Circulation Models* (IPCC/GCM). On s'est ainsi attaché à ne pas tenir compte uniquement

6. Dans le cas où une valeur de la courbe, à l'une des deux extrémités, s'écartait fortement de la tendance et ne correspondait qu'à une seule journée, elle a été écartée de l'analyse, pour éviter qu'un phénomène isolé ne pèse d'un poids trop lourd et n'en vienne ainsi à fausser la détermination de l'optimum.

des projections des températures moyennes (ampleur de la dénivellation thermique), mais aussi de celle des paroxysmes (nombre de jours de grand froid et de grandes chaleurs) – sans oublier qu'un écart, même minime, d'une valeur moyenne peut entraîner un accroissement disproportionné de la fréquence des valeurs extrêmes.

Les projections démographiques, quant à elles, ont été reprises des travaux de l'INSEE.

L'ensemble des traitements statistiques a été réalisé sur le matériel informatique du Laboratoire Climat et Santé (quatre micro-ordinateurs PC, équipés de Pentium® III ou IV, fonctionnant sous Windows XP® pour trois d'entre eux et sous Windows 98® pour le quatrième). Outre Word® et Excel®, les logiciels utilisés ont été Statbox 2.5®, Statistica 5.5VF®, Sigma-Stat 3.0® et Sigma-Plot 8.0®.

## 4. Les résultats

### A. La réalité et la nature d'une dépendance entre température et mortalité

Dans un premier temps a été évaluée la part de variation interjournalière de la mortalité dont pouvaient rendre compte les dispositions thermiques. À l'échelle de la France entière, et sur les cinq années retenues, cette part s'établit pour la température moyenne à 31,8%, taux extrêmement proche de celui obtenu par exemple par A.E. Kunst *et al.* (1994) aux Pays-Bas (32,0%). Les différences d'un département à l'autre restent par ailleurs modestes, puisque les extrêmes sont respectivement de 30,9% (Paris) et 33,4% (Hautes-Alpes).

Ces résultats étaient relativement attendus. En revanche, deux questions annexes méritaient d'être examinées avec soin :

- 1) La première concerne l'influence respective de différentes températures (minimales, maximales et moyennes). D'une façon générale, la mortalité quotidienne est ressortie comme étant plus étroitement corrélée à la température moyenne des vingt-quatre heures qu'elle ne l'était à la température minimale (en principe enregistrée en fin de nuit) ou *a fortiori* à la température maximale (presque toujours relevée en début ou en milieu d'après-midi). Un coup de froid passager au lever du soleil et une pointe de chaleur aux heures cardinales ne représentent donc pas des menaces aussi fortes qu'une température se maintenant à un niveau extrême sur une fraction importante du nycthémère. On ne retrouve pas là la situation néerlandaise, où A.E. Kunst *et al.* (1994) ont mis en évidence une influence un peu plus forte des températures diurnes (32,8% de variance expliquée, contre 29,0% pour les températures nocturnes, et 32% – on l'a déjà noté – pour les températures moyennes).
- 2) L'autre question est relative au décalage chronologique introduit entre les dispositions thermiques prises comme variables explicatives et la mortalité prise comme variable dépendante. Il se confirme alors que, même si l'écart demeure faible, ce sont les données synchrones qui se révèlent les plus explicatives. Un décalage d'une journée réduit très légèrement la part de variance expliquée (31,5 contre 31,8% pour la température moyenne) ; un décalage de deux jours détériore plus fortement l'intensité de la relation étudiée, en faisant tomber à 27,9% le pouvoir explicatif de la température, qui s'effondre ensuite peu à peu à mesure que le décalage augmente. À première vue, il y a là une différence majeure avec les conclusions des études antérieures, au demeurant peu nombreuses à avoir abordé le sujet (M. Boyd, 1960 ; G.M. Bull et J. Morton, 1975 ; A.E. Kunst *et al.*, 1993 ; A.A. Donaldson et W.R. Keatinge, 1997). Mais il faut préciser que ces travaux étaient beaucoup plus partiels que le nôtre, puisqu'ils se limitaient presque toujours à un très petit nombre de causes de décès (parfois une seule, l'infarctus du myocarde) : cela peut suffire à justifier des résultats différents.

La démonstration a ensuite été faite que la relation entre la température moyenne journalière et la mortalité, toutes classes d'âge et toutes causes de décès confondues, présentait une **allure générale parabolique** (fig. 2) et qu'il était possible d'individualiser partout en France un **optimum thermique** pour lequel, toutes choses égales par ailleurs, le nombre journalier de décès se maintient à son niveau le plus bas. Quel que soit le département considéré, les valeurs les plus élevées de la mortalité coïncident avec les températures les plus basses (-12 à -9°C), puis la courbe de la mortalité descend irrégulièrement à mesure que la température augmente, avant que la tendance ne s'inverse en direction d'un maximum secondaire correspondant aux températures les plus élevées (Tabl. II). D'où, très grossièrement, une courbe en forme de U ou de V, plus ou moins régulière et plus ou moins dissymétrique, la pente descendante (du côté du froid) étant toujours plus longue, mais aussi plus douce, que la pente ascendante (courte mais particulièrement raide, du côté de la chaleur).

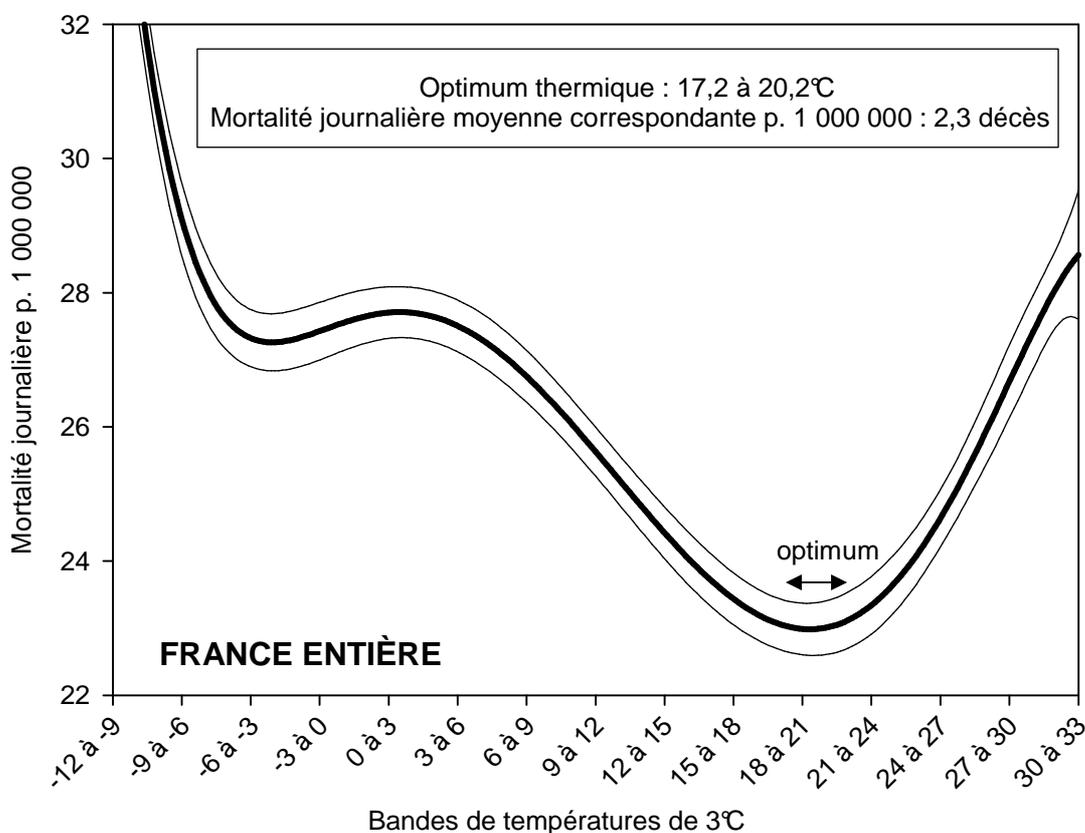


Figure 2. - **Relation température-mortalité en France au pas de temps journalier** (courbe en trait gras et intervalle de confiance à 95%).

L'existence d'une telle courbe en "U" ou en "V" a déjà été mise en évidence dans d'autres pays européens (A.E. Kunst *et al.*, 1993 ; W.R. Keatinge *et al.*, 1997, 2000 ; M. Beniston, 2002 ; V.M.R. Muggeo et M.A. Vigotti, 2002...), ainsi que sur une partie du territoire des États-Unis (F.C. Curriero *et al.*, 2002).

Tableau II. - **Mortalité moyenne pour les deux extrêmes de température, tous âges confondus, dans quelques départements représentatifs.**

Pic principal du côté du froid, pic secondaire du côté de la chaleur.

Département	Intervalle de 3°C correspondant au pic principal de mortalité	Importance relative du pic principal par rapport au pic secondaire de mortalité	Intervalle de 3°C correspondant au pic secondaire de mortalité
Hautes-Alpes	-9 à -6°C	+ 43%	23 à 26°C
Côte d'Or	-9 à -6°C	+ 9%	24 à 27°C
Paris	-9 à -6°C	+ 20%	27 à 30°C
Finistère	-5 à -2°C	+ 17%	21 à 24°C
Hérault	-2 à 1°C	+ 12%	27 à 30°C
Alpes-Maritimes	2 à 5°C	+ 10%	25 à 28°C

Le pic principal constaté par grand froid est un phénomène bien connu depuis plus de vingt ans (G.M. Bull et J. Morton, 1975, 1978 ; M.R. Alderson, 1985) et, contrairement à ce que l'on avait d'abord imaginé, les épidémies de grippe ne jouant presque toujours qu'un rôle négligeable sur la surmortalité constatée dans un tel contexte thermique (A.E. Kunst *et al.*, 1993). Le fait est que, s'ils sont bien concentrés sur la saison hivernale, les décès par grippe se produisent plutôt en présence de températures modérément basses, souvent après un redoux, mais presque jamais (moins de 2,5% des cas pour la France entière) en présence des minima absolus de température.

Une attention spéciale a été accordée à l'optimum, défini comme l'intervalle de 3°C, déterminé à chaque fois à 0,1°C près, à l'intérieur duquel la mortalité journalière passe par sa valeur la plus basse. Pour la France métropolitaine prise dans son ensemble, cet intervalle s'inscrit entre 17,2 et 20,2°C, les bornes ayant un écart-type de 1,6°C. Les calculs, répétés ensuite pour chaque département, ont mis en évidence (tabl. III) une certaine homogénéité sur le territoire national, où les plages extrêmes s'établissent respectivement à 14,2-17,2°C dans les Deux-Sèvres et à 21,1-24,1°C dans l e Var. Homogénéité toute relative, néanmoins, puisque l'écart entre ces deux départements approche les 7°C. Mais la moitié des départements s'inscrivent dans un intervalle compris entre 16,1-19,1°C (quartile inférieur) et 18,3-20,3°C (quartile supérieur).

De surcroît, les valeurs obtenues ne sont pas distribuées au hasard, étant donné que les départements voisins présentent presque toujours des chiffres très proches. L'ordonnement régional qui se dégage ainsi permet d'opposer :

- une *France de l'Ouest et du Nord-Ouest*, où l'optimum thermique se situe au niveau le plus bas – et à un niveau parfois inférieur à ce que l'on attendait : l'optimum calculé pour le département des Deux-Sèvres est exactement celui qu'une étude antérieure (W.R. Keatinge *et al.*, 2000) avait obtenu dans les provinces de Kuopio, Vaasa et Oulu, au nord de la Finlande, où sévit un climat typiquement polaire ;
- une *France du Sud* (Midi méditerranéen et Midi aquitain) où l'optimum est au contraire élevé – très nettement supérieur aux valeurs que le groupe Eurosummer a déterminées

Tableau III. - Intervalle de 3°C de la température moyenne journalière où la mortalité journalière est la plus basse, tous âges confondus, dans les différents départements français.

Département	Intervalle de 3°C où la mortalité est la plus basse	Département	Intervalle de 3°C où la mortalité est la plus basse
Ain	16,8-19,8	Lozère	17,5-20,5
Aisne	16,2-19,2	Maine-et-Loire	18,1-21,1
Allier	17,0-20,0	Manche	15,2-18,2
Alpes de Haute-Provence	18,2-21,2	Marne	17,0-20,0
Hautes-Alpes	14,8-17,8	Haute-Marne	16,4-19,4
Alpes-Maritimes	17,5-20,5	Mayenne	15,3-18,3
Ardèche	18,4-21,4	Meurthe-et-Moselle	17,8-20,8
Ardennes	15,4-18,4	Meuse	16,7-19,7
Ariège	14,9-17,9	Morbihan	15,5-18,5
Aube	17,3-20,3	Moselle	17,8-20,8
Aude	19,0-22,0	Nièvre	18,0-21,0
Aveyron	18,5-21,5	Nord	16,5-19,5
Bouches-du-Rhône	20,7-23,7	Oise	16,1-19,1
Calvados	16,6-19,6	Orne	16,5-19,5
Cantal	15,3-18,3	Pas-de-Calais	15,7-18,7
Charente	15,4-18,4	Puy-de-Dôme	16,5-19,5
Charente-Maritime	15,9-18,9	Pyrénées-Atlantiques	17,4-20,4
Cher	16,1-19,1	Hautes-Pyrénées	15,3-18,3
Corrèze	17,4-20,4	Pyrénées-Orientales	18,6-21,6
Côte-d'Or	16,7-19,7	Bas-Rhin	19,0-22,0
Côtes-d'Armor	15,5-18,5	Haut-Rhin	17,9-20,9
Creuse	15,2-18,2	Rhône	18,5-21,5
Dordogne	16,6-19,6	Haute-Saône	15,7-18,7
Doubs	16,3-19,3	Saône-et-Loire	17,7-20,7
Drôme	19,2-22,2	Sarthe	16,7-19,7
Eure	17,7-20,7	Savoie	16,5-19,5
Eure-et-Loir	16,8-19,8	Haute-Savoie	16,0-19,0
Finistère	16,5-19,5	Paris + Hauts-de-Seine	20,6-23,6
Gard	20,7-23,7	Seine-Maritime	15,0-18,0
Haute-Garonne	20,0-23,0	Seine-et-Marne	16,4-19,4
Gers	18,4-21,4	Yvelines	15,9-18,9
Gironde	19,5-22,5	Deux-Sèvres	14,2-17,2
Hérault	20,3-23,3	Somme	16,3-19,3
Ille-et-Vilaine	17,4-20,4	Tarn	16,6-19,6
Indre	16,8-19,8	Tarn-et-Garonne	17,1-20,1
Indre-et-Loire	15,6-18,6	Var	21,1-24,1
Isère	16,3-19,3	Vaucluse	20,2-23,2
Jura	15,7-18,7	Vendée	18,4-21,4
Landes	19,4-22,4	Vienne	15,6-18,6
Loir-et-Cher	19,4-22,4	Haute-Vienne	16,5-19,5
Loire	20,2-23,2	Vosges	15,7-18,7
Haute-Loire	19,1-22,1	Yonne	16,2-19,2
Loire-Atlantique	17,0-20,0	Territoire-de-Belfort	16,1-19,1
Loiret	16,4-19,4	Essonne	17,4-20,4
Lot	15,6-18,6	Seine-Saint-Denis + Val-de-Marne + Val-d'Oise	17,3-20,3
Lot-et-Garonne	17,4-20,4		

nées selon la même méthode dans le nord de l'Italie, et à peine inférieur de 1,6°C au chiffre d'Athènes (W.R. Keatinge *et al.*, 2000) ; le fait que l'optimum soit plus élevé en climat chaud qu'en climat frais suggère que les populations se sont adaptées avec succès à ce paramètre météorologique – et il y a là un constat essentiel pour la suite de notre réflexion ;

- enfin, une *France plus continentale* (Est et Centre), caractérisée par des valeurs intermédiaires, quoique présentant parfois une assez forte variabilité sur de courtes distances.

Il semble donc bien, d'une part, que les effets de la température varient avec le climat auquel l'individu est adapté, d'autre part que l'optimum thermique est sensiblement plus élevé dans les régions chaudes, ce qui est en bon accord avec les conclusions des rares études qui se sont penchées sur la question (M. Saez *et al.*, 1995 ; A.L. Braga *et al.*, 2001 ; F.C. Curriero *et al.*, 2002).

Les exceptions sont relativement peu nombreuses, mais n'en méritent pas moins d'être examinées avec soin, au moins pour les deux principales.

- La première concerne les Alpes-Maritimes, où l'optimum se place relativement bas pour un climat méditerranéen (17,5-20,5, soit un niveau très proche, par exemple, à celui de l'Essonne et intermédiaire entre ceux de l'Aube et de la Meurthe-et-Moselle). L'explication est-elle à rechercher dans le caractère montagneux d'une partie de ce département ? Pourtant, l'essentiel de la population se concentre sur le littoral, qui devrait ainsi peser d'un poids prépondérant. En l'état actuel des choses, il paraît difficile de trancher et, en tout cas, on comprend mal le contraste avec le Var voisin, qui a l'optimum thermique le plus élevé.
- L'autre exception, nettement plus marquée encore, provient de Paris (fig. 3), avec un optimum à un niveau particulièrement élevé (20,6-23,6°C), à peu près équivalent à ceux des Bouches-du-Rhône et du Gard, qui place la capitale au deuxième rang de tous les départements français. L'écart apparaît ainsi considérable entre Paris-centre (auquel on a ici ajouté les Hauts-de-Seine) et le reste de la région Île-de-France (optima compris entre 17,3 et 20,3°C en Seine-Saint-Denis, dans le Val-de-Marne et le Val-d'Oise, entre 17,4 et 20,4°C dans l'Essonne, donc conformes à la latitude d'implantation). L'hypothèse d'un effet urbain (R.W. Buechley *et al.*, 1972) paraît d'autant plus plausible que l'enquête Eurosummer avait, elle aussi, constaté une position particulièrement élevée de l'optimum à Londres (W.R. Keatinge *et al.*, 2000), même si aucune autre valeur n'avait été fournie pour le reste du territoire britannique. On retrouvera d'ailleurs sur plusieurs autres points le comportement singulier de Paris.

Une telle étude régionale n'avait encore, à notre connaissance, été tentée pour aucun pays.

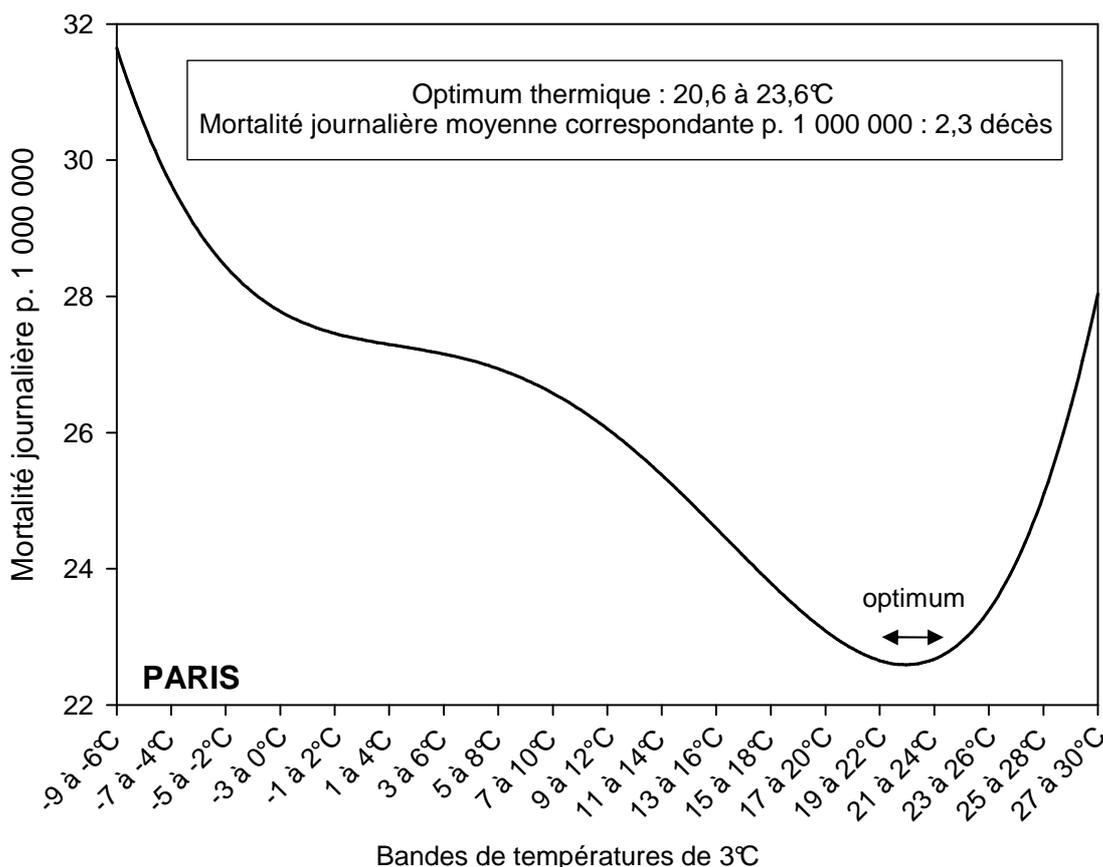


Figure 3. - Relation température-mortalité à Paris, au pas de temps journalier.

Après cet examen détaillé de la période 1991-1995, il a été jugé nécessaire de compléter l'analyse, aux deux extrémités de la série thermométrique, par la prise en compte d'une forte vague de froid hivernale et d'une grande vague de chaleur estivale. Les mois de janvier-février 1985 (P. Escourrou, 1987) et d'août 2003 (L. Abenhaïm, 2003 ; J.P. Besancenot, 2003 ; G. Brücker, 2003 ; D. Hémon et E. Jouglu, 2003 ; D. Hémon *et al.*, 2003 ; InVS, 2003) ont ainsi été ajoutés à notre base de données. Ils ne remettent aucunement en cause les conclusions précédentes, mais renforcent sensiblement (+1,9%) le pouvoir explicatif des dispositions thermiques – ce qui est assez remarquable alors que la série a seulement été allongée de 5%. Surtout, cet ajout permet de voir comment évolue la relation entre température et mortalité en présence des plus grands paroxysmes météorologiques. Pour la France entière (fig. 4), il apparaît alors que la pente est particulièrement forte du côté des grandes chaleurs, et que la mortalité atteint alors des valeurs nettement plus élevées que ce n'est le cas en présence de grands froids (écart de 4,8 décès journaliers p. 1 000 000 entre les deux intervalles extrêmes). Si l'on peut parler d'un simple prolongement de la tendance en cas de vague de froid, une brutale inflexion avec forte accentuation de la pente est perceptible lors des périodes caniculaires. Les départements pris séparément donnent exactement les mêmes indications.

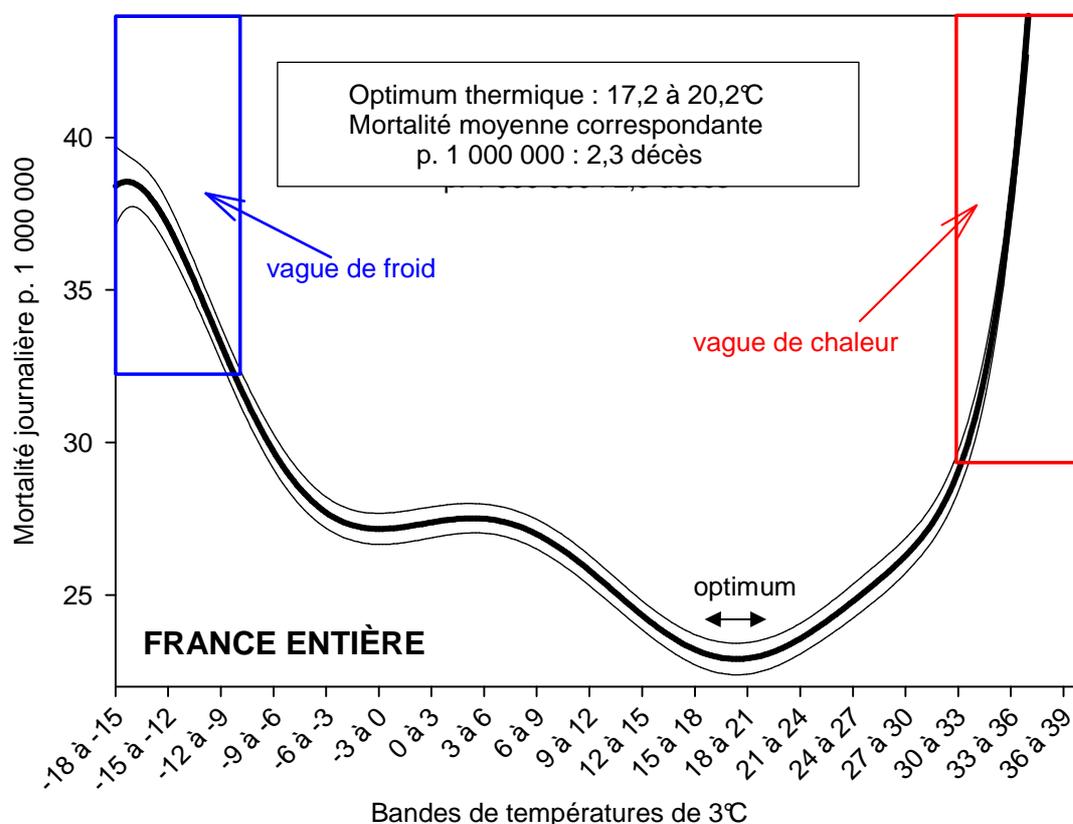


Figure 4. - Relation température-mortalité en France au pas de temps journalier, en ajoutant à la série 1991-1995 deux grands paroxysmes météorologiques (vague de froid de l'hiver 1985, vague de chaleur de l'été 2003).

Courbe en trait gras et intervalle de confiance à 95%.

## B. La dépendance entre température et mortalité n'est pas uniforme

La relation température-mortalité et le niveau de l'optimum thermique ont été différenciés, successivement, en fonction de l'âge, du sexe, et de la cause de décès, l'accent étant toujours mis sur la recherche d'éventuelles disparités d'une région à l'autre.

### 1. Selon l'âge

Si l'on individualise trois tranches d'âge (moins de 1 an, de 1 à 64 ans et plus de 64 ans), on constate que c'est au-delà de 64 ans que la courbe de mortalité en fonction de la température s'avère la plus caractéristique. Ceci est illustré ici par l'exemple de Paris (fig. 5), mais pourrait être décrit en des termes presque identiques dans la quasi-totalité des départements. Les courbes de mortalité des deux classes d'âge les plus basses présentent une irrégularité nettement plus marquée, au point que l'optimum y est parfois difficile, voire impossi-

ble à identifier. Tout au plus est-il permis de noter que, chez les enfants de moins d'un an, ce sont en général les très basses températures qui se révèlent les plus meurtrières, alors qu'entre 1 et 64 ans c'est plutôt aux températures les plus élevées que sont associés les plus forts taux de mortalité, même s'il y a des exceptions. Enfin, au-dessus de 64 ans, la courbe se moule littéralement sur celle de la population générale et les pics (principaux aussi bien que secondaires) de mortalité deviennent extrêmement bien marqués. On rejoint par là des constatations qui avaient déjà faites, mais le plus souvent sur des effectifs trop restreints pour permettre de conclure, par G.M. Bull et J. Morton (1975, 1978), par K.J. Collins (1987) ou, plus récemment, par J. Diaz *et al.* (2002).

Le niveau de l'optimum, sur l'échelle thermométrique, découle directement de ce qui précède. C'est au-delà de 64 ans qu'il est le plus facile à identifier, et cette règle ne souffre pas une seule exception. Cet optimum est alors, le plus souvent très proche de celui reconnu dans la population générale. Il se confond même parfois avec lui. Les trois exemples des Hautes-Alpes, des Alpes-Maritimes et de la Côte-d'Or (tabl. IV) permettront de vérifier cette assertion. Mais il arrive aussi (en gros, une fois sur quatre) que l'optimum des plus de 64 ans soit supérieur à celui de la population tous âges confondus. L'écart s'échelonne alors de 1,3 à 2,6°C, si l'on prend comme illustrations les cas du Finistère, de l'Hérault et de Paris.

Tableau IV. - Optimum thermique par classes d'âge dans quelques départements représentatifs.

Département	Optimum thermique en °C chez les moins de 1 an	Optimum thermique en °C chez les 1-64 ans	Optimum thermique en °C chez les plus de 64 ans
Finistère	indéterminable	indéterminable	14,7-17,7
Hautes-Alpes	indéterminable	indéterminable	14,8-17,8
Côte-d'Or	indéterminable	indéterminable	16,9-19,9
Alpes-Maritimes	13-16 (peu marqué)	15-18	17,5-20,5
Paris	21-24	21-24	18,2-21,2
Hérault	indéterminable	dédoublé (4-7 et 14-17)	19,0-22,0

Il est souvent plus délicat, et parfois même impossible, de mettre en évidence un optimum pour les deux autres tranches d'âge. C'est une nouvelle fois à Paris (fig. 5) que le schéma est le plus net, à la fois au-dessous d'un an et entre 1 et 64 ans : l'optimum se situe dans les deux cas entre 21 et 24°C. On en déduit qu'en, dans la capitale, l'optimum des plus de 64 ans est inférieur de 3°C à celui des tranches d'âge plus jeunes, ce que l'on peut interpréter comme l'indice d'une moindre capacité d'adaptation à la chaleur. Dans les Alpes-Maritimes, un optimum peut également être identifié pour les moins de 1 an et les 1 à 64 ans, mais il est paradoxalement inférieur à celui des plus de 64 ans. Encore cet optimum est-il peu marqué, surtout dans la première année de l'existence où, après un pic de mortalité assez saillant correspondant aux températures les plus basses, la courbe redescend brusquement pour rester assez proche de l'horizontale entre 7 et 28°C, avec de faibles fluctuations. Entre 1 et 64 ans, la courbe présente une allure très irrégulière, en dents de scie, avec malgré tout un pic assez net du côté des plus fortes chaleurs. Dans l'Hérault, il n'a pas été possible de déterminer d'optimum au-dessous d'un an, la courbe se montrant alors très irrégulière. Entre 1 et 64 ans, on a affaire à un régime dédoublé, avec deux creux de mortalité, respectivement entre 4 et 7°C et entre 14 et 17°C. Il n'en reste pas moins que, par-delà ces fluctuations de détail, qui ont tendance à s'amplifier à mesure que l'on travaille sur de



plus faibles effectifs, la courbe montre surtout un fort pic de mortalité aux températures les plus basses (-2 à 1°C), une diminution assez franche de la mortalité journalière entre 2 et 20°C, puis une remontée très marquée avec un pic en core plus élevé que le premier en présence des plus fortes chaleurs (26 à 29°C). Seuls, dans ce cas, les plus de 64 ans permettent d'identifier un véritable optimum, qui se situe entre 19 et 22°C. Dans les autres départements, il est fréquent que l'optimum soit, sinon inexistant, du moins peu marqué au-dessous d'un an, ainsi que dans la tranche 1-64 ans, seuls les personnes âgées (65 ans et plus) étant concernés par un optimum véritable. Celui-ci se place à un niveau particulièrement bas dans le Finistère (14,7-17,7°C) et les dans Hautes-Alpes (14,8-17,8°C) ; il est un peu plus élevé en Côte-d'Or et dans les Alpes-Maritimes, nettement plus à Paris et dans l'Hérault.

Les vagues de froid n'alterent en rien ce dispositif, avec simple prolongation des tendances constatées en présence de froids moins extrêmes, ce qui peut être rapporté à un accroissement de l'hémoconcentration et à un renforcement du paramètre fibrinolytique t-PA, l'exposition au froid donnant naissance à une légère réaction inflammatoire et à une tendance à un état accru d'hypercoagulabilité (L. Bokenes *et al.*, 2000). À l'inverse, les vagues de chaleur amplifient très nettement la surmortalité du troisième âge, ce que l'on savait au demeurant depuis longtemps (W.B. Applegate *et al.*, 1981 ; J.P. Besancenot, 1990a, 1990b, 1992, 1995, 1997, 2002 ; P. Escourrou, 1978 ; S.M. Macey et D.F. Schneider, 1993 ; P. Michelozzi *et al.*, 2000 ; H. Tillaut H. *et al.*, 2003 ; X. Thirion, 1992), mais qui se trouve bien vérifié ici. Enfin, que l'optimum thermique soit plus bas chez les personnes âgées est consistant avec les recherches antérieures qui ont souligné leur incapacité à accroître suffisamment leur débit cardiaque, et aussi parce que nombre d'entre elles prennent des médicaments susceptibles de renforcer le risque d'hyperthermie et/ou de déshydratation (L.S. Kalkstein et R.E. Davis, 1989).

## *2. Selon le sexe*

L'allure générale de la courbe de mortalité en fonction de la température est en règle générale assez différente d'un sexe à l'autre, la différence n'étant toutefois statistiquement significative ( $p < 0,03$ ) qu'au-delà de 64 ans. Et il convient sur ce point, plus encore que sur d'autres, d'opposer vigoureusement la capitale au reste du territoire national.

À Paris (fig. 6), l'optimum thermique se révèle sensiblement plus bas pour les hommes (20,6-23,6°C au lieu de 23,0-26,0°C), et cela tout spécialement au-delà de 64 ans où l'écart atteint 6,2°C (16,4-19,4°C, contre 22,8-25,8°C). Pour le sexe féminin, quel que soit l'âge, il se situe entre 23 et 26°C, ou très légèrement au-dessous de cet intervalle après 64 ans (22,8-25,8°C). De plus, dans la capitale, l'allure générale de la courbe diffère profondément selon le sexe. Chez les hommes, deux pics de mortalité peuvent être distingués, qui correspondent aux deux extrêmes thermiques (31,2 vs 33,9 décès/jour/1 000 000), l'optimum se situant dans un creux bien marqué de la courbe, au-delà duquel la mortalité grimpe en flèche, brusquement et rapidement. Chez les femmes, en revanche, la mortalité reste nettement plus basse lors des plus fortes chaleurs (pas plus de 24,9 décès/jour/1 000 000) qu'elle ne l'est par grand froid (33,0 décès/jour/1 000 000), la pente de la partie ascendante de la courbe, au-delà de l'optimum, étant beaucoup moins raide.

Sur le reste de la France, et par-delà des différences non négligeables d'un département à l'autre, le dispositif apparaît exactement inversé, avec un optimum thermique féminin systématiquement plus bas que l'optimum thermique masculin, tout spécialement au-delà de 64 ans. Les Alpes-Maritimes illustrent bien le phénomène. Le fait qu'à âge identique, la chaleur fasse davantage de victimes chez les femmes que chez les hommes résulte sans aucun doute d'une occurrence plus élevée de troubles de la thermorégulation, et en particulier de la sudation (H. Kaciuba-Uscilko et R. Grucza, 2001 d'un point de vue général ; C. Rooney *et al.*, 1998 à propos de l'Angleterre et du Pays de Galles ; J. Díaz *et al.*, 2002, en Espagne).

Il a en outre été constaté que la différence entre les deux sexes était plus marquée dans les départements où l'optimum thermique est le plus élevé, comme le Var, l'Hérault, les Bouches-du-Rhône ou la Loire.

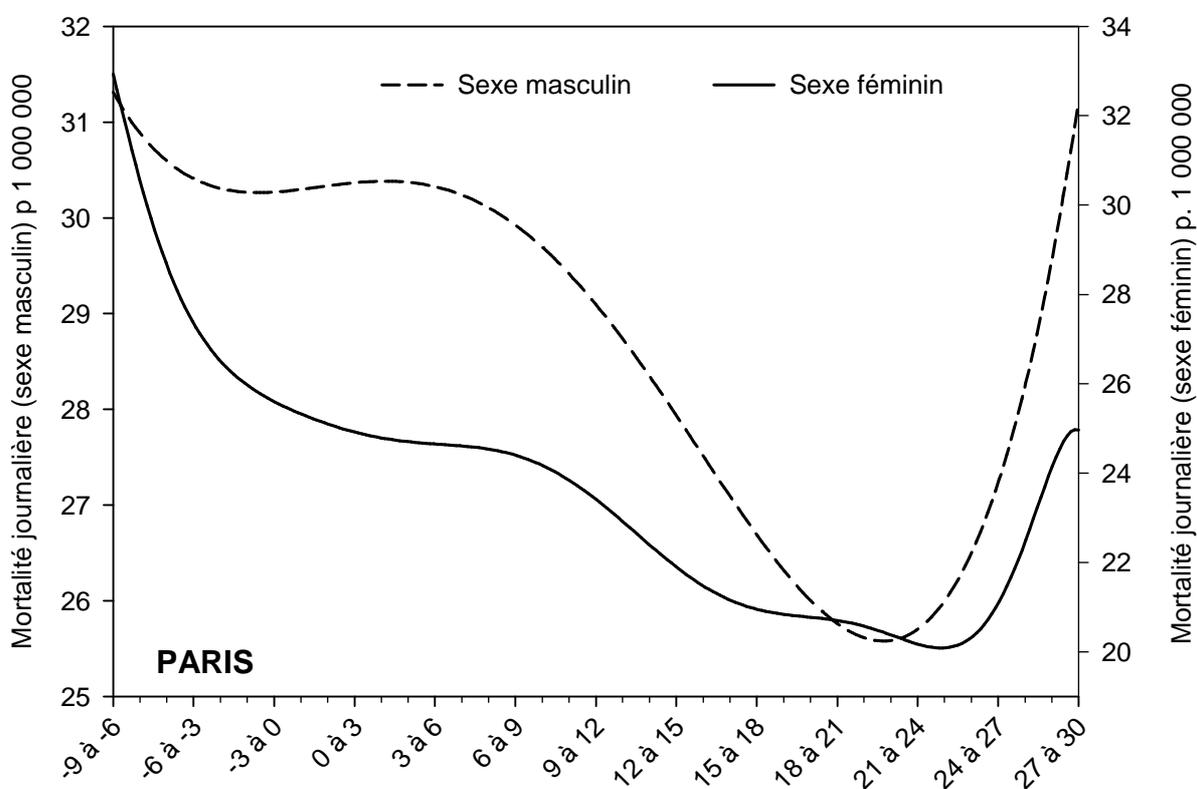


Figure 6. - Relation température-mortalité, au pas de temps journalier, selon le sexe : le cas de Paris.

### 3. Selon la cause de décès

On notera d'abord que, pour certaines causes de décès, la relation avec les dispositions thermiques est nulle ou quasi nulle, seules les très hautes températures étant éven-

tuellement susceptibles d'occasionner une discrète surmortalité. L'exemple-type est celui des cancers, que l'on peut illustrer (fig. 7) à travers l'exemple de l'Hérault. Indirectement, un tel constat valide les résultats obtenus pour d'autres pathologies, reconnues comme thermo-sensibles.

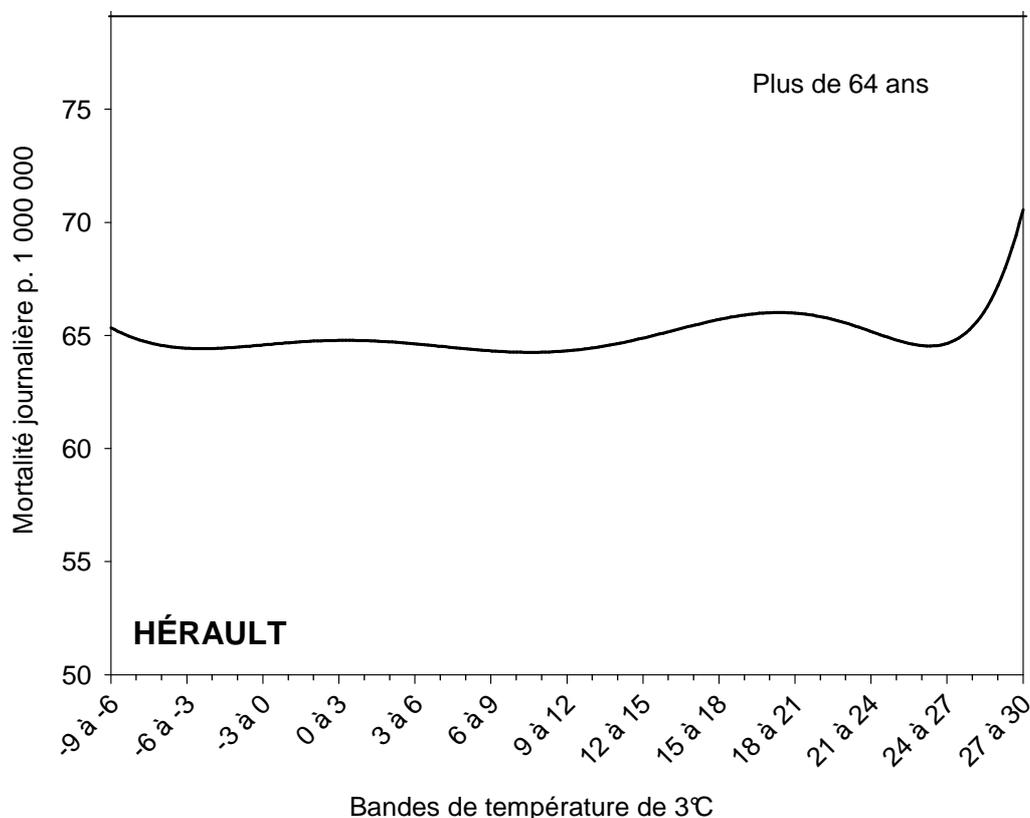


Figure 7. - Relation température-mortalité, au pas de temps journalier, pour les cancers au-delà de 64 ans : le cas de l'Hérault.

Les causes de décès que l'on a spécialement individualisées ici sont les cardiopathies ischémiques, les maladies cérébrovasculaires, les autres maladies de l'appareil circulatoire et les maladies de l'appareil respiratoire à l'exception de la grippe. Pour ces quatre catégories, l'optimum thermique féminin est toujours plus bas que celui des hommes, en particulier au-delà de 64 ans, contrairement à ce que l'on avait trouvé en prenant en compte indistinctement toutes les causes de décès.

#### a) Les cardiopathies ischémiques

Les cardiopathies ischémiques (infarctus du myocarde, pour l'essentiel) sont de très loin la cause de décès qui a été la plus étudiée sous l'angle de ses relations avec le contexte météorologique en général, et avec la température en particulier (T.W. Alderson et W.H. Le Riche, 1970 ; D. Bainton *et al.*, 1977 ; E. Choissel *et al.*, 1987 ; M.G. Dunningan *et al.*, 1970 ; Eurowinter Group, 1997 ; M.S. Green *et al.*, 1994 ; K.T. Khaw, 1995 ; W.H. Pan *et al.*, 1995 ; E. Rogot, 1994 ; C. Royer, 2003 ; I. Vuori, 1987 ; R.R. West et C.R. Lowe, 1976...).

En France (fig. 8), dans la population générale, la courbe d'évolution de la mortalité par cardiopathies ischémiques montre une décroissance régulière et assez lente depuis les basses températures jusqu'à un optimum qui, s'il est légèrement plus marqué entre 23,5 et 26,5°C (mortalité correspondante : 1,3 décès p. 1 000 000 et par jour), est en fait assez large et se situe entre les bandes 19,4-22,4 et 23,5-26,5°C avec en moyenne 1,7 décès p. 1 000 000 et par jour. La courbe augmente ensuite faiblement vers les températures élevées où la mortalité reste inférieure (3,0 décès/jour p. 1 000 000) à celle des basses températures (jusqu'à 7,4 décès/jour p. 1 000 000). Le constat est sensiblement le même pour les plus de 64 ans avec les mêmes valeurs d'optimum thermique, la mortalité minimale étant de 8,8 morts/jour p. 1 000 000 entre 23,5 et 26,5°C et de 9,6 entre 19,4 et 26,5°C.

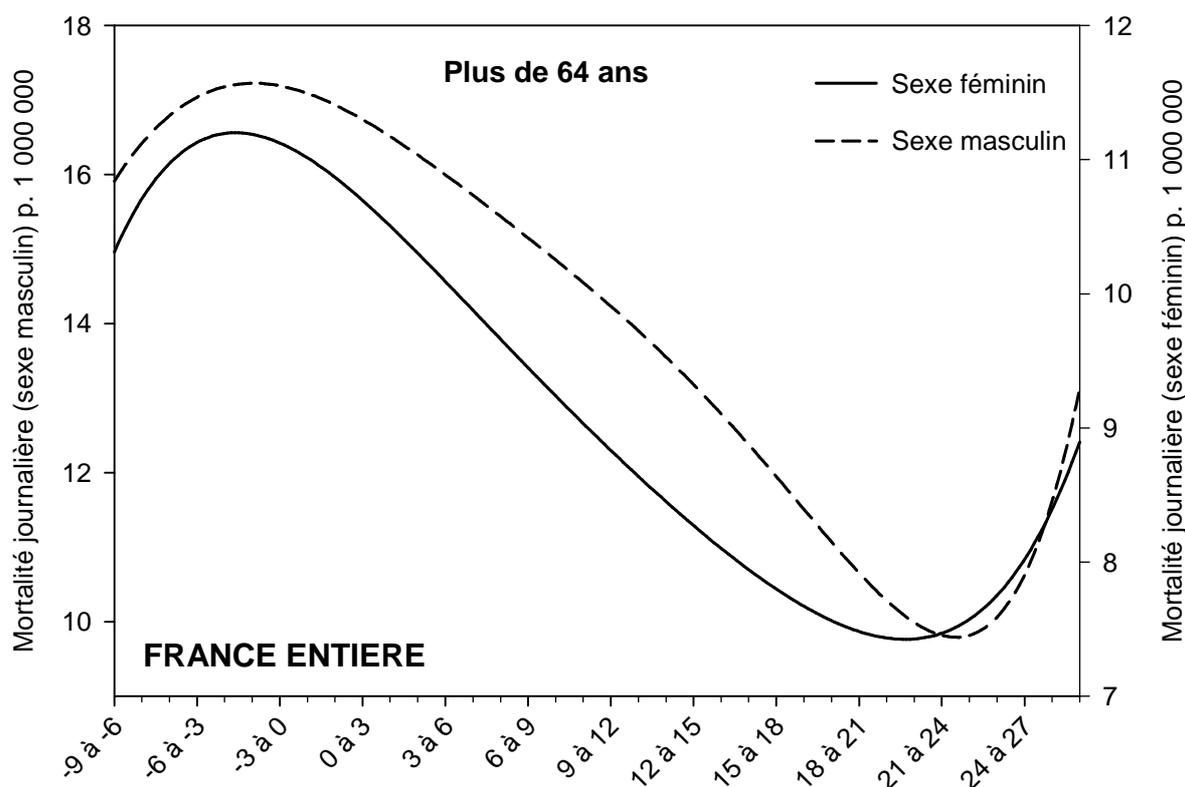


Figure 8 - Relation température-mortalité en France, au pas de temps journalier, pour les cardiopathies ischémiques chez les sujets de plus de 64 ans.

Chez les hommes, la courbe de mortalité par cardiopathie ischémique en fonction de la température est similaire à celle de la population générale, surtout avant 64 ans. Tous âges confondus, l'optimum se situe entre 23,2 et 26,2°C, avec 1,5 morts/jour p. 1 000 000, tandis qu'après 64 ans, l'optimum thermique, plus marqué, se situe entre 23,3 et 26,3 avec 9,2 morts/jour p. 1 000 000.

Chez les femmes, tous âges confondus l'optimum "vrai" se situe entre 22,4 et 25,4°C avec 1,3 morts/jour p. 1 000 000, soit un peu plus bas que celui des hommes, mais la mortalité reste faible entre les bandes 18,6-21,6°C et 22,4-25,4°C (mortalité moyenne/jour /1 000 000 : 1,8). Après 64 ans, l'optimum reste le même, entre 22,4 et 25,4°C (7,2

morts/jour/1 000 000), et là encore la mortalité est faible entre 18,6 et 21,6°C (mortalité moyenne/jour : 8,2).

Paris (tabl. V) confirme de façon exemplaire les tendances décrites pour l'ensemble de la France.

Tableau V. - **Mortalité par cardiopathies ischémiques à Paris.**

	Population		Hommes		Femmes	
	Générale	> 64 ans	Tous âges	> 64 ans	Tous âges	> 64 ans
Optimum (°C)	23,5-26,5	23,5-26,5	23,2-26,2	23,3-26,3	18,6-25,4	18,6-25,4
Mortalité (nombre de décès/jour/1 000 000 habitants)	1,3	7,6	1,4	8,4	1,3	7,0

Contrairement à ce que l'on avait trouvé pour la mortalité toutes causes confondues, dans le cas des cardiopathies ischémiques l'optimum thermique est nettement plus bas chez les femmes que chez les hommes, tous âges confondus, y compris après 64 ans. La nocivité des basses températures peut être imputée en partie aux rythmes endogènes des facteurs de risque cardiovasculaire tels que la pression artérielle ou le fibrinogène, et en partie à des facteurs exogènes tels que le régime alimentaire, le niveau d'activité physique et, bien entendu, le contexte météorologique qui peut agir directement ou indirectement avec les rythmes endogènes pour fragiliser l'organisme et le prédisposer à l'infarctus (V.L.S. Crawford *et al.*, 2003). Les maladies respiratoires, elles-mêmes influencées par la température comme on le verra un peu plus loin, peuvent elles aussi conditionner la mortalité coronarienne (W.R. Keatinge, 2002). C. Royer (2003) a du reste pu établir qu'en Côte-d'Or, le risque d'infarctus du myocarde, mortel ou non, était majoré de 140% chaque fois que la température moyenne journalière descendait au-dessous de -4°C, les sujets hypertendus étant quasiment seuls à enregistrer une telle augmentation du risque d'infarctus par temps froid.

#### *b) Les maladies cérébrovasculaires*

La courbe d'évolution de la mortalité pour les maladies cérébrovasculaires dans la population générale, les deux sexes confondus, présente un pic particulièrement proéminent (3,7 décès/jour/1.000.000) aux très basses températures, suivi d'une chute rapide jusqu'à la bande -5 à -3°C, la décroissance se poursuivant ensuite avec une pente plus faible jusqu'à l'optimum situé entre 23,1 et 26,1°C (1,2 décès/jour/1.000.000). Il en va de même pour les plus de 64 ans, pour lesquels l'optimum est identique et correspond à 1,1 décès/jour/1.000.000. Il est vrai que les accidents vasculaires cérébraux touchent essentiellement les personnes âgées.

Chez les hommes, la mortalité présente un pic unique entre -8 et -5°C (4,8 décès/jour/1.000.000), suivi d'une décroissance très rapide dès la bande -7 à -4°C (2,7 décès/jour), la décroissance étant ensuite très faible jusqu'à l'optimum situé entre 23,6 et 26,6°C, avec 0,8 décès/jour/1.000.000, sans qu'il y ait vraiment remontée au-delà (0,9 décès/jour/1.000.000 à 27-30°C). On retrouve une courbe sensiblement identique au-delà de 64 ans (fig. 9), avec un optimum avec un optimum légèrement plus bas (22,4-25,4°C).

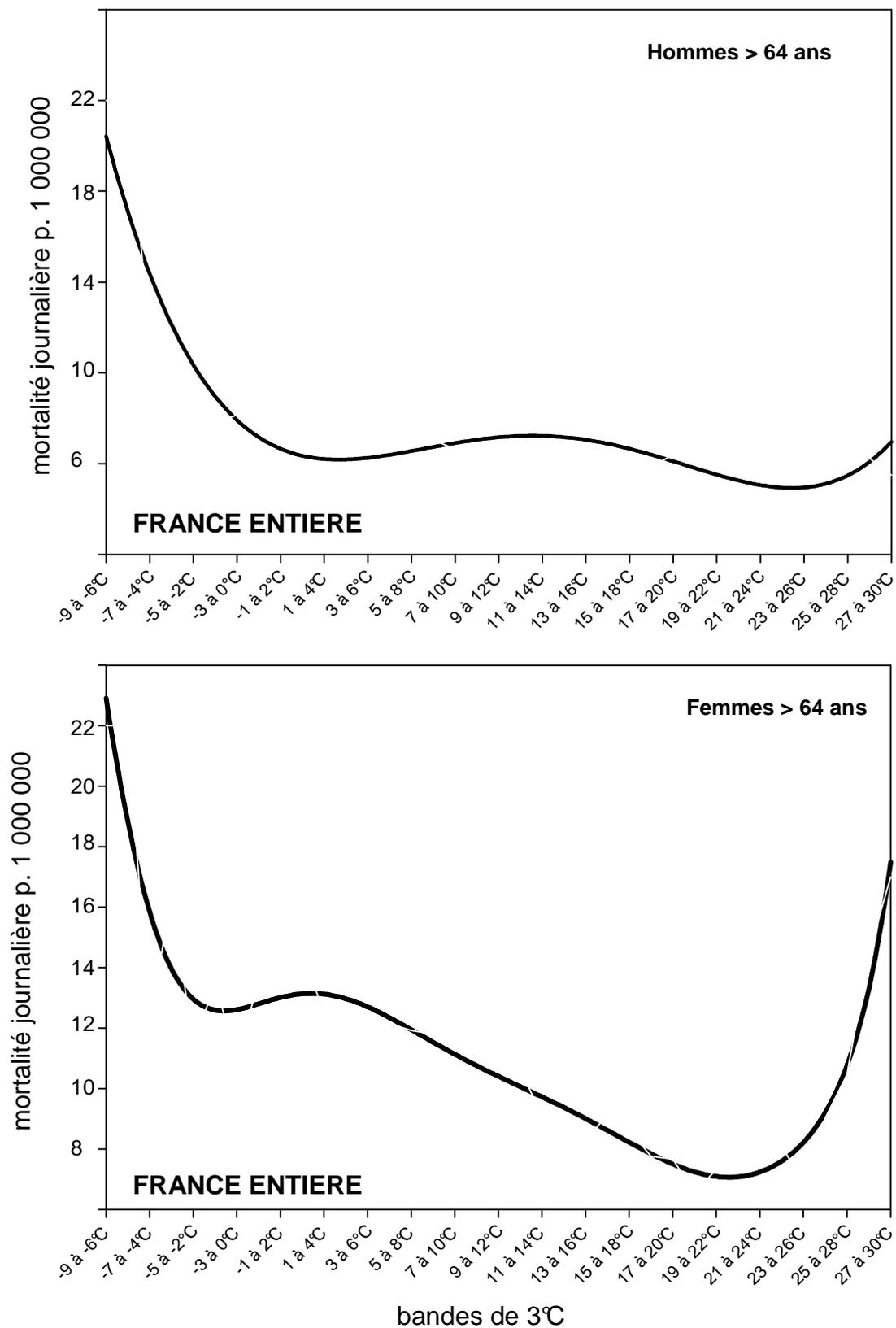


Figure 9.- Relation température-mortalité en France, au pas de temps journalier, pour les maladies cérébro-vasculaires chez les hommes et les femmes de plus de 64 ans.

Chez les femmes (fig. 9), la mortalité présente deux pics aux deux extrêmes thermiques (respectivement 2,7 et 2,3 décès/jour/1.000.000), et entre ces pics elle décroît jusqu'à un optimum bien marqué entre 23,0 et 26,0°C (1,4 décès/jour/1 000 000). L'allure de la courbe est presque inchangée au-delà de 64 ans (fig. 9), mais avec un optimum plus bas et plus étalé (de 18,0-21,0 à 18,2-21,2°C (7,5 décès/jour/1 000 000)).

Paris (tabl. VI) ne s'écarte en rien du schéma national.

Tableau VI. - **Mortalité par maladies cérébrovasculaires à Paris.**

	Population		Hommes		Femmes	
	Générale	> 64 ans	Tous âges	> 64 ans	Tous âges	> 64 ans
Optimum (°C)	23,1-26,1	23,1-26,1	23,6-26,6	22,4-25,4	23-26	18-21 à 18,2-21,2
Mortalité (nombre de décès/jour/1 000 000 habitants)	1,3	6,7	0,8	6,1	1,3	7,0

On retiendra que, comme pour les cardiopathies ischémiques, l'optimum thermique est plus bas chez les femmes que chez les hommes, tous âges confondus et surtout après 64 ans. Le rôle du froid, déjà démontré dans des études épidémiologiques (K. Laaidi *et al.*, 2004) aussi bien que cliniques (D.J. Lanska et R.G. Hoffmann, 1999), peut être la résultante d'une large série de perturbations physiopathologiques induites ou, à tout le moins, favorisées par les basses températures (augmentation de la fibrinolyse physiologique, de l'agrégation plaquettaire, de la viscosité sanguine et du facteur de coagulation VII, sans oublier l'élévation de la tension artérielle par l'intermédiaire des catécholamines et des hormones thyroïdiennes).

### c) Les autres maladies de l'appareil circulatoire

On ne s'attardera guère sur les maladies de l'appareil autres que les cardiopathies ischémiques et les accidents vasculaires cérébraux, dans la mesure où cette rubrique est, nosologiquement parlant, beaucoup moins homogène que les précédentes. Néanmoins, on constate dans la population générale un pic particulièrement saillant aux plus basses températures (-9 à -6°C : 6,5 décès/ jour/1 000 000, -8 à -5°C : 6,1 décès/jour). Après quoi le taux de mortalité décline, d'abord rapidement, puis de plus en plus lentement jusqu'à l'optimum situé entre 19,1 et 22,1°C, pour ne remonter qu'à peine au-dessus de lui (2,8 décès/jour/1 000 000 à 27-30°C). L'évolution et l'optimum sont les mêmes au-delà de 64 ans.

Quelques différences sont, là encore, notées d'un sexe à l'autre, y compris à Paris (tabl. VII). Chez les hommes, après un pic de mortalité au froid, la courbe s'infléchit rapidement au point que, tout au long de l'intervalle 14-30°C, les décès restent rares (1,8 à 2,1/ jour/1 000 000), l'optimum se plaçant entre 26 et 29°C. Au-delà de 64 ans (fig. 10), l'allure de la courbe ne change guère, mais l'optimum est un peu mieux dessiné, entre 22 et 25°C, avant une légère recrudescence de la mortalité aux plus fortes chaleurs. Chez les femmes, le maximum de décès correspond toujours aux épisodes de plus grand froid, mais il y a deux

optima thermiques (19,1-22,1 et 19,6-22,6). La mortalité s'accroît ensuite légèrement jusqu'à 27-30°C. Le schéma est très voisin au-delà de 64 ans (fig. 10), avec un optimum cette fois situé entre 19,6 et 22,6°C.

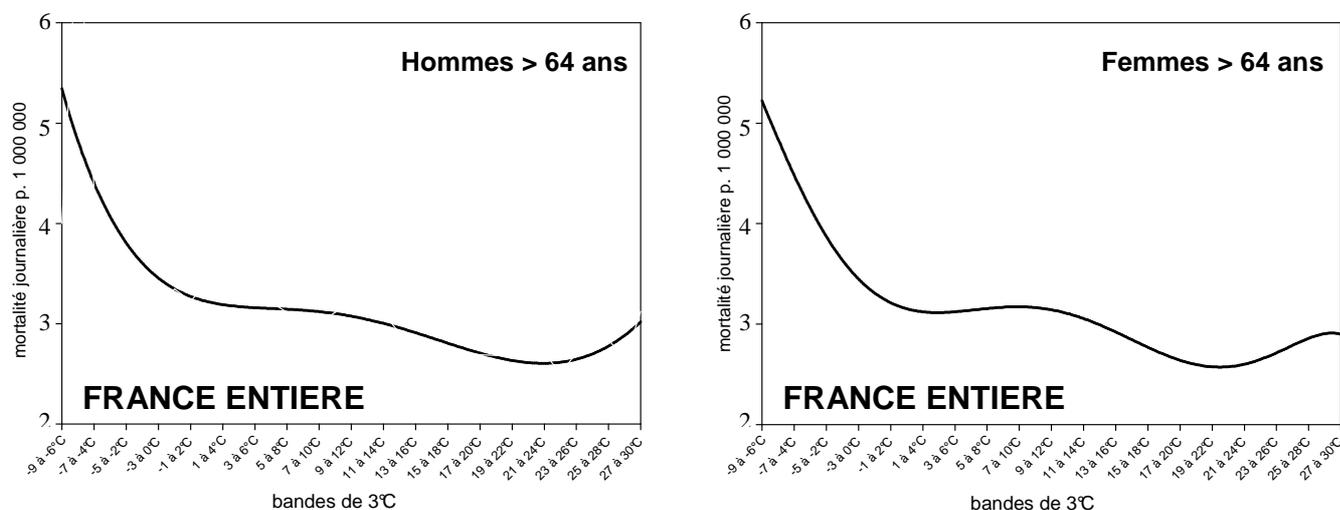


Figure 10. - Relation température-mortalité en France, au pas de temps journalier, pour les maladies de l'appareil circulatoire autres que les cardiopathies ischémiques et les accidents vasculaires cérébraux chez les hommes et les femmes de plus de 64 ans.

Tableau VII. - Mortalité par maladies de l'appareil circulatoire autres que les cardiopathies ischémiques et les accidents vasculaires cérébraux, à Paris.

	Population		Hommes		Femmes	
	Générale	> 64 ans	Tous âges	> 64 ans	Tous âges	> 64 ans
Optimum (°C)	19,1-22,1	19,1-22,1	26-29	22-25	19,1-22,1 / 19,6-22,6	19,6-22,6
Mortalité (nombre de décès/jour/1 000 000 habitants)	3,2	12,1	1,8	11,4	2,4	11,6

d) Les maladies de l'appareil respiratoire, à l'exception de la grippe

De façon encore plus nette que les maladies circulatoires autres que les cardiopathies ischémiques et les accidents vasculaires cérébraux, les maladies de l'appareil respiratoire rompent avec le schéma général, en s'écartant franchement de la courbe en "U". Dans la population générale et pour l'ensemble du pays (fig. 11), un pic exceptionnellement saillant est associé aux plus basses températures (-9 à -6°C : 2,0 décès/jour/1 000 000, -8 à -5°C : 1,8 décès/jour/1 000 000). Le taux se stabilise ensuite jusqu'à la bande 5-8°C, avant d'amorcer une décroissance graduelle jusqu'à ce que l'on hésite à appeler un optimum, entre 19,1 et 22,1°C (0,8 décès/jour/1 000 000), pour rester pratiquement au même niveau au-delà,

l'augmentation vers les températures plus élevées étant à peine décelable (1,2 décès/jour/1.000.000 à 27-30°C). Au-dessus de 64 ans, la seule nuance concerne le niveau un peu plus bas de l'optimum, si tant est que l'on puisse en identifier un, entre 22,8 et 25,8°C (4,8 décès/jour).

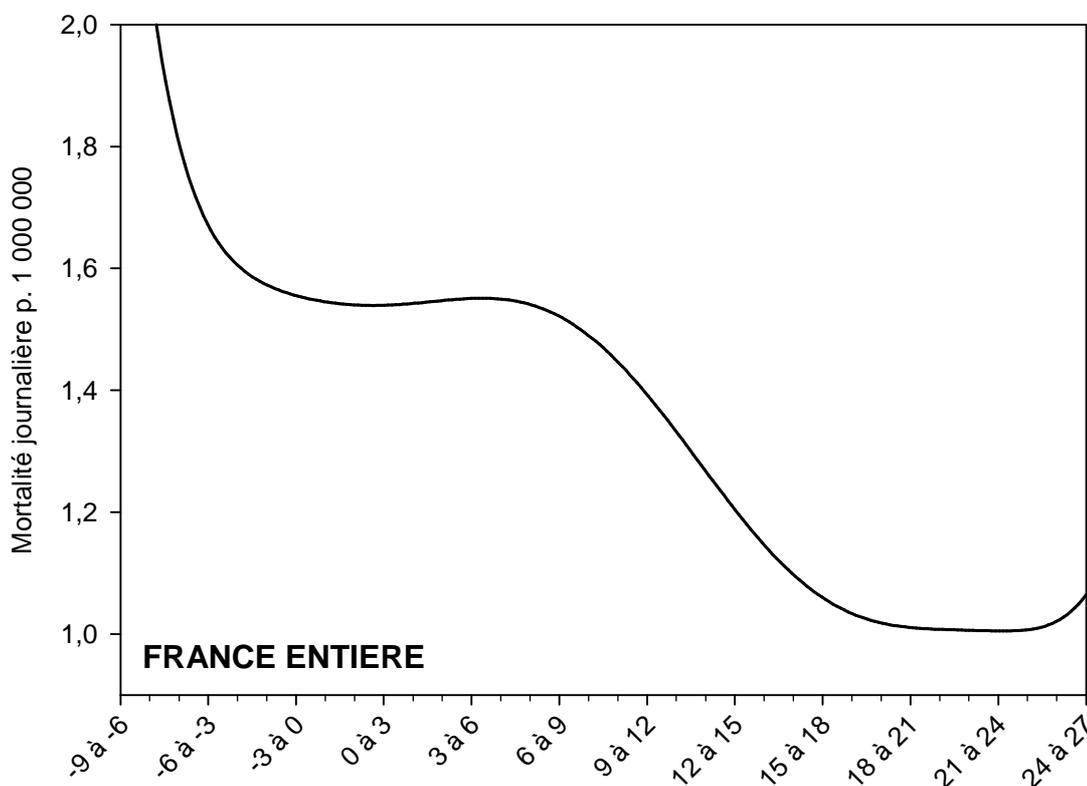


Figure 11. - Relation température-mortalité en France, au pas de temps journalier, pour les maladies des voies respiratoires, grippe exclue, tous âges confondus.

Pour le sexe masculin, la mortalité est presque au même niveau quelle que soit la température, avec une légère décroissance après la bande 12-15°C, l'optimum étant atteint entre 27 et 30°C, c'est-à-dire qu'il coïncide avec les températures les plus élevées. Au-delà de 64 ans, le schéma reste sensiblement le même, la mortalité diminuant progressivement vers les températures élevées.

Chez les femmes, la courbe a une allure similaire, avec un optimum à un niveau thermique particulièrement élevé, entre 26 et 29°C tous âges confondus, et entre 27 et 30°C au-delà de 64 ans, la mortalité commençant dans les deux cas à être basse (moins de 0,9 décès/jour/1 000 000) dès l'intervalle 13-16°C.

L'influence prépondérante des basses températures peut s'expliquer par la bronchoconstriction que provoque l'inspiration d'air froid, bronchoconstriction dont il ne fait plus de doute qu'elle accroisse la susceptibilité aux infections pulmonaires (F. Ballester *et al.*, 1997). Deux remarques s'imposent néanmoins. La première pour signaler dans certains départe-

ments comme la Saône-et-Loire (fig. 12), mais aussi en Ile-de-France si l'on excepte Paris, une franche diminution de la mortalité par maladies des voies respiratoires lors des plus grands froids (-8 ou -9 à -5 ou -6°C), le reste de la courbe étant proche de la moyenne nationale. L'autre remarque est relative aux périodes caniculaires, où la recrudescence de la mortalité respiratoire pourrait être sensiblement plus marquée qu'il n'a été observé sur la série 1991-1995. Cela rejoint des constatations faites à l'étranger, par exemple en Espagne (F. Ballester *et al.*, 1997), en Italie (S. Zauli Sajani *et al.*, 2002) ou encore en Angleterre et au Pays de Galles, où les maladies respiratoires ont contribué significativement à l'excès de mortalité provoqué par la vague de chaleur de 1995 (C. Rooney *et al.*, 1998).

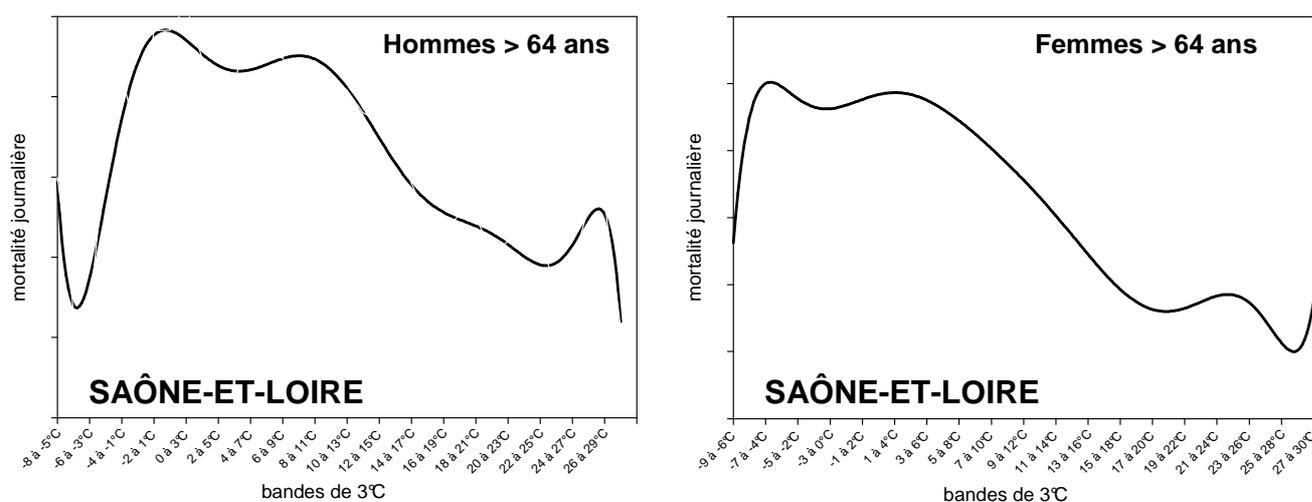


Figure 12. - Relation température-mortalité en Saône-et-Loire, au pas de temps journalier, pour les maladies des voies respiratoires, grippe exclue, chez les hommes et les femmes de plus de 64 ans.

Tableau VII. - Mortalité par maladies des voies respiratoires, grippe exclue, à Paris.

	Population		Hommes		Femmes	
	Générale	> 64 ans	Tous âges	> 64 ans	Tous âges	> 64 ans
Optimum (°C)	23,4-26,4	22,8-25,8	27-30	27-30	26-29	27-30
Mortalité (nombre de décès/jour/1 000 000 habitants)	0,8	4,8	0,5	4,5	0,7	3,0

En résumé, pour les quatre types de causes de décès que l'on vient d'individualiser, la mortalité se révèle plus importante aux basses températures qu'aux températures élevées. Ceci est surtout net pour les maladies de l'appareil respiratoire, pour lesquelles la mortalité ne présente pas de pic secondaire aux températures les plus hautes. Seuls les grands paroxysmes thermiques peuvent remettre en cause ce schéma. Si l'on regroupe, un peu

artificiellement, ces quatre types de pathologies, on retrouve un optimum plus bas chez les femmes que chez les hommes, et plus bas après 64 ans que tous âges confondus.

#### 4. Selon les autres paramètres météorologiques

La question a été posée, pour finir, de savoir si les éléments du climat autres que la température contribuaient ou non, en association avec elle, à rendre compte des variations interjournalières de la mortalité.

Ces paramètres non thermiques ont d'abord été testés séparément. Aucun pouvoir explicatif n'a été reconnu à l'humidité relative, bien que celle-ci détermine par temps chaud la capacité de l'organisme à se refroidir par vaporisation de la sueur ou de l'eau perspirée et qu'elle accentue à l'autre extrémité de l'échelle thermique la sensation subjective de froid.

Quant à l'association (négative) obtenue à l'échelle nationale avec la vitesse (moyenne ou maximale) du vent, elle a été reconnue non significative dans tous les départements examinés, à trois exceptions près (Drôme et Lozère où elle est négative, Côtes d'Armor où elle est positive).

Le point de rosée et la nébulosité ne se sont pas révélés plus influents, tant que l'on raisonnait sur l'ensemble de la série. En revanche, en se limitant aux décès survenus en présence de températures supérieures à l'optimum, tel qu'il a été défini plus haut, une corrélation positive a pu être mise en évidence avec le point de rosée, de même qu'une corrélation négative avec la nébulosité, ni l'une ni l'autre n'ayant toutefois – et à beaucoup près – la force et la régularité du lien observé avec la température (tabl. VIII), y compris avec les degrés-jours excédant 20°C, paramètre testé à la suite des travaux sur la mortalité des personnes âgées à Rome (P. Michelozzi *et al.*, 2000).

Tableau VIII. - **Coefficients de régression univariée de la mortalité et de divers paramètres climatiques autres que la température (France entière, toutes causes de décès et toutes classes d'âge confondues)**

Variable	Coefficient	Erreur-type	Signification statistique
Humidité relative	0,002	0,001	n.s.
Vitesse du vent	- 0,001	0,001	n.s.
Point de rosée (série entière)	0,002	0,003	n.s.
<b>Point de rosée (journées &gt; optimum)</b>	<b>0,008</b>	<b>0,002</b>	<b>&lt; 0,001</b>
Nébulosité (série entière)	- 0,001	0,0024	n.s.
<b>Nébulosité (journées &gt; optimum)</b>	<b>- 0,006</b>	<b>0,0021</b>	<b>&lt; 0,02</b>
Degrés-heures > 20°C à 03, 09, 15 et 21 heures	0,011	0,001	< 0,001

De la même façon ont été testés deux indices dits un peu abusivement "de confort", combinant plusieurs éléments du climat et couramment utilisés en biométéorologie humaine

et en météoropathologie, où ils conduisent souvent à des résultats beaucoup plus nets que les variables météorologiques isolées :

- Le *pouvoir réfrigérant de l'air (indice K)*, calculé selon la formule classique de P.A. Siple et Ch.F. Passel (1945) qui fait intervenir à la fois la température et la vitesse du vent, n'a pas permis de découvrir de corrélation avec la mortalité, sur l'année entière. A.E. Kunst *et al.* (1994) ont, eux aussi, montré aux Pays-Bas que la part supplémentaire de mortalité "expliquée" par l'indice de P.A. Siple et Passel, par comparaison avec la température seule, restait infime et nullement significative, y compris pour les maladies cardiaques (31,5 contre 31,2%), d'autres formules plus complexes (et incluant des paramètres non relevés en routine dans les stations du réseau météorologique) améliorant très légèrement les résultats : l'indice de R.G. Steadman (1979) rendrait ainsi compte de 34,9% de la variance de la mortalité. Mais il en est allé un peu différemment lorsque l'on a isolé les décès survenus en présence de températures inférieures à l'optimum thermique (fig. 13). Dans de telles circonstances, en effet, le vent renforce les méfaits des basses températures, l'inhalation d'air froid causant une bronchoconstriction, spécialement en cas de broncho-pneumopathie obstructive. L'amélioration apportée à la prédiction, par rapport à l'utilisation de la température seule, n'est pas moins restée très modeste, la part de variation interjournalière expliquée passant seulement de 31,4 à 32,3%. En l'état actuel de choses, il semble donc n'y avoir que peu d'inconvénients à négliger ce paramètre.

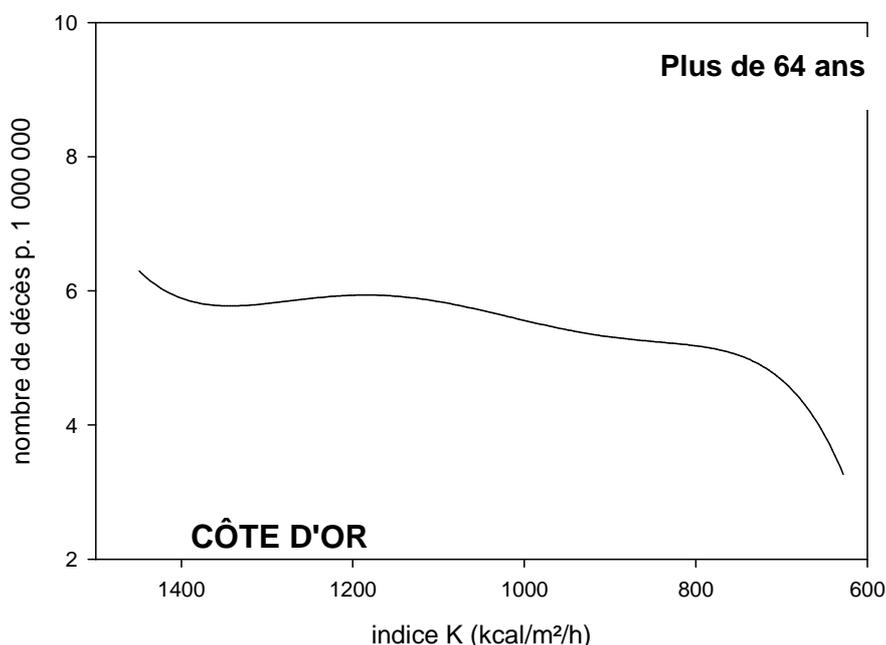


Figure 13. - **Relation entre le pouvoir réfrigérant de l'air (indice K) et la mortalité en Côte-d'Or, au pas de temps journalier, toutes causes de décès confondues, en présence de températures inférieures à l'optimum thermique.**

- Mais l'*indice thermo-hygrométrique* THI (*discomfort index*) de E.C. Thom (1959) s'est montré un relativement bon prédicteur de la mortalité journalière (tabl. IX), l'avantage revenant là encore à la moyenne des vingt-quatre heures sur les extrêmes instantanés. C'est pour les décès survenus en juin, juillet et août (fig. 14), en particulier pour les cardiopathies ischémiques au-delà de 64 ans qu'ont été obtenus les coefficients de corrélation les plus élevés (0,026 pour la France entière, jusqu'à 0,090 dans les Bouches-du-Rhône, la Gironde et l'Isère).

Tableau IX. - Coefficients de régression univariée de la mortalité et de l'indice thermo-hygrométrique THI, ou *discomfort index* (France entière, toutes causes de décès et toutes classes d'âge confondues).

Variable	Coefficient	Erreur-type	Signification statistique
THI moyen (série entière)	0,001	0,003	n.s.
THI minimal (série entière)	0,000	0,002	n.s.
THI maximal (série entière)	0,000	0,004	n.s.
THI moyen (journées > optimum)	0,017	0,002	< 0,001
THI minimal (journées > optimum)	0,013	0,002	< 0,001
THI maximal (journées > optimum)	0,015	0,002	< 0,001
Degrés-heures > 20°C à 03, 09, 15 et 21 heures	0,011	0,001	< 0,001

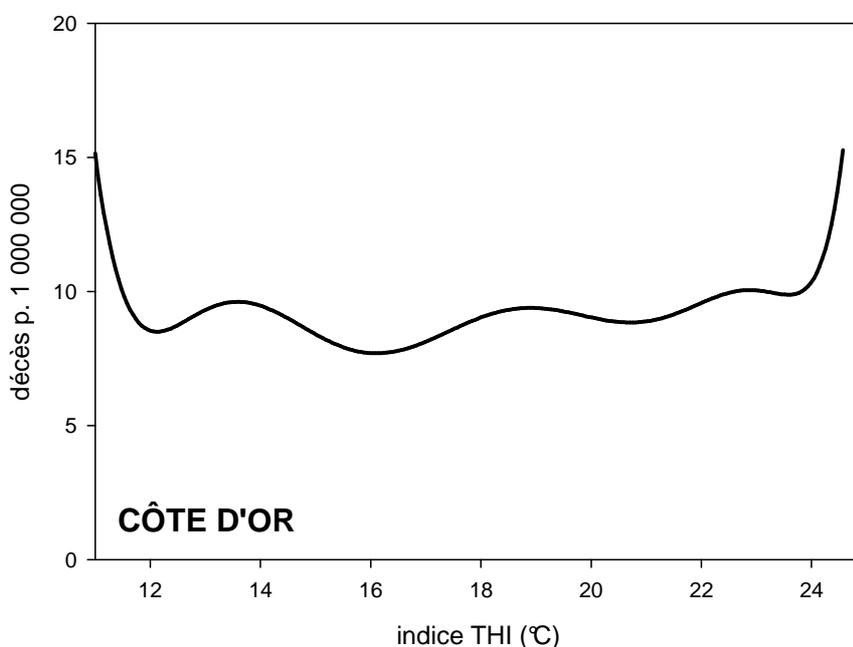


Figure 14. - Relation entre l'indice thermo-hygrométrique THI (*discomfort index*) et la mortalité en Côte-d'Or, au pas de temps journalier, toutes causes de décès confondues au-delà de 64 ans, en juin, juillet et août.

Enfin, la forte autocorrélation des principales variables météorologiques réduit la portée de la régression multiple. Toutefois, les degrés-heures du jour  $J_{+1}$  et le point de rosée du jour  $J$  sont ressortis comme les prédicteurs les plus sûrs de la mortalité du jour  $J$ , au-dessus de l'optimum thermique. Un test d'interaction entre les deux variables a donné des résultats significatifs au-delà de 64 ans, lorsque le point de rosée était subdivisé en deux classes, respectivement égale ou inférieure à 15°C et supérieure à 15°C. Le tableau X donne les résultats du modèle final pour la mortalité toutes causes. La relation des degrés-heures et de la mortalité quotidienne par cardiopathies ischémiques et par maladies des voies respiratoires pour les deux classes de point de rosée est par ailleurs visualisée à l'aide de la figure. Dans les deux cas, *la hausse de la mortalité liée à un excédent thermique durable se révèle plus claire quand le point de rosée dépasse 15°C.*

Tableau X. - Résultats des modèles de régression multivariée (France entière, toutes causes de décès et toutes classes d'âge confondues).

Variables	Coefficient	Erreur-type	Signification statistique	% de hausse de la mortalité par 10 unités de variation
Point de rosée ≤ 15°C Degrés-heures $J_{-1}$	0,010	0,001	< 0,001	10,74
Point de rosée > 15°C Degrés-heures $J_{-1}$	0,013	0,001	< 0,001	13,82

### C. Implications dans la perspective de l'évolution du climat

Une fois connus les liens actuels entre la chaleur et la mortalité, il peut paraître relativement facile d'extrapoler à différents scénarios de réchauffement, dans le cadre du renforcement de l'effet de serre par l'action anthropique, et de déterminer quelles pourraient être les conséquences sur la mortalité de l'évolution thermique annoncée. Cette entreprise comporte néanmoins une part importante d'incertitude, l'une des principales raisons en étant que l'on est obligé, dans de telles extrapolations, de raisonner **toutes choses égales par ailleurs**, alors que le contexte a toutes les chances d'évoluer, dans des directions que l'on peut éventuellement pressentir, mais avec une ampleur que l'on ne saurait présentement quantifier. Ce sont les possibilités d'adaptation qui constituent sans doute le biais le plus pernicieux. En effet, l'une des constatations essentielles qui ont été faites ci-dessus est qu'aujourd'hui, à la surface du territoire français, le niveau de l'optimum thermique s'élève à mesure que l'on a affaire à un climat "normalement" plus chaud. Il s'ensuit que le nombre annuel de jours où la température moyenne s'inscrit au-dessus de l'optimum présente une assez forte homogénéité, avec une moyenne de 36 (intervalle de confiance à 95% = 28-44), les écarts à cette moyenne étant aussi souvent positifs que négatifs – et cela aussi bien que dans le Nord que dans le Sud, dans l'Ouest que dans l'Est. On retrouve là, à une échelle beaucoup plus fine, les conclusions que l'enquête *Eurosummer* avait pu tirer de la comparaison entre le nord de la Finlande, Londres et Athènes (W.R. Keatinge *et al.*, 2000). Mais la question fondamentale, à laquelle nul ne saurait présentement apporter des réponses argumentées, reste de savoir si, en présence d'un réchauffement planétaire, un tel processus d'adaptation différentielle se poursuivrait – auquel cas les effets sanitaires et démographiques du change-

ment climatique auraient toutes chances de se trouver atténués, sinon annulés. Or, la canicule de 2003 a bien montré que les régions habituées à la chaleur avaient moins souffert que les régions où l'adaptation (non seulement physiologique, mais aussi technique, comportementale et sans doute culturelle...) était moindre (J.P. Besancenot, 2003).

Dans ces conditions, on est obligé d'admettre un certain nombre d'hypothèses simplificatrices et de raisonner comme si cette adaptation n'existait pas, ou comme si elle n'intervenait qu'avec retard – ce qui ne paraît d'ailleurs pas totalement irréaliste (M. Beniston, 2002 ; M.A. Castel-Tallet et J.P. Besancenot, 1997 ; M.J. Gawith *et al.*, 1999).

Deux directions de recherche ont donc été suivies, en se plaçant dans le cadre du scénario A2 du GIEC pour la fin du XXI<sup>ème</sup> siècle (R. Kandel, 2002 ; M. Petit, 2003). Rappelons que, si tous les scénarios annoncent un réchauffement, celui-ci (pris pour référence par l'immense majorité des scientifiques) fait apparaître un impact plus intense car il correspond à une faible implication de l'humanité pour réduire les émissions. Quand on regarde les concentrations de CO<sub>2</sub> et leurs effets directs sur l'atmosphère, on ne voit pas de différence sensible entre les différents scénarios d'ici à 2050, mais les trajectoires s'écartent au-delà.

Dans la première orientation de recherche, on s'est placé dans l'éventualité d'un **réchauffement uniforme, dans le temps comme dans l'espace**. Il s'agit là d'une pure hypothèse d'école, extrêmement réductrice car on sait pertinemment que la méthode de simulation à résolution variable, utilisée par Météo-France, prédit par exemple, en présence d'un doublement du taux de gaz carbonique :

- un réchauffement très modéré (1 à 2°C) en hiver sur la France, sauf sur le Sud-Est à cause de la Méditerranée plus chaude ;
- des anomalies supérieures à 2°C au printemps sur toute la moitié Sud ;
- des anomalies supérieures à 2°C également, mais étendues sur la majeure partie du pays en été, et plus encore en automne, alors même que les anomalies dépassant 3°C seraient rares, et qu'aucune ne franchirait la barre des 4°C.

Par ailleurs, la quasi-totalité des scénarios fait état d'un réchauffement plus marqué de nuit que de jour ; or, des températures nocturnes élevées représentent un facteur de risque décisif en période caniculaire, la chaleur de la journée étant bien supportée tant que les nuits permettent de "récupérer" dans de bonnes conditions, alors que l'absence de véritable rafraîchissement déclenche des hécatombes (J. Simonet, 1985 ; X., 1995 ; J.C. Semenza *et al.*, 1996 ; S. Whitman *et al.*, 1997 ; J.P. Besancenot, 1997).

Il eût cependant été utopique de prétendre introduire dans les calculs de telles subtilités, qui auraient de surcroît posé de façon insoluble le problème des limites, spatiales aussi bien que chronologiques.

Pour chaque département a donc été calculée la distribution fréquentielle des températures, sur la série 1991-1995, par tranches de 3°C, ainsi que la mortalité moyenne (p. 1000 000) à l'intérieur de chacune de ces tranches. Il a ensuite été procédé à des décalages successifs de 1,0°C, 1,5°C, 2,0°C, 2,5°C et 3,0°C et l'on en a déduit les nombre prévisibles de décès en présence de ces nouvelles conditions thermiques, en supposant que la distribution fréquentielle des températures conserve exactement la même allure, la seule différence étant un décalage de la courbe vers la droite.

Les résultats ont été ensuite pondérés avec les projections démographiques faites par l'INSEE pour 2050. On s'est pour cela limité à la prise en compte du vieillissement de la population et de sa féminisation croissante aux âges les plus avancés, puisque c'est pour les femmes âgées que la mortalité a généralement été reconnue ci-dessus comme la plus thermosensible.

Logiquement, de part et d'autre d'un optimum thermique supposé inchangé, on aboutit alors à une diminution du nombre de jours situés au-dessous de l'optimum (donc à une réduction de la surmortalité due au froid) et à une augmentation du nombre de jours situés au-dessus de ce même optimum (donc à un renforcement de la surmortalité liée à la chaleur). Il n'empêche que ces constats séparés n'ont qu'un intérêt relatif ; c'est leur résultante qui importe. Or, on observe qu'en présence d'une élévation thermique, la mortalité générale pourrait se trouver légèrement accrue, ce qui s'explique sans peine par la pente plus forte de la courbe température-mortalité du côté des fortes chaleurs. Soit l'exemple de la Côte-d'Or : avec un réchauffement de 2°C, la mortalité enregistrerait une baisse de 2,4% au-dessous de l'optimum, resterait stable au niveau de l'optimum et serait majorée de 3,1% au-dessus de cet optimum. La prise en compte du critère démographique (vieillissement et féminisation) conduirait à un écart un peu plus marqué, les chiffres s'établissant respectivement à -2,6 et +3,4%. Les mêmes calculs, répétés sur tous les départements, ont donné du côté du froid des sous-mortalités de -0,5 à -4,7% (moyenne : 2,2%) et, du côté de la chaleur, des surmortalités de +0,7 à +6,3% (moyenne : 2,9%). Les maladies cardiovasculaires seraient responsables d'au moins les deux tiers de cette surmortalité. Encore cette première conclusion doit-elle être nuancée :

- D'une part, en effet, ce n'est guère qu'à Paris et dans le Midi méditerranéen que l'évolution serait significative ( $p = 0,04$  à Paris,  $p = 0,03$  dans l'Hérault et les Alpes-Maritimes. Toute la façade atlantique, en particulier, n'enregistrerait que des écarts inférieurs à 1% par rapport à la situation actuelle.
- D'autre part, répétons-le, tout ceci fait abstraction des possibilités d'adaptation, dont on a pourtant confirmé la réalité, et l'hypothèse initiale du maintien de l'optimum thermique au niveau actuel n'est assurément qu'un médiocre compromis.

C'est la raison pour laquelle ces chiffres relatifs à l'évolution générale de la mortalité doivent être interprétés avec la plus extrême prudence. Ils ne reflètent peut-être qu'une situation transitoire, correspondant à la phase initiale d'un réchauffement, avant qu'un nouvel équilibre puisse être trouvé.

En revanche, on doit pouvoir accorder un plus grand crédit au constat d'une évolution du **rythme annuel de la mortalité**. On sait qu'aujourd'hui, à l'échelle de la France entière comme à celle de chacune de ses régions, c'est l'hiver qui enregistre le plus grand nombre des décès (fig. 15 a). Les simulations réalisées avec la méthode exposée ci-dessus conduisent sans équivoque à une inversion de ce rythme, et l'on a pu déterminer le réchauffement minimal susceptible d'entraîner un tel effet. Si un relèvement de la température de 1,5°C a encore très peu de répercussions (fig. 15 b), les mois montrent une certaine tendance à s'équilibrer avec 2°C (fig. 15 c) et une hausse de 2,5°C paraît suffisante pour entraîner une inversion totale, avec passage de l'actuelle surmortalité d'hiver à une franche surmortalité d'été. Encore le développement de phénomènes d'adaptation est-il là encore susceptible, sinon de neutraliser, du moins de ralentir une telle évolution.

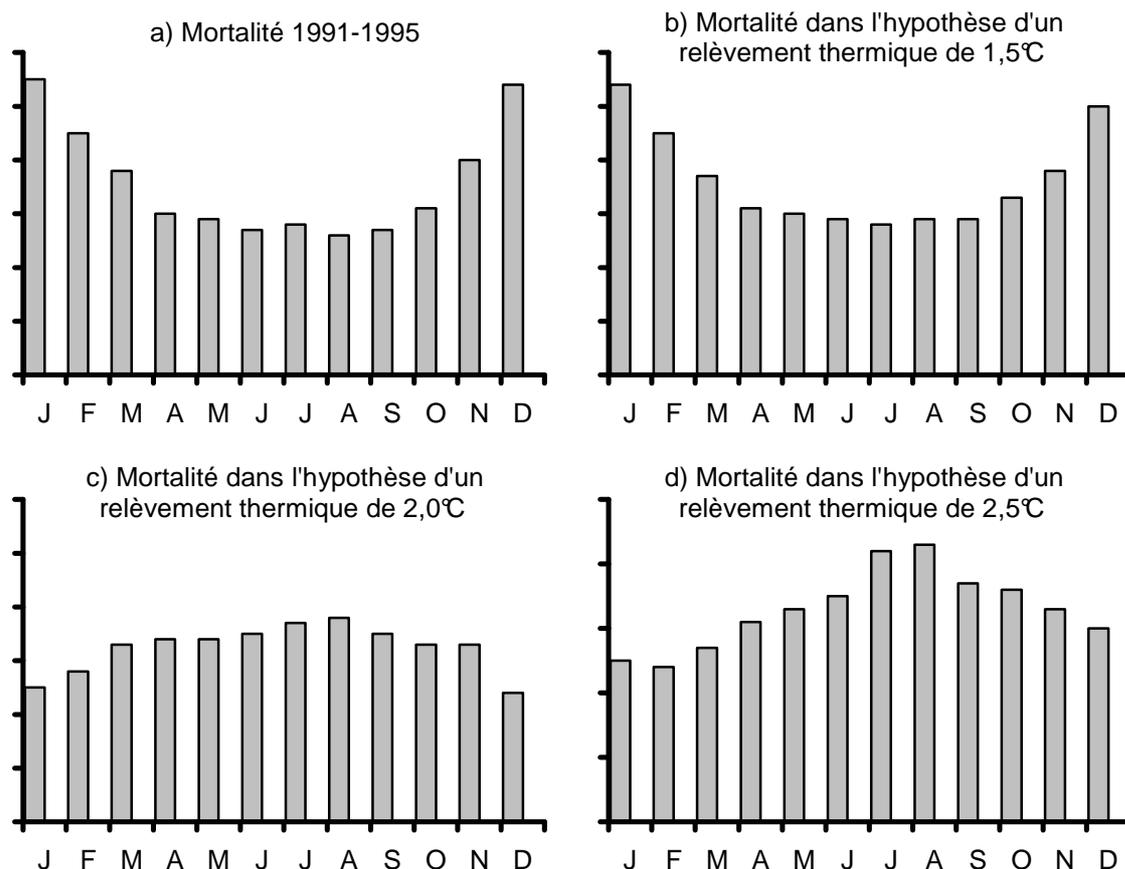


Figure 15. - **Évolution attendue du rythme saisonnier de la mortalité en France en cas de réchauffement uniforme.**

L'autre direction de recherche tentée concernait l'**impact éventuel des phénomènes météorologiques extrêmes** qui, selon la plupart des modèles de simulation du climat, pourraient marquer l'évolution du climat au XXI<sup>ème</sup> siècle, et notamment dans la deuxième moitié de ce siècle. Le modèle Arpège-Climat, de Météo-France, nous enseigne (M. Déqué, 2003) que la fréquence des vagues de froid, marquées par des températures moyennes journalières inférieures à -5°C, diminuerait considérablement ; les effets sur la mortalité sont déjà inclus dans la simulation, il n'y a donc pas lieu d'en tenir compte davantage. En revanche, des épisodes ponctuels comme la grande vague de froid de 1985 (M. Garneret, 1987) pourront toujours se renouveler, ils ne sont en rien incompatibles avec un réchauffement "moyen" et certains auteurs redoutent même que leur fréquence, sinon leur durée, n'augmente légèrement (J.B. Mercer, 2003). Voilà qui devrait réduire légèrement la sous-mortalité attendue en hiver, même si l'absence dans la littérature consultée de données sur la fréquence de tels épisodes interdit toute quantification. Les choses sont plus nettes du côté de la chaleur, où il faut s'attendre à une probabilité multipliée par 5 à 10 (M. Déqué, 2003) de voir dépasser le seuil des 35°C, même si le seuil des 45°C n'a qu'un risque infime d'être franchi. Cette fréquence accrue des phénomènes caniculaires est susceptible d'entraîner de dramatiques épisodes de surmortalité, à l'image de ce que la France a vécu durant l'été 2003. Si l'on retient une telle canicule tous les dix ans, l'extrapolation de la partie droite de la figure 4 conduit à estimer, non plus à 3,1% comme ci-dessus, mais à 9,3% la possible surmortalité estivale à la fin du XXI<sup>ème</sup> siècle, dans un département tel que la Côte d'Or.

C'est là sans doute que réside le plus inquiétant pour l'avenir.

## **5. Conclusion**

La démonstration a été faite que la relation température-mortalité suit en France, comme dans beaucoup d'autres pays soumis à un climat "tempéré" de latitudes moyennes, une courbe en "U" plus ou moins dissymétrique. Cette courbe est caractérisée par l'existence d'un optimum thermique souvent bien marqué, spécialement chez les personnes âgées. Mais, toutes choses égales par ailleurs, cet optimum se situe à un niveau d'autant plus élevé qu'est considéré un climat plus chaud.

Un réchauffement uniforme dans le temps comme dans l'espace – hypothèse d'école par laquelle il est indispensable de passer – se traduirait par une diminution du nombre de jours inférieurs à l'optimum et par une augmentation du nombre de jours supérieurs à ce même optimum. Compte tenu de la pente plus forte de la courbe température-mortalité du côté des fortes chaleurs, la mortalité générale pourrait s'en trouver légèrement accrue, notamment à Paris et dans le Midi méditerranéen. Mais la répercussion la plus franche serait une inversion du rythme annuel de la mortalité, avec passage de l'actuelle surmortalité d'hiver à une franche surmortalité d'été où les maladies cardiovasculaires pourraient jouer un rôle prépondérant. Un relèvement thermique de 2,5°C serait suffisant pour entraîner une telle inversion. Encore le développement de phénomènes d'adaptation est-il susceptible de neutraliser ou, à tout le moins, de ralentir cette évolution.

Le plus inquiétant pour l'avenir n'en reste pas moins la probable multiplication des paroxysmes thermiques, du côté du froid mais surtout du côté de la chaleur. Dans ce cas, il faut s'attendre à de dramatiques épisodes de surmortalité, à l'image de ce que la France a vécu, par exemple, durant l'hiver 1985 ou l'été 2003, le vieillissement de la population et sa concentration de plus en plus forte dans de grandes agglomérations urbaines pouvant contribuer à accentuer les risques.

Dans ces conditions, c'est avant tout sur la saison estivale, éventuellement élargie à la fin du printemps et au début de l'automne, que devrait être dirigé l'essentiel des mesures de prévention. Celles-ci peuvent prendre des formes multiples, de la généralisation de la climatisation (qui n'est sûrement pas une panacée, mais qui semble bien avoir fait la preuve de son efficacité aux États-Unis chez les personnes âgées, à domicile ou en institution) jusqu'à des campagnes d'information sur les risques de l'hyperthermie et de la déshydratation.

C'est à cette condition seulement que les effets hivernaux positifs du réchauffement climatiques pourront compenser ses effets estivaux dans l'ensemble déléteres, à l'échelle de la France et de ses différentes régions, avec sans doute des points cruciaux dans le Midi méditerranéen et à Paris.

## 6. Valorisation des résultats

L'avancement de la recherche a été présenté successivement aux manifestations scientifiques suivantes :

- *Séminaire Scientifique "Gestion et Impacts du Changement Climatique"* (Toulouse, Ministère de l'Environnement et Medias-France, 27-28 septembre 2000) ; communication orale ;
- *Séminaire Scientifique "Régionalisation des changements climatiques (moyens et extrêmes)"* (Toulouse, Ministère de l'Environnement et Medias-France, 13-14 décembre 2001)
- *Séminaire Scientifique "Changement climatique et santé"* (Paris, Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, 14 février 2002 ; communication orale ;
- *Séminaire de restitution du Programme Gestion et Impacts du Changement Climatique* (Toulouse, Ministère de l'Environnement et Medias-France, 25-26 avril 2002 ; communication orale ;
- *Colloque "Regards croisés sur les changements climatiques* (Arles, INRA, CNES, CNFCG, INSU, 25-29 novembre 2002) ; poster ;
- *Colloque "Changement climatique et santé"* (Paris, Météo-France, 31 mars 2003) ; communication orale.

Les publications suivantes ont par ailleurs été réalisées :

- BESANCENOT J.P., 2000 : "La mortalité selon le contexte thermique : réalité présente et scénarios pour le XXI<sup>ème</sup> siècle". In : *Séminaire scientifique du Programme Gestion et Impacts du Changement Climatique (27-28 septembre 2000)*. Toulouse : MATE et Médias-France, p. 67.
- BESANCENOT J.P., 2002 : "Vagues de chaleur et mortalité dans les grandes agglomérations urbaines". *Environnement, Risques et Santé*, Paris, ISSN 1635-0421, vol. I, n° 4, pp. 229-240, 8 fig., 1 tabl., bibliogr. (61 réf.), rés. fr. et angl.
- BESANCENOT J.P., LAAIDI K., LAAIDI M., 2002 : "Mortalité en France selon le contexte thermique : réalité présente et scénarios pour le XXI<sup>ème</sup> siècle". In : *Séminaire de restitution : Programme Gestion et Impacts du Changement Climatique (25-26 avril 2002)*. Toulouse : MATE et Médias-France, p. 81-83.
- LAAIDI M., LAAIDI K., BESANCENOT J.P., 2002 : "La relation température-mortalité en France : les possibles répercussions d'un changement climatique". In : *Abstracts. Regards croisés sur les changements climatiques (Arles 25-29 novembre 2002)*. S.l. : INRA, CNES, CNFCG, INSU, Session 5, p. 12.
- BESANCENOT J.P., 2003 : "De l'aléa météorologique à la catastrophe sanitaire : la vague de chaleur de l'été 2003 en France". *Historiens et Géographes*, Paris, ISSN 00 4675 X, n° 384, pp. 395-400, 3 fig., 1 tabl., bibliogr. (6 réf.).
- BESANCENOT J.P., 2003 : "La mortalité en France selon le contexte thermique : réalité présente et scénarios pour le XXI<sup>ème</sup> siècle". Paris : Météo-France, Conseil Supérieur de la Météorologie, 5 p., 4 fig.

- LAAIDI K., LAAIDI M., BESANCENOT J.P., *sous presse* : "Température et mortalité à Paris". *Presse Médicale*, Paris, ISSN 0755-4982, env. 10 p., 5 fig., 1 tabl., bibliogr. (18 réf.).
- LAAIDI K., LAAIDI M., BESANCENOT J.P., *sous presse* : "Temperature-related mortality in two French areas". *International Journal of Biometeorology*, Heidelberg, ISSN 0020-7128, env. 12 p., 7 fig., 2 tabl., bibliogr. (27 réf.).
- BESANCENOT J.P., LAAIDI K., LAAIDI M., *soumis pour publication* : "Température et mortalité en France : essai de différenciation spatiale et implications dans la perspective d'un changement climatique". *Population*, Paris, ISSN 0032-4663, env. 30 p., 16 fig., 8 tabl., bibliogr. (42 réf.).

## 7. Bibliographie

- Abenheim L., 2003 : *Canicules. La santé publique en question*. Paris : Fayard, 267 p.
- Alberdi J.C., Diaz J., Montero J.C., Miron I., 1998 : Daily mortality in Madrid community 1986-1992 : relationship with meteorological variables. *Eur. J. Epidemiol.*, vol. XIV, pp. 571-578.
- Albertoni F., Arca M., Borgi P., Perucci C.A., Tasco C., 1984 : Heat-related mortality. Latium region, summer 1983. *Morbidity and Mortality Weekly Report*, vol. XXXIII, n°37, pp. 518-521.
- Alderson M.R., 1985 : Season and mortality. *Health Trends*, vol. XVII, pp. 87-96.
- Alderson T.W., Le Riche W.H., 1970 : Cold weather and myocardial infarction. *Lancet*, vol. I, pp. 292-296.
- Applegate W.B., Runyan J.W., Brasfield L., Williams M.L., Konigsberg C., Fouche C., 1981 : Analysis of the 1980 heat wave in Memphis. *J. Am. Geriatr. Soc.*, vol. XXIX, n°8, pp. 337-342.
- Aubenque M., Damiani P., Massé H., 1979a : Variations saisonnières des causes de décès en France et leur évolution. *Nouv. Pr. Méd.*, vol. VIII, n°35, pp. 2846-2847.
- Aubenque M., Damiani P., Massé H., 1979b : Variations saisonnières et séries chronologiques des causes de décès en France de 1900 à 1972. *Cah. Sociol. Démogr. Méd.*, vol. XIX, n°1, pp. 17-22.
- Bainton D., Moore F., Sweetnam P., 1977 : Temperature and deaths from ischaemic heart disease. *Br. J. Prev. Soc. Med.*, vol. XXXI, pp. 49-53.
- Ballester F., Corella D., Perez-Hoyos S., Saez M., Hervas A., 1997 : Mortality as a function of temperature. A study in Valencia, Spain, 1991-1993. *Int. J. Epidemiol.*, vol. XXVI, n°3, pp. 551-561.
- Basu R., Samet J.M., 2002 : Relation between elevated ambient temperature and mortality: a review of the epidemiologic evidence. *Epidemiol. Rev.*, vol. XXIV, n°2, pp. 190-202.
- Beniston M., 2002 : Climatic change: possible impact on human health. *Swiss Med. Wkly*, vol. CXXXII, pp. 332-337.
- Bentham G., 1993 : Global environmental changes and health. In : Phillips D.R., Verhasselt Y., *Health and development*. Londres-New York : Routledge, pp. 33-49.
- Besancenot J.P., 1990a : Les fortes chaleurs sont-elles dangereuses ? *La Rech.*, vol. XXI, n°223, pp. 930-933.
- Besancenot J.P., 1990b : L'organisme humain face à la chaleur. *Sc. Chang. Planét. / Sécheresse*, vol. I, n°1, pp. 30-35 et n°2, pp. 98-104.
- Besancenot J.P., 1992 : Les vagues de chaleur meurtrières de 1987 et 1988 en Grèce. *Climat et Santé. Cah. Bioclimatol. Biométéorol. Hum.*, n°7, pp. 143-144.
- Besancenot J.P., 1995 : Vague de chaleur, pollution atmosphérique et surmortalité urbaine : l'exemple d'Athènes en juillet 1987. In : *Climat, pollution atmosphérique, santé. Hommage à Gisèle Escourrou*. Dijon : GDR Climat et Santé, pp. 47-70.
- Besancenot J.P., 1997 : Les grands paroxysmes climatiques et leurs répercussions sur la santé. *Pr. Therm. Clim.*, vol. CXXXIV, n°4, pp. 237-246.
- Besancenot J.P., 2000 : Incidences possibles du réchauffement climatique sur la santé en France métropolitaine et dans les DOM-TOM au XXI<sup>ème</sup> siècle. In : *Impacts potentiels du changement cli-*

- matique en France au XXI<sup>ème</sup> siècle*. Paris : Mission Interministérielle de l'Effet de Serre / Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, 2<sup>ème</sup> éd., pp. 111-121.
- Besancenot J.P., 2000 : La mortalité selon le contexte thermique : réalité présente et scénarios pour le XXI<sup>ème</sup> siècle. In : *Séminaire scientifique du Programme Gestion et Impacts du Changement Climatique (27-28 septembre 2000)*. Toulouse : MATE et Médias-France, p. 67.
- Besancenot J.P., 2001 : *Climat et santé*. Paris : PUF, coll. "Médecine et Société", 128 p.
- Besancenot J.P., Laaidi K., 2001 : Prévisions médico-météorologiques et gestion hospitalière. *Gestions hospital.*, n° 407, pp. 397-399.
- Besancenot J.P., 2002 : Vagues de chaleur et mortalité dans les grandes agglomérations urbaines. *Environ. Risques Santé*, vol. I, n°4, pp. 229-240.
- Besancenot J.P., Laaidi K., Laaidi M., 2002 : Mortalité en France selon le contexte thermique : réalité présente et scénarios pour le XXI<sup>ème</sup> siècle. In : *Séminaire de restitution : Programme Gestion et Impacts du Changement Climatique (25-26 avril 2002)*. Toulouse : MATE et Médias-France, pp. 81-83.
- Besancenot J.P., 2003 : De l'aléa météorologique à la catastrophe sanitaire : la vague de chaleur de l'été 2003 en France. *Hist. Géogr.*, n°384, pp. 395-400.
- Bluestein M., 1998 : An evaluation of the wind chill factor : its development and applicability. *J. Biomech. Engin.*, vol. CXX, n°2, pp. 255-258.
- Bobak M., 2000 : Cold exposure and winter mortality in Europe. *The Lancet*, vol. CCCL, p. 591.
- Boyd M., 1960 : Climate, air pollution and mortality. *Br. J. Prev. Social Med.*, vol XIV, pp. 123-135.
- Bokenes L., Alexandersen T.E., Osterud B., Tveita T., Mercer J.B., 2000 : Physiological and hæmatological responses to cold exposure in the elderly. *Int. J. Circumpolar Health*, vol. LIX, pp. 216-221.
- Braga A.L., Zanobetti A., Schwartz J., 2001 : The time course of weather related deaths. *Epidemiology*, vol. XII, pp. 662-667.
- Bridger C.A., Ellis F.P., Taylor H.L., 1976 : Mortality in St Louis, Missouri, during heat waves in 1936, 1953, 1954, and 1966 – coroner's cases. *Environ. Res.*, vol. XII, n°1, pp. 38-48.
- Brücker G., 2003 : Impact sanitaire de la vague de chaleur d'août 2003 : premiers résultats et travaux à mener. *Bull. Épidémiol. Hebdomad.*, n°45-46, p. 217.
- Buechley R.W., Van Bruggen J., Truppi L.E., 1972 : Heat island equals death island ? *Environ. Res.*, vol. V, pp. 85-92.
- Bull G.M., Morton J., 1975 : Relationship of temperature with death rates from all causes and from certain respiratory and arteriosclerotic diseases in different age groups. *Age Ageing*, vol. IV, pp. 232-246.
- Bull G.M., Morton J., 1978 : Environment, temperature and death rates. *Age Ageing*, vol. VII, pp. 210-224.
- Castel-Tallet M.A., Besancenot J.P., 1997 : Réchauffement planétaire et santé : la France au XXI<sup>ème</sup> siècle. *Presse Therm. Clim.*, vol. CXXXIV, n°4, pp. 275-283.
- Chesnut L.G., Breffle W.S., Smith J.B., Kalkstein L.S., 1998 : Analysis of differences in hot-weather-related mortality across 44 US metropolitan areas. *Environ. Sc. Policy*, vol. I, pp. 59-70.
- Choisnel E., Cohen J.C., Van Thournout A., 1987 : Weather and acute cardiovascular attacks. *Experientia*, vol. XLIII, n°1, pp. 27-32.
- Collins K.J., 1987 : Effects of cold on old people. *Br. J. Hosp. Med.*, vol. XXXVIII, pp. 506-514.
- Cordioli E., Pizzi C. Martinelli M., 2000 : Winter mortality in Emilia-Romagna, Italy. *Int. J. Circumpolar Health*, vol. LIX, pp. 164-169.
- Crawford V.L.S., McCann M., Stout R.W., 2003 : Changes in seasonal deaths from myocardial infarction. *Q. J. Med.*, vol. XCVI, pp. 45-52.

- Curriero F.C., Heiner K.S., Samet J.M., Zeger S.L., Strug L., Patz J.A., 2002 : Temperature and mortality in 11 cities of the Eastern United States. *Am. J. Epidemiol.*, vol. CLV, pp. 80-87.
- De U.S., Sinha RAY K.C., 2000 : Les conséquences du temps et du climat sur la santé dans les mégapoles. *Bull. Org. Météorol. Mond.*, vol. XLIX, n°4, pp. 375-384.
- Dessai S., 2002 : Heat stress and mortality in Lisbon. Part I. Model construction and validation. *Int. J. Biometeorol.*, vol. XLVII, n°1, pp. 6-12.
- Dessai S., 2003 : Heat stress and mortality in Lisbon. Part II. An assessment of the potential impacts of climate change. *Int. J. Biometeorol.*, vol. XLVIII, n°1, pp. 27-44.
- Díaz J., García R., Velázquez de Castro F., Hernández E., López C., Otero A., 2002 : Effects of extremely hot days on people older than 65 years in Seville (Spain) from 1986 to 1997. *Int. J. Biometeorol.*, vol. XLVI, pp. 145-149.
- Djoucouré D., 1993 : La relation mortalité-météorologie : détermination d'un seuil critique de température et mise au point d'un système de prévision de la surmortalité estivale. *Climat et Santé. Cah. Bioclimatol. Biométéorol. Hum.*, n°10, pp. 129-135.
- Donaldson G.C., Keatinge W.R., 1997 : Early increase in ischaemic heart disease mortality dissociated from and later changes associated with respiratory mortality after cold weather in south east England. *J. Epidemiol. Community Health*, vol. LI, pp. 643-648.
- Driscoll D.M., 1971 : The relationship between weather and mortality in ten major metropolitan areas in the United States, 1962-1965. *Int. J. Biometeorol.*, vol. XV, n°1, pp. 23-39.
- Dunningan M.G., Harland W.A., Fyfe T., 1970 : Seasonal incidence and mortality of ischaemic heart-disease. *Lancet*, vol. ii, pp. 793-796.
- Ellis F.P., 1972 : Mortality from heat illness and heat-aggravated illness in the United States. *Environ. Res.*, vol. V, n°1, pp. 1-58.
- Ellis F.P., 1976 : Heat illness. I. Epidemiology. *Trans. R. Soc. Trop. Med. Hyg.*, vol. LXX, n°5-6, pp. 402-425.
- Ellis F.P., Nelson F., Pincus L., 1975 : Mortality during heat waves in New York City July, 1972 and August and September, 1973. *Environ. Res.*, vol. X, n°1, pp. 1-13.
- Escourrou P., 1978 : Chaleur et mortalité. *Bull. Sect. Géogr.*, vol. LXXXIII, n°2, pp. 59-73.
- Escourrou P., 1987 : Les hivers froids en Île-de-France et leurs conséquences médicales. *Cah. Centre Rech. Climatol. Hydrol. Appl.*, n°2, pp. 18-24.
- Eurowinter group, 1997 : Cold exposure and winter mortality from ischaemic disease, cerebrovascular disease, respiratory disease, and all causes in warm and cold regions of Europe. *The Lancet*, vol. CCCIL, pp. 1341-1346.
- Gaffen D.J., Ross R.J., 1998 : Increased summertime heat stress in the US. *Nature*, vol. CCCXLVI, pp. 529-530.
- Garneret I., 1988 : La mort qui venait du froid. *Le Généraliste*, n°980, pp. 33-34.
- Gawith M.J., Downing T.E., Karacostas T.S., 1999 : Heatwaves in a changing climate. In : Downing T.E., Olsthoorn A.J., Tol R.S.J., *Climate change and risk*. Londres : Routledge, pp. 279-307.
- Gouveia N., Hajat S., Armstrong B., 2003 : Socio-economic differentials in the temperature-mortality relationship in Sao Paulo, Brazil. *Int. J. Epidemiol.*, vol. XXXII, pp. 390-397.
- Green M.S., Harari G., Kristal-Boneh E., 1994 : Excess winter mortality from ischaemic heart disease and stroke during colder and warmer years in Israel : an evaluation and review of environmental temperature. *Eur. J. Publ. Health*, vol. IV, n°1, pp. 3-11.
- Hauleitner H., 1977 : Die Abhängigkeit der Sterblichkeit vom örtlichen Temperatur-Feuchte-Milieu. *Wetter und Leben*, vol. XXIX, n°1, pp. 26-34.
- Hémon D., Jouglé E., 2003 : *Surmortalité liée à la canicule d'août 2003. Rapport d'étape. I. Estimation de la surmortalité et principales caractéristiques épidémiologiques*, Rapport remis au Ministre de la Santé, des Affaires Sociales et des Personnes Handicapées, Paris : INSERM, 59 p.

- Hémon D., Jouglu E., Clavel J., Laurent F., Bellec S., Pavillon G., 2003 : Surmortalité liée à la canicule d'août 2003 en France. *Bull. Épidémiol. Hebdomad.*, n°45-46, pp. 221-225.
- Herity B., Daly L., Bourke G.J., Horgan J.M., 1991 : Hypothermia and mortality and morbidity. An epidemiological analysis. *J. Epidemiol. Community Health*, vol. XLV, pp. 19-23.
- Housworth J., Langmuir A.D., 1974 : Excess mortality from epidemic influenza. *Am. J. Epidemiol.*, vol. C, n°1, pp. 40-48.
- Howe G.M., 1962 : Windchill, absolute humidity and the cold spell of Christmas 1961. *Weather*, vol. XVII, pp. 349-358.
- Huynen M.M.T.E., Martens P., Schram D., Weijenberg M.P., Kunst AE, 2001 : The impact of heat waves and cold spells on mortality rates in the Dutch population. *Environ. Health Perspect.* Vol. CIX, pp. 463-470.
- InVS, 2003 : *Impact sanitaire de la vague de chaleur en France survenue en août 2003. Rapport préliminaire*. Saint-Maurice : Institut de Veille Sanitaire, Département des Maladies Chroniques et Traumatismes, Département Santé Environnement, 75 p.
- Jones T.S., Liang A.P., Kilbourne E.M., Griffin M.R., Patriarca P.A., Fite-Wassilak S.G., Mullan R.J., Herrick R.F., Donnell H.D., Choi K., Thacker S.B., 1982 : Morbidity and mortality associated with the July, 1980 heat wave in St Louis and Kansas City, Mo. *JAMA*, vol. CCXLVII, n°24, pp. 3327-3331.
- Jovenin N., Novella J.L., Ankri J., Dramé M., Gauvain J.B., Couturie P., Blain H., Voisin T., Heitz D., Gonthier R., De Wazières R., Somme D., Jeandel C., Colvez A., Jolly D., Saint-Jean O., Blanchard F., 2003 : Extreme frailty and mortality among hospitalised patients over 75: results from a cohort study of 1306 patients. *J. Am. Geriatr. Soc.*, in press.
- Kaciuba-Uscilko H., Grucza R., 2001 : Gender differences in thermoregulation. *Curr. Opin. Clin. Nutr. Metab. Care*, vol IV, pp. 533-536.
- Kalkstein L.S., 1991 : A new approach to evaluate the impact of climate on human mortality. *Environ. Health Persp.*, vol. XCVI, pp. 145-150.
- Kalkstein L.S., 1993 : Health and climate change : direct impact in cities. *Lancet*, vol. CCCXLII, pp. 1397-1399.
- Kalkstein L.S., 1995 : Lessons from a very hot summer. *Lancet*, vol. CCCXLVI, pp. 857-859.
- Kalkstein L.S., 2000 : Saving lives during extreme weather in summer. *Br. Med. J.*, vol. CCCXXI, n°7262, pp. 650-651.
- Kalkstein L.S., Valimont K.M., 1986 : An evaluation of summer discomfort in the United States using a relative climatological index. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. LXVII, pp. 842-848.
- Kalkstein L.S., Davis R.E., 1989 : Weather and human mortality : an evaluation of demographic and interregional responses in the United States. *Ann. Ass. Amer. Geogr.*, vol. LXXIX, n°1, pp. 44-64.
- Kalkstein L.S., Smoyer K.E., 1993 : The impact of a global climate change on human health: some international implications ". *Experientia*, vol. XLIX, pp. 969-979.
- Kalkstein L.S., Tan G., 1995 : Human health. In : Strzepek K.M., Smith J.B., *As climate changes: international impacts and implications*. Cambridge : Cambridge University Press, pp. 124-145.
- Kalkstein L.S., Jamason P.F., Greene J.S., Libby J., Robinson L., 1996 : The Philadelphia Hot Weather-Health Watch/Warning System : development and application, summer 1995. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, pp. 1519-1528.
- Kalkstein L.S., Green J.S., 1997 : An evaluation of climate/mortality relationships in large US cities and the possible impact of climate change. *Environ. Health Persp.*, vol. CV, pp. 84-93.
- Kandel R., 2002 : *Le réchauffement climatique*. Paris : PUF, 128 p.
- Katsouyanni K., Pantazopoulou A., Touloumi G., Tselepidaki I., Moustris K., Asimakopoulos D., Pouloupoulou G., Trichopoulos D., *et al.*, Evidence for interaction between air pollution and high temperature in the causation of excess mortality. *Arch. Environ. Health*, vol. XLVIII, pp. 235-242.

- Katsouyanni K., Trichopoulos D., Zavitrinos X., Touloumi G., 1988 : The 1987 Athens heatwave. *Lancet*, vol. CCCXXXII, n°8610, p. 573.
- Keatinge W.R., Coleshaw S.R.K., Holmes J., 1989 : Changes in seasonal mortalities with improvement in home heating in England and Wales from 1964 to 1984. *Int. J. Biometeorol.*, vol. XXXIII, n°2, pp. 71-76.
- Keatinge W.R., Oakley E.H.N., Steel A.P.H., 1994 : Heat and cold. In : Raffle P.A.B., Adams P.H., Baxter P.J., Lee W.R., *Hunter's Diseases of occupation*. Londres : Edward Arnold, pp. 307-326.
- Keatinge WR, Donaldson GC, Bucher K, Cordioli E, Dardanoni L, Jendritzky G. et al., 1997 : Cold exposure and winter mortality from ischaemic heart disease, cerebrovascular disease, respiratory disease, and all causes in warm and cold regions of Europe. *Lancet*, vol. CCCIL, pp. 1341-1346.
- Keatinge W., Donaldson G.C., Cordioli E., Martinelli M., Kunst A.E., Mackenbach J., Nayha S., Vuori I., 2000 : Heat related mortality in warm and cold regions of Europe: observational study. *Br. Med. J.*, vol. CCCXXI, n°7262, pp. 670-673.
- Keatinge W.R., 2002 : Winter mortality and its causes. *Int. J. Circumpolar Health*, vol. LXI, pp. 292-299.
- Khaw K.T., 1995 : Temperature and cardiovascular mortality. *Lancet*, vol. CCCXLV, pp. 337-338.
- Kilbourne E.M., 1986 : Illness due to thermal extremes. In : J.M. Last. *Maxcy-Rosenau public health and preventive medicine*, 12<sup>th</sup> ed. Norwalk, Appleton-Century Crofts, pp. 703-714.
- Kilbourne E.M., Choi K., Jones T.S., Thacker S.B., 1982 : Risk factors for heatstroke. A case-control study. *JAMA*, vol. CCXLVII, n°24, pp. 3332-3336.
- Kilbourne E.M., 1997 : Heat waves and hot environments. In : Noji E.J., ed. *The public health consequences of disasters*. Oxford : Oxford University Press, pp. 245-269.
- Kunst A.E., Looman C.W.N., Mackenbach J.P., 1993 : Outdoor air temperature and mortality in the Netherlands: a time-series analysis. *Am. J. Epidemiol.*, vol. CXXXVII, n°3, pp. 331-341.
- Kunst A.E., Groenhouf F., Mackenbach J.P., 1994 : The association between two windchill indices and daily mortality variation in the Netherlands. *Am. J. Publ. Health*, vol. LXXXIV, n° 11, pp. 1738-1742.
- Laaidi K., Laaidi M., Besancenot J.P., 2003 : Temperature-related mortality in Paris, France. *J.* , in press.
- Laaidi K., Minier D., Osseby G.V., Couvreur G., Besancenot J.P., Moreau T., Giroud M., 2004 : Variation saisonnière des accidents vasculaires cérébraux et influence des conditions météorologiques. *Rev Neurol.*, vol. CLX, n°3, pp. 321-330.
- Laaidi M., Laaidi K., Besancenot J.P., 2002 : La relation température-mortalité en France : les possibles répercussions d'un changement climatique. In : *Abstracts. Regards croisés sur les changements climatiques (Arles 25-29 novembre 2002)*. S.I. : INRA, CNES, CNFCG, INSU, Session 5, p. 12.
- Langford I.H., Bentham G., 1995 : The potential effects of climate change on winter mortality in England and Wales. *Int. J. Biometeorol.*, vol. XXXVIII, n°3, pp. 141-147.
- Lanska D.J., Hoffmann R.G., 1999 : Seasonal variation in stroke mortality rates. *Neurolog*, vol. LII, pp. 984-990.
- Le Berre M., Chamussy H., Charre J., Lamontagne F., Martin S., Peguy C.P., Risser V., Saintignon M.F. de, 1982 : Climat et mortalité. Modélisation statistique de la relation climat-mortalité en France de 1949 à 1977. *Esp. Géogr.*, vol. XI, n°3, pp. 176-181.
- Lee D.H.K., 1980 : Seventy-five years of searching for a heat index. *Environ. Res.*, vol. XXII, pp. 331-356.
- Lerchl A., 1998 : Changes in seasonality of mortality in Germany from 1946 to 1995 : the role of temperature. *Int. J. Biometeorol.*, vol. XLII, n°2, pp. 84-88.
- Macey S.M., Schneider D.F., 1993 : Deaths from excessive heat and excessive cold among the elderly. *Gerontologist*, vol. XXXIII, pp. 497-500.

- Macfarlane A., 1976 : Daily deaths in Greater London. *Popul. Trends*, vol. V, pp. 20-25.
- Mackenbach J.P., Looman C.W.N., Kunst A.E., 1993 : Air pollution, lagged effects of temperature and mortality: The Netherlands 1979-87. *J. Epidemiol. Comm. Health*, vol. XLVII, pp. 121-126.
- MacKenzie M., 2000 : Cold exposure and winter mortality in Europe. *The Lancet*, vol. CCCL, pp. 590-591.
- Marmor M., 1975 : Heat wave mortality in New York City, 1949 to 1970. *Arch. Environ. Health*, vol. XXX, pp. 130-136.
- Martens P., 1998 : *Health and climate change. Modelling the impacts of global warming and ozone depletion*. London : Earthscan, 176 p.
- Martens W.J.M., 1998 : Climate change, thermal stress and mortality changes. *Soc. Sc. Med.*, vol. XLVI, n°3, pp. 331-344.
- Martinez B.F., Annett J.L., Kilbourne E.M., Kirk M.L., Lui K.J., Smith S.M., 1989 : Geographic distribution of heat-related deaths among elderly persons. *JAMA*, vol. CCCXII, pp. 2246-2250.
- Matzarakis A., Mayer H., 1991 : The extreme heat wave in Athens in July 1987 from the point of view of human biometeorology. *Atm. Environ.*, vol. XXV B, n°2, pp. 203-211.
- McDowall M., 1981 : Long term trends in seasonal mortality. *Popul. Trends*, vol. XXVI, pp. 16-19.
- McGeehin M.A., Mirabelli M., 2001 : The potential impacts of climate variability and change on temperature-related morbidity and mortality in the United States. *Environ. Health Perspect.*, vol. CIX, suppl. 2, pp. 185-189.
- McMichael A.J., 1993 : Global environmental change and human population health : a conceptual and scientific challenge for epidemiology. *Int. J. Epidemiol.*, vol. XXII, n°1, pp. 1-8.
- McMichael A.J., Haines A., 1997 : Global climate change : the potential effects on health. *Br. Med. J.*, vol. CCCXV, pp. 805-809.
- McMichael A., Githeko A., 2001 : Human health. In : J.J. McCarthy, O.F. Canziani, N.A. Leary *et al.*, *Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability*. Cambridge : Cambridge University Press, pp. 451-485.
- Mercer J.B. , 2003 : Cold - an underrated risk factor for health. *Environ. Res.*, vol. XCII, pp. 8-13.
- Michelozzi P., Fano V., Forastiere F., Barca A., Kalkstein L.S., Perucci C.A., 2000 : Les conditions météorologiques et la mortalité des personnes âgées à Rome en été. *Bull. Org. Météorol. Mond.*, vol. XLIX, n°4, pp. 384-391.
- Muggeo V.M.R., Vigotti M.A., 2002 : Modelling trend in break-point estimation: an assessment of the heat tolerance and temperature effects in four Italian cities. In : *Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Workshop on Statistical Modelling*, pp. 493-500.
- Obasi G.O.P., 1999 : *Le temps, le climat et la santé*. Genève : Organisation Météorologique Mondiale, 36 p.
- Oechli F.W., Buechley R.W., 1970 : Excess mortality associated with three Los Angeles September hot spells. *Environ. Res.*, vol. III, pp. 277-284.
- Oke T.R., 1973 : City size and the urban heat island. *Atmosph. Environ.*, Oxford, vol. VII, pp. 769-779.
- O'Neill M.S., Zanobetti A., Schwartz J., 2003 : Modifiers of the temperature and mortality association in seven US cities. *Am. J. Epidemiol.*, vol. CLVII, pp. 1074-1082.
- Ostro B., 1993 : The association of air pollution and mortality : examining the case for inference. *Arch. Environ. Health*, vol. XLVIII, n°5, pp. 336-342.
- Pagney P., 1994 : *Les catastrophes climatiques*. Paris : PUF, 128 p.
- Pan W.H., Li L.A., Tsai M.J., 1995 : Temperature extremes and mortality from coronary heart disease and cerebral infarction in elderly Chinese. *Lancet*, vol. CCCXLV, n°8946, pp. 353-355.
- Petit M., 2003 : *Qu'est-ce que l'effet de serre ? Ses conséquences sur l'avenir du climat*. Paris : Vuibert, 128 p.
- Robinson P.J., 2000 : On the definition of a heat wave. *J. Appl. Meteorol.*, vol. XL, pp. 762-775.

- Rodhain F., 1998 : Impacts sur la santé : le cas des maladies à vecteurs. In : *Impacts potentiels du changement climatique en France au XXI<sup>ème</sup> siècle*. Paris : Mission Interministérielle de l'Effet de Serre / Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, 2<sup>ème</sup> éd., pp. 122-127.
- Rogot E., 1974 : Associations between coronary mortality and the weather, Chicago, 1967. *Publ. Health Rep.*, vol. LXXXIX, n°4, pp. 330-338.
- Rooney C., McMichael J., Kovats R.S., Coleman M.P., 1998 : Excess mortality in England and Wales, and in Greater London, during the 1995 heatwave. *J. Epidemiol. Community Health*, vol. LII, pp. 482-486.
- Royer C., 2003 : *Biométéorologie de l'infarctus du myocarde. Données de l'Observatoire des Infarctus de Côte-d'Or (RICO)*. Dijon : Faculté de Médecine, Climat & Santé, Thèse Médecine.
- Saez M., Sunyer J., Castellsaguè J., Murillo C., Antò J.M., 1995 : Relationship between weather and temperature and mortality: a time series analysis approach in Barcelona. *Int. J. Epidemiol.*, vol. XXIV, n°3, pp. 576-582.
- Sakamoto-Momiyama M., Katayama K., 1971 : Statistical analysis of seasonal variation in mortality. *J. Meteorol. Soc. Japan*, vol. XLIX, n°6, pp. 494-508.
- Sartor F., Snacken R., Demuth C., Walckiers D., 1995 : Temperature, ambient ozone levels, and mortality during summer 1994, in Belgium. *Environ. Res.*, vol. LXX, pp. 105-113.
- Sartor F., Demuth C., Snacken R., Walckiers D., 1997 : Mortality in the elderly and ambient ozone concentration during the hot summer, 1994, in Belgium. *Environ. Res.*, vol. LXXII, pp. 109-117.
- Semenza J.C., Rubin C.H., Falter K.H., Selanikio J.D., Flanders W.D., Howe H.L., Wilhelm J.L., 1996 : Heat-related deaths during the July 1995 heat wave in Chicago. *N. Engl. J. Med.*, vol. CCCXXXV, pp. 84-90.
- Shumway R.H., Azari A.S., Pawitan Y., 1988 : Modeling mortality fluctuations in Los Angeles as functions of pollution and weather effects. *Environ. Res.*, vol. XLV, pp. 224-241.
- Simonet J., 1985 : *Vague de chaleur de juillet 1983. Étude épidémiologique et physiopathologique*. Thèse Médecine, Université Marseille, 161 p.
- Siple P.A., Passel Ch.F., 1945 : Measurements of dry atmospheric cooling in subfreezing temperatures. *Proc. Am. Philosoph. Soc.*, vol. LXXXIX, n°1, pp. 177-199.
- Smoyer K.E., 1998 : Putting risk in its place: methodological considerations for investigating extreme event health risk. *Soc. Sci. Med.*, vol. XLVII, pp. 1809-1824.
- Steadman R.G., 1979 : The assessment of sultriness. Part I. A temperature-humidity index based on human physiology and clothing science. *J. Appl. Meteorol.*, vol. XVIII, pp. 861-873.
- Tanaka M., Tokudomé S., 1991 : Accidental hypothermia and death from cold in urban areas. *Int. J. Biometeorol.*, vol. XXXIV, pp. 242-246.
- Tillaut H., Ravault C., Rambourg M.O., Pascal M., 2003 : Vague de chaleur et santé : revue bibliographique. *Bull. Épidémiol. Hebdomad.*, n°45-46, pp. 218-219.
- Thirion X., 1992 : La vague de chaleur de juillet 1983 à Marseille : enquête sur la mortalité, essai de prévention. *Santé Publ.*, vol. IV, pp. 58-64.
- Thom E.C., 1959 : The discomfort index. *Weatherwise*, vol. XII, n°1, pp. 57-60.
- Vandentorren S., Suzan F., Pascal M., Maulpoix A., Medina S., 2003 : Données météorologiques et enquêtes sur la mortalité dans 13 grandes villes françaises. *Bull. Épidémiol. Hebdomad.*, n°45-46, pp. 219-220.
- Vuori I., 1987 : The heart and the cold. *Ann. Clin. Res.*, vol. XIX, pp. 156-162.
- West R.R., Lowe C.R., 1976 : Mortality from ischæmic heart disease: inter-town variation and its association with climate in England and Wales. *Int. J. Epidemiol.*, vol. V, n°2, pp. 195-201.
- Whitman S., Good G., Donoghue E.R., Benbow N., Shou W., Mou S., 1997 : Mortality in Chicago attributed to the July 1995 heat wave. *Am. J. Publ. Health*, vol. LXXXVII, n°9, pp. 1515-1518.
- Wilson M.E., Levins R., Spielman A., 1994 : *Disease in evolution. Global changes and emergence of infectious diseases*. New York : New York Academy of Sciences, *Annals* n°740, 503 p.

X., 1984 : Heat associated mortality – New York City. *Morbid. Mortal. Weekly Rep.*, vol. XXXIII, pp. 430-432.

X., 1995 : Heat-related mortality – Chicago, July, 1995. *Morbid. Mortal. Weekly Rep.*, vol. XLIV, n°31, pp. 577-579.

Zauli Sajani S., Garaffoni G., Goldoni C.A., Ranzi A., Lauriola P., 2002 : Mortality and bioclimatic discomfort in Emilia-Romagna, Italy. *J. Epidemiol. Community Health*, vol. LVI, pp. 536-537.

## **8. Disponibilité des données : sont-elles organisées en banque de données ?**

Les données sont organisées en banque de données au Laboratoire Climat & Santé, où elles peuvent être réutilisées pour d'autres recherches. La législation interdit de les mettre en ligne, pour des raisons de confidentialité. Toute demande de consultation sur place sera satisfaite, après obtention du double accord du *Comité consultatif sur le traitement de l'information en matière de recherche dans le domaine de la santé* (Ministère de la Recherche) et de la *Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés* (CNIL).

## **9. Dans tous les résultats obtenus, mention du ou des résultats qui mériteraient d'être valorisés dans le site Internet GICC**

- 1) Existence d'une relation température-mortalité suivant une courbe en "U" plus ou moins dissymétrique, avec existence d'un optimum thermique souvent bien marqué, spécialement chez les personnes âgées. Mais, toutes choses égales par ailleurs, cet optimum se situe à un niveau d'autant plus élevé qu'est considéré un climat plus chaud.
- 2) Un réchauffement uniforme dans le temps comme dans l'espace – simple hypothèse d'école, mais par laquelle il est indispensable de passer – se traduirait par une diminution du nombre de jours inférieurs à l'optimum et par une augmentation du nombre de jours supérieurs à ce même optimum. Compte tenu de la pente plus forte de la courbe température-mortalité du côté des fortes chaleurs, la mortalité générale pourrait s'en trouver légèrement accrue, notamment à Paris et dans le Midi méditerranéen. Mais la répercussion la plus franche serait une inversion du rythme annuel de la mortalité, avec passage de l'actuelle surmortalité d'hiver à une franche surmortalité d'été. Un relèvement thermique de 2,5°C serait suffisant pour entraîner une telle inversion. Encore le développement de phénomènes d'adaptation est-il susceptible de neutraliser ou, à tout le moins, de ralentir cette évolution.
- 3) Le plus inquiétant pour l'avenir réside sans aucun doute dans la multiplication des paroxysmes thermiques, canicules et grandes vagues de froid – ces dernières n'étant nullement incompatibles avec un réchauffement "moyen". Dans ce cas, il faut s'attendre à de dramatiques épisodes de surmortalité, à l'image de ce que la France a vécu, par exemple, durant l'hiver 1985 ou l'été 2003.

## Table des matières

Remerciements .....	2.
1. Introduction : les objectifs initiaux du projet, la place de ce projet dans le contexte scientifique général .....	3.
2. Résumé étendu .....	5.
<i>Abstract</i> .....	7.
3. Les données mises en œuvre et la méthodologie utilisée .....	9.
4. Les résultats .....	15.
A. La réalité et la nature d'une dépendance entre température et mortalité .....	15.
B. La dépendance entre température et mortalité n'est pas uniforme .....	21.
1. Selon l'âge .....	21.
2. Selon le sexe .....	24.
3. Selon la cause de décès .....	25.
a) Les cardiopathies ischémiques .....	26.
b) Les maladies cérébrovasculaires .....	28.
c) Les autres maladies de l'appareil circulatoire .....	30.
d) Les maladies de l'appareil respiratoire, à l'exception de la grippe .....	31.
4. Selon les autres paramètres météorologiques .....	34.
C. Implications dans la perspective de l'évolution du climat .....	37.
5. Conclusion .....	41.
6. Valorisation des résultats .....	42.
7. Bibliographie .....	44.
8. Disponibilité des données : sont-elles organisées en banque de données ? .....	52.
9. Dans tous les résultats obtenus, mention du ou des résultats qui mériteraient d'être valorisés dans le site Internet GICC .....	52.
Table des matières .....	53.