

Vers une modélisation jointe de l'impact de plusieurs facteurs climatiques sur la mortalité

Application: modélisation jointe des températures et de la pollution de l'air

Jeanne Bessiere
Tinhinane Talbi
Eve Titon



Les risques climatiques sont couramment étudiés séparément et l'impact de chacun de ces risques sur la mortalité, indépendamment de celui des autres. Pourtant, ils sont interconnectés et présentent des synergies. Dans cet article, les interactions entre les principaux facteurs climatiques qui affectent la mortalité en France sont détaillées, puis une modélisation permettant d'évaluer l'impact joint des températures et de la pollution de l'air sur l'espérance de vie est proposée. Les espérances de vie obtenues par le modèle joint sont ensuite projetées selon plusieurs scénarios climatiques, afin d'étudier les différences avec des projections tenant compte de chacun des facteurs climatiques indépendamment les uns des autres.

Les risques climatiques, à savoir la possibilité d'effets négatifs sur les écosystèmes, les populations, les infrastructures ou l'économie résultant du changement climatique affectent la mortalité. Tandis que les phénomènes climatiques extrêmes (inondations, canicules, pic de froid, cyclones...) peuvent causer des vagues de décès, les effets chroniques du changement climatique, à l'image de la propagation des maladies, l'élévation du niveau des océans, l'augmentation des températures ou de la pollution aggravent également la vulnérabilité des populations. En France métropolitaine, la pollution de l'air, les températures extrêmes et la transmission de maladies vectorielles sont les conséquences du changement climatique qui menacent de causer le plus d'impact sur la mortalité.

De nombreuses recherches sont déjà consacrées à l'estimation de l'impact d'un risque climatique précis sur la mortalité. La relation température-mortalité est décrite en forme de U ou de $V^{1,2,3}$: les hautes et basses températures accroissent la mortalité, tandis qu'à l'optimum thermique⁴, la mortalité est minimale. Les vagues de chaleur, de plus en plus fréquentes et intenses, ont un effet immédiat sur le nombre de décès, en particulier au sein des populations vulnérables. Les impacts du froid sur la mortalité, observés dès une faible déviation de l'optimum thermique, sont moins sévères mais plus persistants⁵. Ils se manifestent dans les 2 à 21 jours suivants l'épisode et sont sans effet moisson⁶. La pollution de l'air quant à elle, aggrave et provoque des

1. KUNST, Anton E., LOOMAN, Casper WN, et MACKENBACH, Johan P. Outdoor air temperature and mortality in the Netherlands: a time-series analysis. *American Journal of epidemiology*, 1993, vol. 137, no 3, p. 331-341. Available at: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=cb4a52362ef0ae5e925d6de718ea6ecb0fe67994> [Accessed 7 January 2025].
2. BALLESTER, Ferran, CORELLA, Dolores, PÉREZ-HOYOS, Santiago, et al. Mortality as a function of temperature. A study in Valencia, Spain, 1991-1993. *International journal of epidemiology*, 1997, vol. 26, no 3, p. 551-561. Available at: <https://academic.oup.com/ije/article-abstract/26/3/551/742170?redirectedFrom=PDF&login=false> [Accessed 7 January 2025].
3. PATTENDEN, S., NIKIFOROV, B., et ARMSTRONG, B. G. Mortality and temperature in Sofia and London. *Journal of Epidemiology & Community Health*, 2003, vol. 57, no 8, p. 628-633. Available at: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC1732532/pdf/v057p00628.pdf> [Accessed 7 January 2025].

4. Température pour laquelle la mortalité associée est minimale.
5. CORSO, M., PASCAL, M., et WAGNER, V. Impacts de la chaleur et du froid sur la mortalité totale en France entre 2000 et 2010. *Bull. Épidémiol. Hebd.*, 2017, vol. 31, p. 634-40. Available at: <https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/climat/fortes-chaleurs-canicule/documents/article/impacts-de-la-chaleur-et-du-froid-sur-la-mortalite-totale-en-france-entre-2000-et-2010> [Accessed 7 January 2025].
6. ANALITIS, Antonis, KATSOUYANNI, Klea, BIGGERI, Annibale, et al. Effects of cold weather on mortality: results from 15 European cities within the PHEWE project. *American journal of epidemiology*, 2008, vol. 168, no 12, p. 1397-1408. Available at: <https://academic.oup.com/aje/article-abstract/168/12/1397/155356?redirectedFrom=PDF&login=false> [Accessed 7 January 2025].

pathologies cardiovasculaires, respiratoires⁷, les allergies⁸ et le diabète⁹. Enfin, le changement climatique facilite l'expansion géographique des vecteurs comme les moustiques, tiques et puces, augmentant la propagation de maladies telles que la dengue¹⁰, la borréliose de Lyme et l'encéphalite à tiques. Ces maladies, parfois mortelles représentent un risque croissant pour la santé publique.

Interactions entre les facteurs climatiques et impact sur la mortalité

Les risques climatiques sont couramment étudiés séparément et leur impact sur la mortalité est estimé indépendamment de celui des autres. Pourtant, ils sont interconnectés et présentent des synergies. En particulier, le phénomène d'augmentation des températures amplifie celui de concentration et d'émission de la pollution. Les températures élevées intensifient l'émission de polluants primaires et secondaires qu'ils soient d'origine naturelle, comme les feux de forêt en période de sécheresse, ou anthropique, à travers l'usage accru de climatisation¹¹. Elles favorisent également les réactions chimiques responsables de la formation de polluants secondaires tels que l'ozone troposphérique, tout en créant des conditions de stagnation atmosphérique, empêchant leur dispersion et favorisant leur concentration. En retour, la pollution atmosphérique influence le climat de manière complexe. Certains polluants, comme le carbone noir et l'ozone, accentuent le réchauffement en absorbant les radiations, tandis que d'autres, tels que les aérosols de sulfates et les nitrates, refroidissent l'atmosphère en réfléchissant la lumière solaire¹². Ainsi, la baisse des émissions polluantes pourrait paradoxalement intensifier le réchauffement climatique. Enfin, l'augmentation des températures modifie la transmission des maladies vectorielles en influençant à la fois les vecteurs (comme les moustiques) et les agents pathogènes qu'ils transportent. Les températures chaudes accélèrent la reproduction et le développement des vecteurs, prolongent leur période d'activité, et étendent leur présence géographique. Elles réduisent aussi la période d'incubation du pathogène dans le vecteur. Les conditions climatiques extrêmes peuvent par ailleurs

affaiblir les systèmes immunitaires, rendant les organismes plus sensibles aux infections. Ainsi, le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) prévoit que "les risques liés à certaines maladies à transmission vectorielle, telles que le paludisme et la dengue, [. . .] augmente[ront] avec un réchauffement de 1.5°C à 2°C", avec un "degré de confiance élevé".¹³

Ainsi, il semble essentiel de tenir compte des interactions entre les facteurs climatiques afin d'éviter d'une part un double-comptage des décès dans certains cas, et de capter des effets cocktails d'autre part.

Quelles modélisations sont possibles ?

Les modélisations couramment retenues pour étudier l'impact individuel d'un risque climatique sur la mortalité sont les modèles linéaires généralisés (GLM), les modèles additifs généralisés (GAM) et le modèle à risque proportionnel de Cox. On propose habituellement de modifier des modèles individuels pour prendre en compte des effets croisés entre les variables climatiques.

AJOUTER UN TERME D'INTERACTION

Afin d'identifier l'effet joint de deux expositions sur une issue d'intérêt, une pratique courante consiste à ajouter un terme croisé dans le modèle.

Soit X_1, X_2 deux variables explicatives climatiques, il s'agit d'ajouter une fonction dépendant simultanément de X_1 et de X_2 dans le modèle afin d'estimer une interaction.

Modèle de Cox

Il permet d'estimer la durée jusqu'à un événement (comme le décès), en contrôlant pour des facteurs confondants tels que l'âge, le sexe et d'autres variables susceptibles d'influencer la mortalité. Le taux de risque instantané de décès est donné par :

$$h(t|X) = h_0(t)e^{\beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{1,2} X_1 X_2}$$

Avec t le temps, $h_0(t)$ le taux de risque de base i.e. lorsque toutes les variables explicatives sont nulles et β_i les coefficients à estimer.

7. GOLDBERG, Mark. A systematic review of the relation between long-term exposure to ambient air pollution and chronic diseases. *Reviews on environmental health*, 2008, vol. 23, no 4, p. 243-298.

8. BERGER, Markus, BASTL, Maximilian, BOUCHAL, Johannes, et al. The influence of air pollution on pollen allergy sufferers. *Allergologie select*, 2021, vol. 5, p. 345. Available at: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8638356/> [Accessed 7 January 2025].

9. NICOLLE-MIR, Laurence. Association entre la pollution atmosphérique et le diabète de type 2 à Leicester, Royaume-Uni. *Environnement, Risques & Santé*, 2018, vol. 17, no 1, p. 8-9.

10. BOUZID, Maha, COLÓN-GONZÁLEZ, Felipe J., LUNG, Tobias, et al. Climate change and the emergence of vector-borne diseases in Europe: case study of dengue fever. *BMC public health*, 2014, vol. 14, p. 1-12. Available at: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1186/1471-2458-14-781.pdf> [Accessed 7 January 2025].

11. World Meteorological Organization. *Air Quality and Climate Bulletin No. 4*. Geneva: World Meteorological Organization, 2024. Available at: <https://library.wmo.int/records/item/69006-no-4-september-2024> [Accessed 7 January 2025].

12. GAO, Jiyuan, YANG, Yang, WANG, Hailong, et al. Fast climate responses to emission reductions in aerosol and ozone precursors in China during 2013–2017. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2022, vol. 22, no 11, p. 7131-7142. Available at: <https://acp.copernicus.org/articles/22/7131/2022/acp-22-7131-2022.pdf> [Accessed 7 January 2025].

13. MASSON-DELMOTTE, Valérie, ZHAI, Panmao, PÖRTNER, Hans-Otto, et al. *Global Warming of 1.5 C: IPCC special report on impacts of global warming of 1.5 C above pre-industrial levels in context of strengthening response to climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Cambridge University Press, 2022.

Ce modèle fait néanmoins l'hypothèse forte de la proportionnalité des risques i.e. l'effet des variables explicatives doit être constant dans le temps. Il requiert aussi une base de données détaillée sur les caractéristiques personnelles des individus (statut socio-économique, fumeur, âge...).

Modèle Linéaire Généralisé

Un *Generalized Linear Model* (GLM) est une extension des modèles linéaires. Dans un modèle linéaire, la variable réponse Y est une combinaison linéaire des prédicteurs X . Dans un GLM, ce n'est plus la relation entre X et Y qui est linéaire, mais la relation entre X et la transformation de Y par la fonction de lien g .

Le modèle est :

$$g(E[Y]) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{1,2} X_1 X_2$$

Avec g la fonction de lien, Y la variable réponse (le nombre de décès) dont la distribution est issue de la famille exponentielle et β_i les coefficients à estimer.

Modèle Additif Généralisé

Un *Generalized Additive Model* (GAM) est une extension d'un GLM qui permet d'expliquer de manière non linéaire la relation entre la transformation par la fonction de lien g de la variable dépendante Y (le nombre de décès) et les variables explicatives X_i . Le modèle est :

$$g(E[Y]) = \beta_1 f_1(X_1) + \beta_2 f_2(X_2) + \beta_{1,2} f_{1,2}(X_1, X_2)$$

Avec g la fonction de lien, Y le nombre de décès, f_i des fonctions lisses et β_i les coefficients à estimer.

Les GAM offrent une grande flexibilité, notamment en permettant des relations non linéaires entre les variables, au prix d'une certaine complexité du modèle.

CONSTRUIRE UN INDEX CLIMATIQUE COMPOSITE

Une autre approche est d'utiliser un Lee Carter Climatique¹⁴. Le modèle est :

$$\ln(\mu_{x,t}) = \alpha_x + \beta_x \kappa_t + \delta_x C_t$$

Avec x l'âge, μ le taux de mortalité et α et β les paramètres du Lee Carter.

C_t est un index climatique, i.e. il s'agit d'une combinaison d'indicateurs climatiques tels que des fréquences de dépassement de seuil (de température, de pollution) ou des cumuls d'exposition. L'index C_t est ensuite régressé sur l'excès de décès, permettant d'estimer le coefficient δ . Si ce modèle a

l'avantage d'être facilement interprétable, la construction et la calibration de l'index climatique présentent des défis. En particulier, la construction de l'index est basée sur une période de référence, mais les données de pollution étant relativement récentes, elles ne permettent pas de constituer un historique suffisant pour la période de référence.

Application

Le faible volume de données sur les maladies à transmission vectorielle ne permet pas à ce stade d'intégrer ce facteur de risque dans un modèle tenant compte des autres risques climatiques. Ainsi, nos travaux se sont concentrés sur la modélisation jointe de l'impact des températures et de la pollution de l'air en France. La difficulté d'accès à des données d'exposition à l'échelle individuelle (impossibilité de connaître les positions géographiques de chaque individu), ainsi que la relation non linéaire entre la température et la mortalité, ont conduit au choix d'un modèle additif généralisé (GAM).

MODELISER JOINTEMENT L'IMPACT DES TEMPERATURES ET DE LA POLLUTION AVEC UN GAM

Un GAM avec une distribution quasi-Poisson et une fonction de lien logarithmique est calibré sur le nombre de décès quotidien en France entre 2013 et 2020. Il intègre l'effet joint des températures moyennes (TM) quotidiennes de 19 villes françaises, de la concentration en ozone (O_3) et en particules en suspension de diamètre inférieur à 2.5 micromètres ($PM_{2.5}$). Cette surface de risque jointe est représentée par une spline à plaque mince. Le modèle dit "climatique joint" est alors :

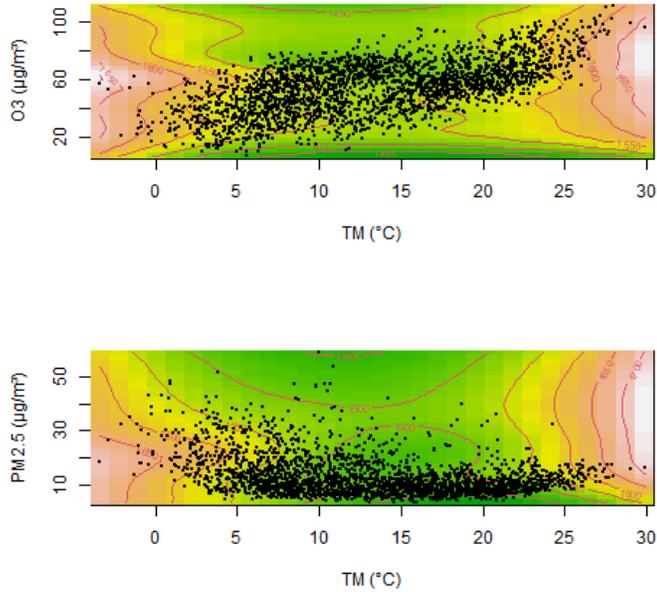
$$\ln(\lambda_{d,t}) = z_{d,t} \beta + s(TM_{d,t}, PM_{2.5,d,t}, O_{3,d,t}; \theta) \quad (1)$$

où :

- $\lambda_{d,t}$ est l'espérance du nombre de décès du jour d de l'année t , $D_{d,t}$.
- $z_{d,t}$ est un vecteur de variables temporelles incluant l'année, le mois et le jour de la semaine.
- $s(TM_{d,t}, PM_{2.5,d,t}, O_{3,d,t}; \theta)$ représente la surface de risque des effets joints de la température, des $PM_{2.5}$ et de l'ozone (Figure 1).
- β et θ sont les coefficients à estimer.

14. Elfassih, A., & Boumezoued, A., Elfassih, A., Germain, V. & Titon, E., (December 19, 2022). Modelling the impact of climate risks on mortality. Milliman. Retrieved January 8, 2025, from https://www.milliman.com/-/media/milliman/pdfs/2022-articles/12-16-22_modelling-the-impact-of-climate-risks-on-mortality.ashx.

FIGURE 1 : SURFACE DE RISQUE DES EFFETS JOINTS DE LA TEMPERATURE ET DE LA POLLUTION DE L'AIR



On observe que les effets des $PM_{2.5}$ et de l' O_3 sont exacerbés pour des températures situées aux extrémités (froides et chaudes). Les seuils diffèrent néanmoins. L'effet des $PM_{2.5}$ est plus marqué en présence du froid (à partir de températures en dessous de 4°C degrés, contre 3°C pour l' O_3), tandis que l'effet de l' O_3 est plus marqué en présence du chaud (au-delà de 20°C, contre 25°C pour les $PM_{2.5}$).

L'impact annuel du climat est obtenu à partir du modèle GAM (Équation 1) estimé par tranche d'âge k et par sexe g . On considère que l'impact du climat est partagé parmi tous les âges x appartenant à la classe d'âge k . On obtient ainsi $c_{x,t}^{(g)}$, le "facteur climatique joint". Il s'agit d'un facteur multiplicatif, à appliquer aux taux de mortalité centraux (i.e. ceux sans prise en compte de l'effet climatique) par âge x et par sexe g .

$$c_{x,t}^{(g)} = \left[1 + \sum_{d \in \mathcal{D}_t} \frac{1}{\#\mathcal{D}_t} \times \left(e^{s(TM_{d,t}, PM_{2.5,d,t}, O_3_{d,t}; \theta_k^{(g)})} - 1 \right) \right] \quad (2)$$

Où \mathcal{D}_t est l'ensemble des jours de l'année t , tels que $\mathcal{D}_t = \{d \mid d \text{ est le } d\text{-ième jour de l'année } t, d = 1, 2, \dots, 365\}$.

PROJECTION DES VARIABLES CLIMATIQUES

Les variables climatiques de température, de concentration en O_3 et en $PM_{2.5}$ sont projetées par des modèles de série temporelles. Les séries de température et $PM_{2.5}$ sont chacune projetées par un modèle SARIMA (*Seasonal Auto-Regressive Integrated Moving Average*), tandis que la série de l'ozone est modélisée à l'aide d'un SARIMAX (*Seasonal Auto-Regressive Integrated Moving Average with Exogeneous Variables*) intégrant la température comme variable exogène.

9 scénarios différents ont été générés. On considère 3 trajectoires d'évolution des températures à horizon 2060 : +1.33°C, +2°C, +3°C. La modélisation de la concentration en O_3 intégrant les températures de manière linéaire, ces 3 trajectoires d'évolution de températures se répercutent directement dans les trajectoires de concentration en O_3 . On génère également 3 trajectoires de concentration en $PM_{2.5}$: un scénario de baisse (réduction de 27% d'ici 2030, suivie d'une baisse supplémentaire de 5% par décennie), un scénario constant, et un scénario intermédiaire (baisse de 27% d'ici 2030, suivie d'une augmentation de 5% par décennie). Malgré une tendance à la baisse des $PM_{2.5}$ depuis deux décennies, une telle dynamique est peu susceptible de se poursuivre à l'avenir : le changement climatique favorise à la fois l'émission et la concentration des $PM_{2.5}$, et les efforts de réduction ont déjà ciblé les principales sources de pollution.

PROJECTION DU MODELE

L'impact annuel prospectif du climat sur la mortalité est estimé en injectant les scénarios prospectifs des variables climatiques dans le calcul du facteur climatique joint (Équation 2). Ce facteur est ensuite appliqué à un taux de mortalité prospectif en l'absence d'effets climatiques. Les tables de mortalité prospectives de l'INSEE¹⁵ fournissent les probabilités de décès $q_{x,t}^{(g)}$ pour chaque âge x , sexe g et année t . En supposant la fonction de hasard constante selon l'âge, le sexe et l'année, on peut en déduire les taux de mortalité $\mu_{x,t}^{(g)}$, tels que :

$$\mu_{x,t}^{(g)} = -\ln(1 - q_{x,t}^{(g)}) \quad (3)$$

Ces taux représentent la mortalité pour chaque âge x , sexe g de l'année t , sans ajustement pour les effets climatiques. On en déduit les taux de mortalité ajustés des effets climatiques :

$$\widehat{m}_{x,t}^{(g)} = \mu_{x,t}^{(g)} c_{x,t}^{(g)} \quad (4)$$

Ces taux de mortalité permettent d'estimer le nombre de décès supplémentaires (ou évités) liés au climat ainsi que l'espérance de vie résiduelle, avec et sans effet climatique.

15. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2496716?sommaire=2496793> Le scénario central de projections de population 2013-2070 pour la France – Projections de population 2013-2070 pour la France | Insee [Accessed 8 January 2025].

RESULTATS

Impact des effets joints entre températures et pollution de l'air sur l'espérance de vie

L'espérance de vie est directement influencée par l'évolution combinée des températures et des concentrations en $PM_{2.5}$ et en O_3 .

- Les trajectoires de températures +1.33°C, +2°C, +3°C se traduisent par une diminution (jusqu'à -0.09 années) de l'espérance de vie à la naissance en 2060 dans le scénario constant de concentration en $PM_{2.5}$.
- Dans le scénario intermédiaire (concentration en $PM_{2.5}$ décroissante jusqu'en 2030 suivie d'un rebond jusqu'en 2060), seules les trajectoires de températures +2°C et +3°C engendrent une diminution (jusqu'à -0.07) de l'espérance de vie à la naissance en 2060.
- En revanche, dans le scénario de baisse de la concentration en $PM_{2.5}$, la diminution progressive des concentrations en particules fines compense temporairement l'impact négatif de l'augmentation des températures : l'espérance de vie à la naissance bénéficie de cette diminution jusqu'en 2060.

Cette tendance positive est cependant limitée dans le temps : à plus long terme, et notamment au-delà de 2060, la croissance continue du facteur climatique provoquée par la hausse des températures dominera, entraînant une diminution de l'espérance de vie.

Les résultats soulignent l'importance de réduire les $PM_{2.5}$ à court terme. A long terme, les effets des températures élevées sur la mortalité risquent de surpasser les bénéfices de la réduction des $PM_{2.5}$. Il devient donc essentiel d'intégrer des mesures d'adaptation aux températures extrêmes dans les politiques de santé publique, telles que l'amélioration de l'accès aux soins pendant les vagues de chaleur, les campagnes de sensibilisation aux risques liés à la chaleur et l'hydratation, ainsi que le développement d'infrastructures pour réduire les effets des îlots de chaleur urbains. Par ailleurs, les interactions entre l'ozone et la température, particulièrement exacerbées par le changement climatique, doivent être davantage prises en compte dans les modèles de prédiction.

Différence entre modélisation jointe et individuelle des effets du climat

Les résultats montrent que l'addition de facteurs climatiques individuels tend à surestimer l'impact global des risques climatiques. Les espérances de vie à la naissance du modèle climatique joint sont comparées à celles obtenues avec un

modèle climatique dit additif. Le modèle additif estime un facteur climatique pour chacun des risques, et le facteur climatique global est la somme des facteurs climatiques individuels.

Le modèle climatique additif estime jusqu'à 2 959 décès supplémentaires chez les femmes et 4 294 pour les hommes en 2060 par rapport au modèle climatique joint et prévoit une espérance de vie à la naissance inférieure de 0.05 années chez les femmes et de 0.09 années chez les hommes dans le scénario intermédiaire de $PM_{2.5}$, avec une trajectoire à +3°C. L'utilisation d'un modèle climatique joint, qui intègre les effets combinés et les interdépendances entre les variables permet de mieux quantifier le risque global du climat sur la mortalité. Ces résultats montrent l'intérêt potentiel pour les assureurs d'intégrer un modèle joint pour évaluer les impacts climatiques sur la mortalité.

Conclusion

Les risques climatiques, qu'ils soient liés aux températures, à la pollution ou à la prolifération des maladies à transmission vectorielle, exercent une influence sur la mortalité en France. Ces risques sont couramment étudiés séparément et leur impact sur la mortalité est estimé indépendamment de celui des autres. Ils sont pourtant interconnectés et présentent des synergies. Leur impact joint pourrait alors différer de la somme de leurs impacts individuels, en particulier dans un contexte où les projections climatiques anticipent une intensification de ces phénomènes à horizon 2060.

À court terme, les projections ont indiqué que l'impact joint du climat dépendait fortement de la trajectoire de concentration en $PM_{2.5}$ envisagée. Dans des scénarios où la concentration en $PM_{2.5}$ diminuait, cette réduction progressive compensait temporairement l'effet négatif de l'augmentation des températures. À plus long terme, cependant, la hausse continue des températures annulait l'effet bénéfique de la baisse des concentrations en $PM_{2.5}$ entraînant une diminution de l'espérance de vie. Cette évolution souligne l'importance de réduire simultanément les émissions de $PM_{2.5}$ et de limiter le réchauffement climatique afin de préserver la santé publique. Par ailleurs, les résultats ont souligné l'importance de considérer conjointement l'impact des risques climatiques. Pour chacun des scénarios considérés, estimer l'impact global des risques climatiques sur l'espérance de vie en additionnant leurs effets individuels a conduit à une surestimation par rapport à l'impact calculé conjointement.

Les effets des risques climatiques sur la mortalité sont non linéaires, synergiques et décalés dans le temps. Un modèle "idéal" aurait alors permis de réunir ces trois caractéristiques. Nous avons laissé de côté la prise en compte des effets décalés dans le temps. En particulier, la température a des effets retards, c'est à dire un impact différé à court terme, tandis que l'exposition à la pollution provoque des effets à moyen terme et long terme. Cet effet retard de la température a d'ailleurs été étudié avec un DLNM dans un précédent *White Paper*¹⁶ et révèle un fort impact non linéaire des 21 dernières températures quotidiennes sur la mortalité. L'impact à moyen terme et long terme de la pollution pourrait être considéré en intégrant des variables de concentrations cumulées de pollution de l'air.

16. Titon, E., Talbi, T. & Bessiere, J (November 23, 2024), The impact of climate change on winter mortality: A complex phenomenon with an uncertain future, from https://www.milliman.com/-/media/milliman/pdfs/2024-articles/11-22-24_01611f_the-impact-of-climate-change-on-winter-mortality.ashx [Accessed 8 January 2025].

Solutions for a world at risk™

Milliman leverages deep expertise, actuarial rigor, and advanced technology to develop solutions for a world at risk. We help clients in the public and private sectors navigate urgent, complex challenges—from extreme weather and market volatility to financial insecurity and rising health costs—so they can meet their business, financial, and social objectives. Our solutions encompass insurance, financial services, healthcare, life sciences, and employee benefits. Founded in 1947, Milliman is an independent firm with offices in major cities around the globe.

[milliman.com](https://www.milliman.com)



CONTACT

Jeanne Bessiere
jeanne.bessiere@milliman.com

Tinhinane Talbi
tinhinane.talbi@milliman.com

Eve Elisabeth Titon
eveelisabeth.titon@milliman.com