

An open-access
journal
of population
research



Volume 9 / 3
2021

Trajectoire de mortalité aux âges extrêmes de la vie : une représentation paramétrique des données récentes de la France, de la Belgique et du Québec

Linh Hoang Khanh Dang

Correspondance :

danghoangkhanhlinh@gmail.com

Institut national d'études démographiques

Nadine Ouellette

nadine.ouellette@umontreal.ca

Université de Montréal, Département de démographie

France Meslé

mesle@ined.fr

Institut national d'études démographiques

Michel Poulain

michel.poulain@uclouvain.be

Université catholique de Louvain, Centre de recherche en démographie

Tallinn University



DEMO Centre de recherche
en démographie

IACCHOS Institut d'analyse du changement
dans l'histoire et les sociétés contemporaines

UCLouvain

DOI.10.14428/rqj2021.09.01.03 • ©2022 Linh Hoang Khanh Dang, Nadine Ouellette, France Meslé, Michel Poulain

PUL PRESSES
UNIVERSITAIRES
DE LOUVAIN



This work is licensed under a Creative Commons Attribution NonCommercial 4.0 International License. You can share, adapt the material for non-commercial purposes provided that you give appropriate credit and indicate if changes were made. For details see <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Résumé – Abstract

Résumé

Au cours de la vie des adultes, les taux de mortalité par âge augmentent à un rythme assez proche du rythme exponentiel décrit par le modèle de Gompertz. Aux très grands âges, toutefois, l'évolution de ce risque de décès reste encore un sujet de débat, principalement du fait de données insuffisantes en quantité et en qualité. La disponibilité de données récentes exceptionnellement fiables pour les populations française, belge et canadienne-française au-delà de 90 ans nous donne une nouvelle opportunité de mettre à jour les connaissances sur la trajectoire de mortalité aux âges les plus élevés de la vie humaine et de tester différents modèles pour ajuster ces données. Une décélération du rythme d'accroissement des taux de mortalité est confirmée chez les femmes très âgées et les modèles de type logistique (Beard et Kannisto) donnent toujours les meilleurs ajustements. Chez les hommes, bien que les données n'écartent pas complètement ces modèles logistiques, elles sont le plus souvent ajustées de façon optimale par une croissance exponentielle de type Gompertz. Le nombre de survivants masculins trop faible aux très grands âges pourrait être à l'origine de ce résultat.

Mots-clés : mortalité, âges extrêmes de la vie, longévité, générations éteintes, France, Belgique, Québec

Abstract

Throughout adult lifespan, age-specific death rates increase at a pace which is very close to an exponential pace as depicted by the Gompertz model. At very old ages, however, changes in the risk of death remain a matter of debate, mainly because data are insufficient both in terms of quantity and quality. The availability of exceptionally reliable recent data for the French, Belgian and French-Canadian populations beyond the age of 90 gives us a new opportunity to refine our understanding of the human mortality trajectory at the highest ages and to test different models to adjust these data. A deceleration in the pace of increase of death rates is confirmed among females in very old age and logistic-type models (Beard and Kannisto) always provide the best adjustments. Among males, although the data do not completely rule out these logistic-type models, they are more often optimally described by Gompertz-type exponential growth. The low number of male survivors at very old ages could explain this result.

Keywords: mortality, oldest old, longevity, extinct birth cohorts, France, Belgium, Quebec

1. Introduction

Au cours de l'évolution humaine, l'allongement de l'espérance de vie à la naissance a été le phénomène le plus remarquable du XX^e siècle, sous l'effet des succès remportés dans la lutte contre les maladies infectieuses puis contre les maladies cardiovasculaires et les cancers. Quand, au tournant des années 1960, les gains d'espérance de vie obtenus grâce à la baisse de mortalité infantile ont commencé à s'épuiser, la baisse de la mortalité aux âges élevés (essentiellement entre l'âge de 65 et 90 ans) a pris le relais (Meslé, 2004). Au début du XXI^e siècle, la croissance du nombre des personnes atteignant de très grands âges (au-delà de 90 ans) est devenue spectaculaire. L'histoire mythique de quelques individus ayant survécu jusqu'à des âges extrêmes (Sauvy, 1961) s'est effacée devant une prolifération bien réelle des centenaires (personnes âgées de 100 ans ou plus), et même une émergence remarquable des supercentenaires (personnes âgées de 110 ans ou plus). Dans les années 1990, la constitution de la *Kannisto-Thatcher Oldest-Old Database*¹, une base de données rassemblant quelques milliers de centenaires issus d'une trentaine de pays à faible mortalité a confirmé cette croissance des survivants aux très grands âges, amorcée après la deuxième guerre mondiale (Kannisto, 1994). Les premières analyses des risques de décès aux âges extrêmes calculés dans cette base de données selon une méthode uniforme pour l'ensemble des pays recensés, ont montré une baisse nette des taux de mortalité à ces très grands âges au cours du temps (Kannisto, 1994 ; Kannisto *et al.*, 1994), même si cette baisse ne contribuait pas encore beaucoup à l'allongement de l'espérance de vie humaine. Les analyses réalisées ultérieurement confirment que la baisse des risques de décès aux très grands âges se poursuit (Vaupel *et al.*, 2006 ; Rau *et al.*, 2008 ; Beltrán-Sánchez *et al.*, 2019).

Il est à prévoir que toute diminution future des niveaux de mortalité, y compris aux âges élevés, s'accompagnera nécessairement d'un nombre croissant de personnes âgées et très âgées. De fait, le rapport des Nations Unies sur le vieillissement de la population mondiale (2019) a projeté une multiplication par 3 du nombre des personnes âgées de 80 ans et plus d'ici le milieu du XXI^e siècle, passant de 143 à 426 millions entre 2019 et 2050 (pour une part relative dans la population totale augmentant de 1,9 à 4,4%). Ce changement démographique, aussi fascinant qu'il soit, pose de nouveaux défis économiques et sociaux. Face à une plus longue survie des individus, les politiques de santé doivent prendre en charge la perte d'autonomie, le suivi sur le long-terme des maladies chroniques, la pauvreté, ou encore l'isolement. Ceci nécessite une connaissance précise des évolutions de la mortalité à ces très grands âges, de façon à accompagner au mieux les populations vieillissantes.

La question de fond porte ici sur l'évolution des taux de mortalité avec l'âge dans ces phases extrêmes de la vie : continuent-ils à croître exponentiellement, ou bien existe-t-il une décélération, une stabilisation ou même une diminution de ces taux de mortalité aux âges les plus élevés ? Malgré nombre de travaux empiriques et théoriques déjà menés, la question n'est pas tranchée. Les études qui concluent à une décélération de la mortalité aux âges extrêmes, s'écartant ainsi de la croissance exponentielle du modèle de Gompertz, sont nombreuses (voir entre autres Horiuchi et Coale, 1990 ; Horiuchi et Wilmoth, 1998 ; Thatcher *et al.*, 1998 ; Gampe, 2010 ; Feehan, 2018), mais elles sont contestées pour au moins une des trois raisons suivantes (Gavrilov et Gavrilova, 2014, 2019 ; Gavrilova et Gavrilov, 2015) : 1) des données de qualité douteuse en raison de l'inexactitude des déclarations d'âges, 2) des calculs basés sur des hypothèses inappropriées, comme celle d'une distribution uniforme des décès observés au sein de chaque intervalle d'âge(s) et 3) des résultats portant sur un regroupement de générations (ou de pays) permettant

¹ La base de données est connue aujourd'hui sous l'appellation *Kannisto-Thatcher Database on Old Age Mortality* et elle est disponible en accès libre à l'adresse suivante : <https://www.demogr.mpg.de/databases/ktodb/>.

d'augmenter le nombre de survivants aux âges extrêmes, mais accentuant forcément l'hétérogénéité de la population étudiée. Dans ce contexte, la disponibilité de données individuelles et de très bonne qualité sur tous les décédés aux très grands âges au sein des populations française, belge et canadienne-française permet de répondre à la première critique sur la qualité des données. Ces données individuelles nous permettent par ailleurs d'adopter une approche par générations éteintes, suivant chaque ensemble d'individus nés une année donnée jusqu'au décès du dernier survivant, sans recourir à des hypothèses qui pourraient s'avérer inappropriées dans nos calculs. Une étude récente sur les centenaires canadiennes-françaises a mis en évidence l'infléchissement de la courbe des taux de mortalité de cette population féminine (Ouellette, 2016). Des comparaisons avec d'autres populations étant souhaitables, nous étendons ici l'analyse à la France et la Belgique. Nous considérons également le sexe masculin, tout en ajoutant les données sur les nonagénaires pour obtenir un portrait plus complet de la forme de la courbe de mortalité aux âges extrêmes.

Dans cet article, notre tâche consiste d'abord à démontrer que les données sur lesquelles s'appuient nos analyses sont de très haute qualité. Nous décrivons ainsi successivement les sources de données, la procédure de validation de l'âge des décédés et l'issue de cet exercice de validation. Ensuite, les méthodes d'analyse de la trajectoire de mortalité en fin de vie sont exposées, suivies d'une présentation des résultats obtenus. Nous clôturons avec quelques éléments de discussion et proposons des prolongements pour les études futures.

2. Sources et qualité des données

Le premier défi auquel font face les études sur la mortalité aux très grands âges tient au décompte exact des personnes ayant atteint un âge extrême. Non seulement la survie au-delà de 90 ans est restée un événement rare pendant une grande partie du XX^e siècle, mais ces âges extrêmes recensés sont souvent exagérés ou arrondis. De plus, même dans les pays à faible mortalité qui disposent d'un système d'état civil fiable, il est déjà arrivé que les données statistiques sur les tranches d'âges les plus élevées soient délibérément manipulées par les instituts nationaux de statistique lorsqu'elles étaient jugées peu crédibles. Ainsi, jusqu'en 1987 en France, tous les décès survenus au-delà de 110 ans étaient déplacés dans des classes d'âge plus jeunes jugées « plus raisonnables » (Meslé *et al.*, 2010, p.125). Au Québec, ce fut le cas entre 1963 et 1973 (Desjardins et Bourbeau, 2010, p.63).

Avant d'analyser les données sur la mortalité aux âges extrêmes, il est donc indispensable, après s'être assuré de l'exhaustivité des données, d'effectuer une validation rigoureuse de l'âge des décédés identifiés. La mise en pratique systématique de cette procédure de validation de l'âge garantit une excellente qualité des données utilisées pour le calcul des taux de mortalité aux très grands âges. La procédure consiste au minimum à vérifier la cohérence entre les informations renseignées sur le certificat de décès et le document d'enregistrement de la naissance (e.g., certificat de naissance, acte de baptême, etc.), deux documents établis avec un décalage de plus d'un siècle, sur la base du nom et du prénom de la personne défunte. Les procédures d'identification et de validation propres aux trois pays à l'étude ont été déjà décrites en détail par Meslé *et al.* (2010) et Ouellette *et al.* (2020) pour la France, par Poulain *et al.* (1999) et Poulain (2010a, 2010b) pour la Belgique, et par Bourbeau et Desjardins (2002) et Desjardins et Bourbeau (2010) pour le Québec. Dans les paragraphes qui suivent, nous nous contentons d'en résumer les traits les plus importants. Une description de l'ensemble des données disponibles et utilisées dans la présente recherche est donnée dans le tableau 1.

France

La France est un des rares pays dans le monde à disposer d'un système d'état civil fiable depuis la fin du XVIII^e siècle. Les données utilisées ici proviennent de deux

sources : l'état civil pour les décès survenus entre 90 et 104 ans révolus, c'est-à-dire dans l'intervalle d'âges [90, 105[, et le Répertoire national d'identification des personnes physiques (RNIPP) pour les décès survenus à 105 ans ou plus. Les données issues de l'état civil dont nous disposons sont agrégées par année d'âge, sexe et année de naissance, alors que celles du RNIPP sont des enregistrements individuels nominatifs. En effet, depuis 2014, grâce à une convention signée entre l'Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE) et l'Institut national d'études démographiques (INED), chaque année, un extrait du RNIPP est envoyé à l'INED, incluant tous les décès de personnes nées en France survenus aux âges supérieurs ou égaux à 105 ans. Depuis l'automne 2019, ces données individuelles sur les décès de la France sont accessibles en ligne, avec indication des dates précises de naissance et décès.

Tableau 1. Description des données sur les décès utilisés pour les populations française, belge et canadienne-française.

Caractéristiques	France		Belgique	Québec
Source	Institut national de la statistique et des études économiques		Registre national	Institut de la statistique du Québec
Type de données	Agrégées ^a	Individuelles ^{b,c}	Individuelles ^b	Individuelles ^b
Nombre de décès (sexes et âges réunis)	1 028 676		140 990	31 795
Âges en années révolues	90 à 104 ans	105 ans ou plus	90 ans ou plus	90 ans ou plus
Années de naissance	1883 à 1901		1891 à 1904	1880 à 1896
Années de décès	1973 à 2015		1981 à 2015	1970 à 2009

^a Nombres de décès ventilés par sexe, année d'âge, année de naissance et année de décès.

^b Liste exhaustive des personnes décédées incluant entre autres les informations suivantes : sexe, date de naissance et date de décès.

^c Les données individuelles sur les décès à partir de 105 ans sont disponibles dans la *International Database on Longevity*.

Une validation exhaustive des données est réalisée systématiquement pour les supposés supercentenaires, ces individus dont l'âge au décès déclaré est supérieur ou égal à 110 ans. La compilation la plus récente signale que sur 231 individus ainsi identifiés parmi les générations 1883 à 1901, tous les certificats de naissance et de décès ont été retrouvés et ont permis de confirmer l'exactitude de l'âge au décès (au jour près) pour la vaste majorité d'entre eux (213 sur 231, ou 92%) (Ouellette *et al.*, 2020). Les auteurs ajoutent que pour les décès supposés survenus entre 105 et 109 ans révolus, la validation a été effectuée sur un extrait du RNIPP couvrant les décès de personnes nées entre 1883 et 1897 seulement. Elle a été faite exhaustivement pour tous les décès déclarés à 107, 108 et 109 ans et sur un échantillon sélectionné aléatoirement de cet extrait pour les 105 et 106 ans (respectivement la moitié et le tiers des décès survenus à ces âges). Cet exercice de validation a permis de conclure à une très bonne qualité des données puisque les âges au décès de 99,7% des cas vérifiés se sont révélés exacts (au jour près).

Compte tenu de ce dernier résultat qui reflète un niveau d'exactitude remarquable des données entre 105 et 109 ans révolus, ainsi que du bon fonctionnement de l'état

civil français depuis plus d'un siècle, sans oublier le nombre considérable des décès à valider entre les âges de 90 et 109 ans révolus (de l'ordre de centaines de milliers), il a été décidé de limiter la validation systématique aux décès de supercentenaires dans la population française. De plus, pour nos analyses, nous ne prenons en compte que les données de décès des membres des générations éteintes et nées entre 1883 et 1901, enregistrées en France métropolitaine entre 1988 et 2016. Nous excluons ainsi délibérément tous les nés et/ou décédés dans les départements d'outre-mer et dans les territoires d'outre-mer, où la qualité des données de l'état civil était encore questionnable au début du XX^e siècle (Ouellette *et al.*, 2020).

Belgique

L'identification des décès aux très grands âges en Belgique, à la différence de la France et du Québec, est faite à partir du Registre national (Poulain, 2010a, 2010b). Il s'agit d'un système d'enregistrement des changements affectant le statut des individus où tous les événements d'état civil au même titre que les changements de résidence sont enregistrés de manière continue. La Belgique possède par ailleurs un système d'état civil fonctionnel depuis 1792, à cette époque encore en rattachement à la France, système maintenu sous le régime hollandais en 1815 et par la suite par l'État belge. Les données mises à disposition pour cette analyse couvrent les décès ayant eu lieu entre 1981 et 2015 et les générations éteintes nées sur le territoire belge, entre 1891 et 1904. Entre 90 et 100 ans, le bon fonctionnement du système d'état civil belge depuis un siècle garantit la fiabilité des données et aucune validation spécifique n'a été effectuée. À partir de 100 ans, la validation se fait exhaustivement au niveau individuel. Les risques d'erreur augmentent de plus en plus rapidement avec l'âge. À partir de 105 ans, une validation approfondie s'appuie non plus seulement sur les données issues du Registre National mais elle est complétée par des sources annexes (contacts avec les maisons de retraite, visites rendues à la personne supposée âgée de plus de 105 ans si elle est encore en vie, articles de presse et confrontation de l'information issue des diverses sources disponibles). Tous ces éléments complémentaires sont par ailleurs confrontés aux données du Registre National pour tous les événements démographiques ayant marqué la vie des intéressés afin d'assurer la validation de l'âge exceptionnel atteint par ces personnes (Poulain *et al.*, 1999).

Québec

Les données sur les décès au Québec proviennent d'abord des listes annuelles nominatives, fournies par l'Institut de la statistique du Québec, qui contiennent toutes les personnes réputées décédées à 90 ans ou plus issues du registre de l'état civil québécois entre 1970 et 2009. Pour valider l'exactitude de ces informations tirées de l'état civil, il faut recourir aux registres paroissiaux tenus rigoureusement depuis le XVII^e siècle dans le Québec ancien. Par conséquent, la population étudiée contient exclusivement des Canadiens-français catholiques et l'authentification de leur âge au décès s'effectue par un couplage des données du certificat de décès et de l'acte de baptême. Les recensements canadiens de 1881, de 1901 et de 1911 sont aussi utilisés comme source complémentaire pour la validation. Ces recensements fournissent les noms et prénoms, l'âge et la date de naissance de toutes les personnes résidant dans un ménage au moment du recensement et servent parfois à réduire l'incertitude concernant l'âge des personnes pour lesquelles les informations issues des registres paroissiaux s'avèrent incomplètes.

Trois études ont permis de valider un total de 1 825 cas de supposés centenaires canadiens-français, c'est-à-dire tous ceux réputés nés et décédés au Québec respectivement durant les périodes 1870-1894 et 1970-2004. Les résultats de ces études confirment la haute qualité de ces données (pour les 100-109 ans révolus, voir Beaudry-Godin (2010) et pour les 110 ans ou plus, voir Bourbeau et Desjardins (2002) et Desjardins et Bourbeau (2010)). Depuis ce jour, la validation systématique ne s'im-

pose qu'au-delà de 105 ans dans cette population, soit là où la plupart des erreurs avaient été trouvées.

À l'instar des travaux de Ouellette (2016), nos analyses sur les Canadiens-français catholiques nés et décédés au Québec portent sur les générations (éteintes) 1880 à 1896. Nous étendons cependant le domaine d'âges étudié en ajoutant les décès de nonagénaires à ceux de centenaires, ainsi que notre couverture au sexe masculin.

3. Méthodes

Modélisation des taux de mortalité par âge à l'aide d'une approche paramétrique

Face à l'incertitude concernant la forme de la courbe de mortalité aux âges extrêmes de la vie, plusieurs scénarios d'évolution des taux de mortalité avec l'âge ont été envisagés, comme la présente section en témoigne. Certains de ces scénarios sont résumés de manière synthétique par une équation mathématique appelée « loi » ou modèle de mortalité, dont la forme fonctionnelle est prédéterminée. L'objectif ici est de déterminer l'équation mathématique pour laquelle la forme paramétrique décrit le mieux les taux par âge au-delà de 90 ans². Précisons que différentes hypothèses sur les mécanismes de l'évolution des taux de mortalité avec l'âge au sein de la population, exprimées par diverses équations mathématiques, peuvent donner lieu à une même représentation graphique. Ainsi, pour une courbe de mortalité donnée, plusieurs mécanismes peuvent être impliqués. Les modèles de mortalité considérés dans la présente étude sont ceux dont la parcimonie permet de simples démarches d'estimation et d'interprétation, en plus d'être effectivement représentative de la forme impliquée par le scénario en question. Notre choix s'appuie essentiellement sur les travaux empiriques précédents (Horiuchi et Wilmoth, 1998 ; Thatcher *et al.*, 1998 ; Thatcher, 1999 ; Feehan, 2018).

En ce qui concerne les scénarios proposés dans la littérature, il existe deux grands courants dans les débats actuels : le premier courant porte sur l'augmentation exponentielle des taux de mortalité avec l'âge dans une population donnée, alors que le second soutient plutôt un détachement progressif des taux avec l'âge par rapport à cette croissance exponentielle. Si la croissance exponentielle signifie une augmentation de la force de mortalité à un rythme constant indépendamment de l'âge (modèle de Gompertz), le scénario alternatif révèle une décélération du rythme de croissance avec l'âge (e.g. modèles de Weibull, de Kannisto et de Beard), pouvant mener à une croissance nulle, voire à une possible diminution des taux de mortalité (e.g. modèle quadratique). Le Tableau 2 synthétise les cinq modèles retenus pour notre étude.

² Il convient de préciser que la plupart des modèles de mortalité sont des expressions de la force de mortalité en fonction de l'âge. La force de mortalité, aussi appelée « taux instantané de mortalité », est telle que $\mu_{x+0,5} \cong t_x = D_x / E_x$, où t_x est le taux de mortalité observé entre les âges exacts x et $x+1$, et D_x et E_x correspondent respectivement au nombre de décès observés et à l'effectif de la population soumise au risque de décéder entre ces mêmes âges (Pollard, 1973). La probabilité de décès entre les âges exacts x et $x+1$, notée q_x , est telle que $q_x = D_x / S_x \cong 1 - \exp(-\mu_{x+0,5})$ sous certaines hypothèses, où S_x est le nombre de survivants à l'âge exact x (Thatcher *et al.*, 1998, annexe A).

Tableau 2. Trajectoires possibles de la mortalité aux très grands âges et les modèles paramétriques de mortalité qui les décrivent.

Hypothèses	Scénarios	Modèles de mortalité	Formules	Référence
Croissance exponentielle de la mortalité avec l'âge	Croissance exponentielle	Modèle de Gompertz	$\mu(x) = ae^{bx}$	Gompertz (1825)
Croissance à un rythme décéléré de la mortalité avec l'âge	Croissance non-exponentielle de la mortalité	Modèle de Weibull	$\mu(x) = ax^b$	Weibull (1951)
	Croissance à un rythme décéléré avec possibilité d'un plateau de mortalité	Modèles logistiques : - Modèle de Kannisto	$\mu(x) = \frac{ae^{bx}}{1 + ae^{bx}}$	Kannisto (1994)
		- Modèle de Beard	$\mu(x) = \frac{ae^{bx}}{1 + \delta e^{bx}}$	Beard (1959)
	Croissance à un rythme décéléré avec possibilité d'une diminution de la mortalité	Modèle log-quadratique	$\mu(x) = e^{a+bx+cx^2}$	Horiuchi et Coale (1990)

L'estimation des paramètres des différents modèles retenus est faite par la méthode du maximum de vraisemblance. Nous faisons l'hypothèse que la force de mortalité est constante dans chaque intervalle d'âge $[x, x+I[$, de sorte que les décès observés entre les âges exacts x et $x+I$ peuvent être vus comme des réalisations d'une loi de Poisson :

$$D_x \sim \text{Poisson}(\mu_x E_x).$$

Grâce aux données individuelles à notre disposition, nous connaissons les dates de naissance et de décès de chaque individu (au jour près). Les nombres de personnes-années exposées au risque de décéder par intervalle d'âge peuvent ainsi être calculés de manière exacte en sommant les contributions individuelles. La fonction de log-vraisemblance utilisée pour l'estimation des paramètres des différents modèles de mortalité est la suivante :

$$\log L[\theta|D_x, E_x] = \sum_x (D_x \log [\mu(x)] - \mu(x) E_x).$$

Le modèle de Gompertz (1825) peut s'écrire sous la forme :

$$\mu(x) = ae^{bx}.$$

Ce modèle traduit l'idée que la capacité de l'être humain à éviter la mort s'amenuise graduellement avec l'âge. La force de mortalité représente par conséquent la susceptibilité que connaissent les individus d'une population donnée à mourir selon l'âge. Gompertz avait remarqué que la mortalité pouvait aussi dépendre de facteurs indépendants de l'âge, mais il décida de se limiter au facteur exponentiel lié à l'âge. La

généralisation du modèle de Gompertz, moyennant l'ajout d'un terme indépendant de l'âge, revient donc à Makeham (1860)³. Aux âges extrêmes de la vie, ce terme est toutefois négligeable d'après les travaux empiriques (Thatcher *et al.*, 1998).

Le modèle de Weibull (1951) a pour équation :

$$\mu(x) = ax^b,$$

et il est caractéristique d'une mortalité qui augmente avec la dégradation des diverses composantes de l'organisme. La différence principale entre les modèles de Weibull et de Gompertz tient à l'hypothèse concernant le niveau de la mortalité à l'âge initial. Alors que le modèle de Gompertz suppose une vulnérabilité même au moment de la naissance (i.e., $\mu(0)=a$), celui de Weibull stipule que le système est « invulnérable » lors du démarrage (i.e., $\mu(0)=0$).

Le modèle de Kannisto (1994) fait partie de la classe des modèles logistiques partageant l'idée d'une asymptote horizontale vers laquelle la force de mortalité tend aux âges les plus avancés, même si, en principe, ces âges pourraient être bien au-delà de ceux observés (ou même imaginables) pour l'être humain. L'hypothèse sous-jacente aux modèles logistiques est donc que la mortalité aux âges extrêmes de la vie continue d'augmenter, mais à un rythme qui s'amenuise progressivement jusqu'à ce qu'il devienne pratiquement nul, à un certain niveau appelé « plateau de mortalité ». Les travaux de Gampe (2010) portant sur 637 cas validés de supercentenaires issus de 11 pays et régions montrent que les taux de mortalité par année d'âge au-delà de 110 ans affichent une croissance nulle et décrivent un plateau situé à 0,7, équivalent à une probabilité annuelle de décès de l'ordre de 50%. Dans le modèle logistique simplifié de Kannisto décrit par l'équation suivante, l'asymptote horizontale est fixée à l'unité :

$$\mu(x) = \frac{ae^{bx}}{1 + ae^{bx}}.$$

Les autres modèles logistiques (complets), dont celui de Beard pouvant s'écrire sous la forme :

$$\mu(x) = \frac{ae^{bx}}{1 + \delta e^{bx}}$$

offrent davantage de flexibilité, notamment parce que le niveau de l'asymptote horizontale n'est pas fixé *a priori* mais déterminé par les paramètres du modèle. D'après la paramétrisation décrite par l'équation du modèle de Beard employée dans cet article, l'asymptote correspond à a/δ .

Dans la littérature, la décélération de la mortalité implicite aux modèles de la classe logistique s'explique le plus souvent par les deux mécanismes suivants : soit par un ralentissement du processus de vieillissement individuel aux très grands âges (e.g., environnement contrôlé, dépenses énergétiques limitées, adaptation de l'organisme aux agents stressants), soit par un processus de sélection qui s'opère au sein d'une population hétérogène où les individus les plus fragiles décèdent à des âges plus jeunes, laissant la population aux très grands âges principalement constituée d'individus robustes, conditionnant ainsi un niveau moyen de mortalité à ces âges qui augmente à un moindre rythme.

Le dernier modèle à ajouter à ceux décrits précédemment est le modèle quadratique, aussi appelé « modèle log-quadratique » puisque le logarithme de la force de mortalité résulte en une fonction quadratique de l'âge :

$$\mu(x) = e^{a+bx+cx^2} \Leftrightarrow \ln(\mu(x)) = a + bx + cx^2.$$

³ Le modèle proposé par Makeham (1860) s'écrit $\mu(x) = ae^{bx} + c$, où c est une constante qui représente le risque de décès relatif aux causes qui ne dépendent pas de l'âge.

Il a été initialement proposé (Coale et Kisker, 1990), en tant que modèle purement descriptif qui est le seul à admettre une diminution de la force de mortalité aux âges les plus élevés.

Étant donné notre objectif de déterminer la forme de la courbe qui s'ajuste le mieux aux données empiriques sur les nombres de décès et effectifs de population au-delà de 90 ans, les modèles nous servent dans cette étude à identifier le scénario le plus plausible pour décrire l'évolution de la mortalité aux âges extrêmes de la vie.

Critère de sélection de modèles

L'approche la plus intuitive pour juger de la performance d'un modèle consiste à comparer les données observées avec celles estimées ou prédites par ledit modèle. Plus l'écart entre les deux est faible, plus le modèle fait preuve d'un bon ajustement. Or, le bon ajustement n'est qu'un facteur parmi d'autres pour sélectionner un modèle. La parcimonie du modèle mérite notamment notre attention. Ici, nous nous en remettons au *Akaike Information Criteria* (AIC), un critère de sélection, qui prend en compte à la fois la capacité d'ajustement et la complexité du modèle. L'AIC d'un modèle donné s'obtient comme suit :

$$AIC = -2 \log L + 2k,$$

où L est la valeur de la fonction de vraisemblance maximisée du modèle (i.e., évaluée à l'estimateur du maximum de vraisemblance), et k dénote le nombre de paramètres dans le modèle. La comparaison des valeurs de l'AIC estimées pour les cinq modèles de mortalité étudiés nous permettra de sélectionner le modèle optimal, c'est-à-dire celui qui aura la valeur de l'AIC la plus faible.

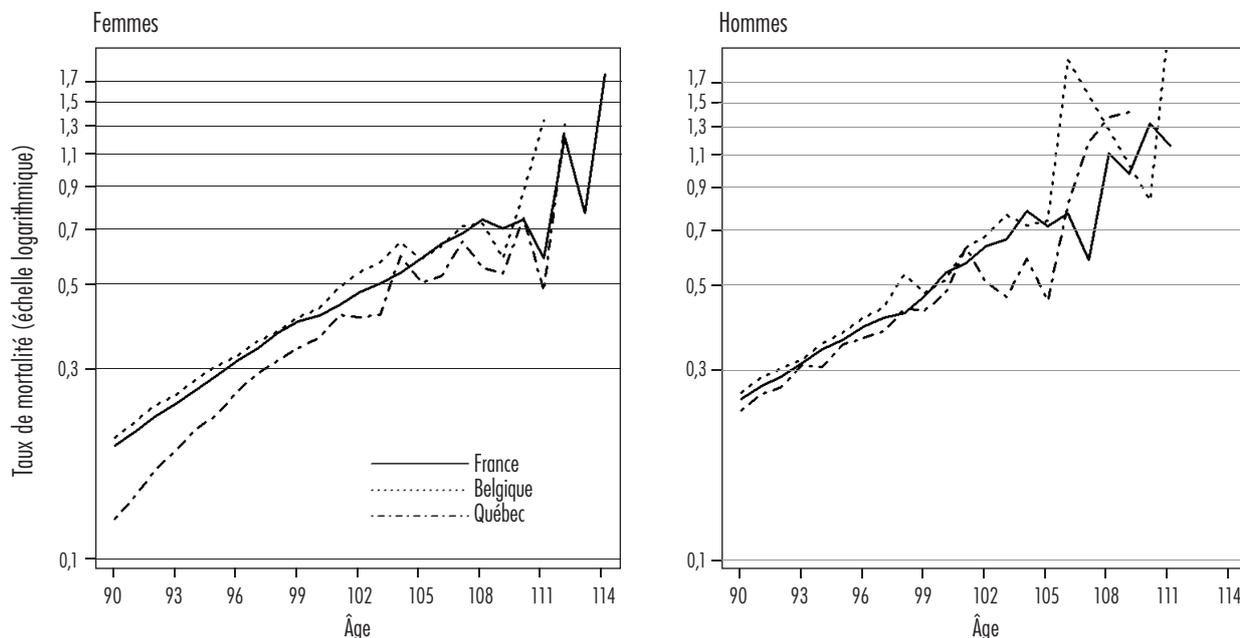
Clôtons cette section en précisant que toutes les analyses menées dans le cadre du présent article ont été réalisées avec le logiciel **R** (R Core Team, 2020), et la routine d'optimisation utilisée est celle de Nelder-Mead, contenue dans la fonction interne **optim**.

4. Résultats

La figure 1 présente les taux de mortalité par âge et sexe à partir des 90 ans en France, en Belgique et au Québec. Les taux s'accroissent clairement avec l'âge et atteignent un niveau de 0,5, voire au-delà, ce qui correspond à une probabilité annuelle de décéder de l'ordre d'au moins 40%, à partir de 100 ans aussi bien pour les hommes que pour les femmes. Les effectifs de survivants s'effritent ainsi considérablement d'un anniversaire au suivant chez les centenaires et cela explique qu'on se heurte rapidement à d'importantes fluctuations aléatoires des taux annuels de mortalité observés aux âges les plus avancés.

Pour comparer les différents scénarios de trajectoires de mortalité aux très grands âges, l'ajustement des données de chaque population par différents modèles mathématiques est incontournable. Les résultats obtenus sont illustrés à la figure 2. Les cercles apparaissant sur cette figure correspondent aux taux annuels de mortalité observés et ils sont de taille proportionnelle à l'effectif de la population soumise au risque de décéder à chaque âge. Dans tous les panels de la figure, ces cercles font état de la diminution spectaculaire avec l'avancement en âge des données disponibles pour juger de l'expérience de mortalité des individus les plus longévifs. Les courbes qui s'ajoutent aux taux de mortalité présentés sont le résultat de l'ajustement des cinq modèles à l'étude par la méthode du maximum de vraisemblance. Au premier coup d'oeil, certains modèles semblent mieux à même de décrire les données observées. On constate entre autres que les modèles de type logistique (Kannisto et Beard) tendent à épouser davantage les taux de mortalité observés lorsqu'ils décrivent une possible décélération aux âges les plus élevés que le modèle de Gompertz, qui par théorie n'en tient pas compte.

Figure 1: Taux de mortalité observés selon l'âge et le sexe pour les générations françaises (1883-1901), belges (1891-1904) et canadiennes-françaises (1880-1896)



Sources : *Calculs des auteurs à partir de compilations spéciales. France – État civil (90 à 104 ans) et Répertoire national d'identification des personnes physiques (105 ans ou plus), Institut national de la statistique et des études économiques. Belgique – Registre national. Québec – État civil, Institut de la statistique du Québec.*

Le tableau 3 résume la qualité de l'ajustement des modélisations de la figure 2 d'après le critère de sélection AIC. Pour chacune des 6 combinaisons possibles entre les pays et les sexes étudiés, les modèles ont été ordonnés selon l'AIC, soit de sa valeur la plus faible (i.e. le modèle optimal) à la plus élevée. L'écart avec l'AIC du modèle optimal est noté ΔAIC dans le tableau. Il nous permet de comparer les différents modèles étudiés entre eux, avec l'objectif d'identifier celui qui, le plus souvent, décrit les données de manière satisfaisante et, rarement, s'adapte mal aux données (Feehan, 2018). D'après Burnham et Anderson (2003, p.72), les modèles largement étayés par les données ont un $\Delta AIC \leq 2$ et ceux pour lesquels les données ne fournissent essentiellement peu ou pas d'appui ont un $AIC > 10$. Cette manière d'interpréter les ΔAIC est utilisée par Feehan (2018), et nous la retenons également dans notre étude.

Populations féminines

Si l'on s'en remet aux résultats pour les femmes d'abord (tableau 3), les modèles de type logistique (Beard et Kannisto) donnent toujours les meilleurs ajustements. Celui de Kannisto ajuste les données françaises et canadiennes-françaises de façon optimale alors que, pour les données belges, c'est le modèle de Beard qui est le plus performant. Rappelons ici que la différence principale entre ces deux modèles concerne l'asymptote horizontale, celle-ci étant fixée à l'unité pour le modèle de Kannisto et adoptant plutôt un large éventail de valeurs en fonction des paramètres estimés pour le modèle de Beard. Le modèle de Gompertz est peu (Belgique, $\Delta AIC = 7$), voire pas (France, $\Delta AIC = 154$, et Québec, $\Delta AIC = 41$) appuyé par ces données. Ainsi, reposant sur des données de qualité qui prennent en compte les générations éteintes les plus récentes, notre analyse confirme que la décélération de la mortalité

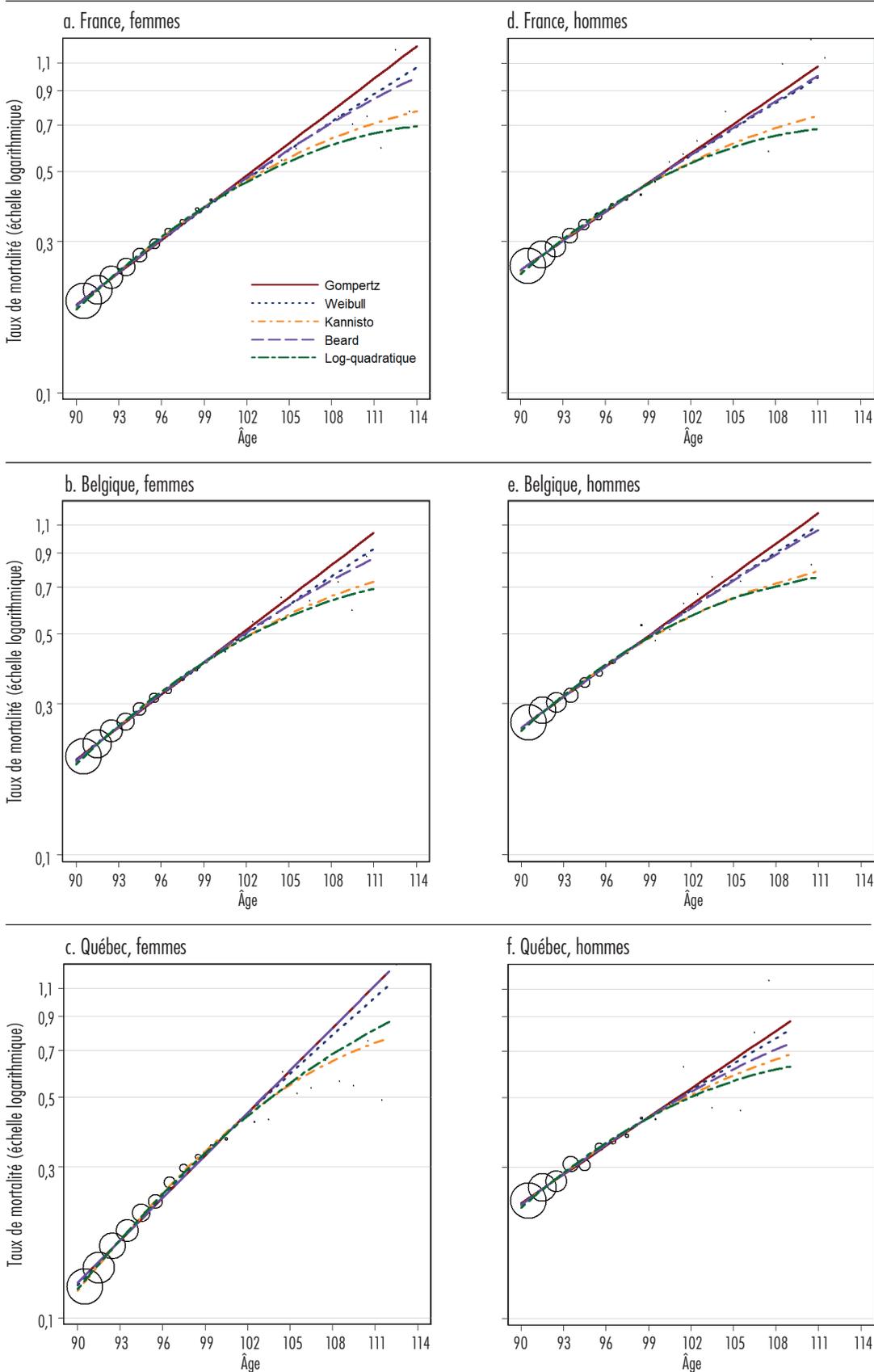
apparaît comme la trajectoire la plus plausible aux très grands âges pour les femmes. Aux âges extrêmes de la vie, la mortalité féminine continue certes à augmenter, mais vraisemblablement à un rythme de moins en moins élevé.

Il peut sembler curieux que ce ne soit pas toujours le modèle le plus souple, comme celui de Beard, qui ressort comme le meilleur modèle selon le critère AIC. Similairement, dans son étude récente de la mortalité au-delà de 80 ans reposant sur 360 générations issues de 10 pays, Feehan (2018) a constaté que les modèles les plus flexibles ne rendaient pas les meilleures performances. De plus, le modèle optimal variait d'une population à une autre, comme dans notre analyse. En fait, les modèles les plus souples contiennent généralement davantage de paramètres, permettant ainsi d'ajuster plus finement la trajectoire des données, mais présentent également un risque de surajustement. Le critère AIC assure un certain équilibre entre le bon ajustement aux données et la complexité du modèle. Il convient, par ailleurs, de prendre en compte que les modèles de mortalité les plus flexibles et les plus fréquemment utilisés proviennent de la famille des modèles logistiques, qui possède comme propriété mathématique intrinsèque l'existence d'une asymptote horizontale, souvent interprétée comme un « plateau de mortalité ». Pourtant, une bonne performance des modèles logistiques pourrait provenir de l'existence d'un point d'inflexion qui leur permet de décrire une courbure dont la croissance est exponentielle dans un premier temps puis se ralentit dans un deuxième temps, sans pour autant aboutir nécessairement à une asymptote horizontale. Or, même si l'on fait l'hypothèse qu'une valeur asymptotique maximale de la mortalité (ou du plateau de mortalité) existe aux âges les plus extrêmes, les courbes de mortalité ajustées par le modèle optimal dans chacune de nos populations féminines dépassent le plafond estimé à 0,7 par Gampe (2010). Ainsi, bien que cela soit au-delà du cadre du présent article, si la décélération de la mortalité observée à partir de nos données conduisait à un plateau de mortalité, son niveau serait supérieur à celui fréquemment retenu dans la littérature jusqu'ici.

Populations masculines

Les ajustements des cinq modèles de mortalité étudiés ont été faits également pour les populations masculines (figures 2d, 2e, 2f). À la différence des femmes, la trajectoire de mortalité des hommes aux très grands âges est ajustée de façon optimale par une croissance exponentielle de type Gompertz selon le critère AIC (tableau 3). L'une des raisons de cette différence pourrait être que la surmortalité masculine observée tout au long de la vie conduit à un plus faible nombre de survivants à l'âge de 90 ans chez les hommes que chez les femmes. Même si la trajectoire réelle de la mortalité masculine pour la France, la Belgique et le Québec suivait un modèle de décélération comme celle des femmes, il est possible que le nombre de survivants masculins aux très grands âges soit insuffisant pour la faire ressortir immanquablement à présent. D'ailleurs, si l'on s'en remet aux écarts avec l'AIC du modèle optimal, le modèle de Kannisto est appuyé par les données masculines québécoises ($\Delta AIC=1$), et le modèle de Beard reçoit un appui à un certain degré en Belgique ($\Delta AIC=4$) et en France ($\Delta AIC=6$). Les importantes fluctuations des taux de mortalité observés chez les hommes peuvent expliquer que la capacité d'ajustement diffère peu entre les différents modèles candidats, et que le critère de performance soit conduit à choisir le modèle le plus parcimonieux, à savoir celui de Gompertz pour ajuster la mortalité masculine aux très grands âges.

Figure 2. Modélisation des taux de mortalité observés selon l'âge et le sexe pour les générations françaises (1883-1901), belges (1891-1904) et canadiennes-françaises (1880-1896)



Sources :
 Calculs des auteurs à partir de compilations spéciales. La taille des cercles est proportionnelle à la population soumise au risque de décéder à chaque âge.
 France : État civil (90 à 104 ans) et Répertoire national d'identification des personnes physiques (105 ans ou plus), Institut national de la statistique et des études économiques.
 Belgique : Registre national.
 Québec : État civil, Institut de la statistique du Québec.

Tableau 3. Mesure de la qualité de l'ajustement des modèles de mortalité étudiés d'après le Akaike Information Criteria (AIC), pour les générations féminines et masculines françaises (1883-1901), belges (1891-1904) et canadiennes-françaises (1880-1896).

Sexe	France			Belgique			Québec		
	Modèle	AIC	ΔAIC^a	Modèle	AIC	ΔAIC^a	Modèle	AIC	ΔAIC^a
Femmes	Kannisto	3701994	0	Beard	483603	0	Kannisto	79197	0
	Beard	3702018	24	Weibull	483606	3	Quadratique	79203	6
	Quadratique	3702073	79	Gompertz	483610	7	Weibull	79223	26
	Weibull	3702079	85	Kannisto	483610	7	Gompertz	79238	41
	Gompertz	3702148	154	Quadratique	483622	19	Beard	79240	43
Hommes	Gompertz	1047446	0	Gompertz	155470	0	Gompertz	48343	0
	Beard	1047452	6	Weibull	155472	2	Weibull	48343	0
	Weibull	1047452	6	Beard	155474	4	Kannisto	48344	1
	Kannisto	1047509	63	Kannisto	155487	17	Beard	48346	3
	Quadratique	1047558	112	Quadratique	155494	24	Quadratique	48348	5

^a Écart avec la valeur de l'AIC la plus faible parmi les cinq modèles de mortalité étudiés.

Sources : *Calculs des auteurs à partir de compilations spéciales. France – État civil (90 à 104 ans) et Répertoire national d'identification des personnes physiques (105 ans ou plus), Institut national de la statistique et des études économiques. Belgique – Registre national. Québec – État civil, Institut de la statistique du Québec.*

Par ailleurs, il faut aussi souligner que tous les modèles paramétriques employés dans cette analyse ajustent très bien les données des trois populations jusqu'à 100 ans environ, de telle façon qu'il est difficile de différencier les courbes ajustées avant cet âge. Une distinction entre le scénario d'une croissance exponentielle et celui d'une décélération de la mortalité ne peut donc être mise en évidence qu'au-delà de cet âge. Plusieurs méthodes peuvent être mobilisées pour tenter de déterminer l'âge « critique » à partir duquel la courbe de mortalité commence à diverger de la trajectoire de croissance exponentielle : soit analytiquement en déterminant l'âge auquel l'accélération de la mortalité atteint son maximum (i.e., lorsque la première dérivée de la force de mortalité par âge est nulle, $\mu'(x)=0$, et que la deuxième dérivée de la force de mortalité par âge est négative, $\mu''(x)<0$), soit graphiquement en identifiant l'âge à partir duquel les intervalles de confiance de la courbe estimée sous l'hypothèse d'une décélération de la mortalité ne contiennent plus la courbe estimée par le modèle de Gompertz pour n'en citer que deux (Rau *et al.*, 2009). Cependant, quelle que soit la méthode choisie, elle repose sur la modélisation, dont l'interprétation dépend de la précision des estimations et donc de la confiance qu'on leur accorde pour représenter la réalité. À l'heure actuelle, les études de précision des estimations de la forme de la courbe de mortalité à partir des modèles paramétriques sont encore très rares.

5. Discussion et conclusion

L'émergence d'une population de plus en plus nombreuse aux âges extrêmes de la vie est un phénomène fascinant du XXI^e siècle. Elle conforte les perspectives optimistes sur l'évolution de la longévité humaine mais laisse présager également des défis socio-économiques majeurs auxquels il est temps de se préparer. Dans la lignée de travaux déjà publiés, notre analyse portant sur des données des générations éteintes les plus récentes et de très bonne qualité pour la France, la Belgique et le Québec conclut que la décélération de la mortalité semble bien être l'hypothèse la plus plausible sur la forme de la courbe de mortalité féminine aux âges les plus extrêmes. Du côté des hommes, en revanche, le meilleur ajustement de la courbe de mortalité correspond à une croissance exponentielle de la mortalité avec l'âge (modèle de Gompertz). Ce résultat peut être dû au nombre de survivants masculins trop faible à ces âges. Bien que les niveaux de risque de décéder à ces très grands âges restent encore très élevés et augmentent avec l'âge, il est plausible que ce rythme de croissance ralentisse, ce ralentissement ne pouvant être observé que lorsque l'on dispose d'un nombre d'observations suffisant. Deux points méritent d'être soulignés. Premièrement, nos travaux ne permettent pas encore de répondre à la question de savoir dans quelle mesure cette décélération de la mortalité décrit la vraie évolution de la mortalité humaine ou ne reflète que le changement de la composition de la population par effet de sélection. Deuxièmement, les ajustements de nos données par les modèles optimaux selon le critère AIC suggèrent que le plateau de mortalité, s'il existe, pourrait se situer à un niveau plus élevé que 0,7, une valeur précédemment estimée par une approche non paramétrique (Gampe, 2010) et largement retenue dans la littérature (Rau *et al.*, 2017 ; Belzile *et al.*, 2020).

La qualité exceptionnelle des données de décès utilisées dans cette analyse nous a permis de répondre à la critique concernant l'imperfection des données, critique généralement formulée face aux résultats des analyses sur la mortalité aux très grands âges. De toute évidence, le nombre encore restreint de survivants à ces âges, source de fluctuations importantes dans les taux de mortalité observés, engendre une incertitude non négligeable sur les conclusions que l'on peut tirer. Dans ce contexte, il convient de s'interroger sur la pertinence de l'AIC en tant que critère de sélection de modèles, en particulier pour la détection de la décélération de la mortalité. Une rapide simulation peut être effectuée en ce sens en nous appuyant sur chacune des trois populations féminines étudiées, pour lesquelles les modèles optimaux d'après l'AIC (tableau 3) appartiennent systématiquement au groupe des modèles de décélération de mortalité. Cette simulation nous permet d'obtenir, au sein de chaque population, la probabilité que le modèle optimal soit choisi plutôt que celui de Gompertz. Concrètement, nous simulons des décès par âge, notés D_x^* à partir d'une distribution de Poisson de moyenne $\hat{\mu}_x E_x$, où $\hat{\mu}_x$ correspond au modèle optimal ajusté aux décès et aux effectifs observés par âge, notés D_x^* et E_x . Nous répétons ensuite l'ajustement du modèle optimal et celui de Gompertz à l'aide des D_x et E_x . Le meilleur modèle parmi les deux est enfin choisi en fonction de l'AIC le plus faible, et nous renouvelons ce processus 1 000 fois. Les résultats finaux révèlent des probabilités très élevées de sélectionner le *bon* modèle, c'est-à-dire celui avec décélération, grâce au critère AIC : 98,6% en France ($N = 788\ 131$), 98,5% en Belgique ($N = 104\ 660$) et 98,3% au Québec ($N = 15\ 621$). Soulignons néanmoins que d'autres travaux en cours cherchent par ailleurs à développer un critère de sélection de modèles ciblé (*focused information criterion*, FIC) en misant sur la performance des modèles aux très grands âges, ce qui le rendrait plus à même de détecter la décélération de la mortalité que les approches traditionnelles telles le AIC (Böhnstedt *et al.*, 2019).

Pour répondre à la critique selon laquelle la décélération apparente de la mortalité n'est qu'un artefact dû à l'hétérogénéité créée par le regroupement de plusieurs générations, il est tentant d'appliquer ces ajustements à des sous-groupes

de générations, voire à chaque génération afin de disposer de groupes plus homogènes. Mais nous nous heurterions toutefois à des fluctuations encore plus importantes dues à un nombre d'observations moindre, réduisant d'autant la fiabilité de nos résultats. Une solution pour apporter plus de clarté à des conclusions déjà abouties serait de fournir des intervalles de confiance pour chaque courbe de mortalité estimée, informant ainsi sur la précision et aussi sur la différence (si négligeable ou non) entre les estimations offertes par différents modèles utilisés, d'où une meilleure argumentation du meilleur modèle à adopter. Ce travail demande cependant une étape supplémentaire pour développer les calculs analytiques visant à estimer les intervalles de confiance, passant par le calcul de dérivations partielles des fonctions $\mu(x)$ correspondant à chacun des modèles empruntés suivant leurs paramètres. La construction des intervalles de confiance pourra nous amener à revoir la routine d'optimisation ainsi que la méthode de calcul de l'AIC. Une telle approche fera l'objet d'une prochaine contribution.

À l'avenir, la disponibilité de données de plus en plus fiables et nombreuses permettra par ailleurs d'apporter un éclairage de plus en plus fin sur les niveaux et les évolutions de la mortalité aux très grands âges, sur lesquels les connaissances demeurent peu abondantes. Il nous paraît donc indispensable de poursuivre et d'approfondir les études cherchant à caractériser et comprendre les changements de la mortalité aux âges extrêmes de la vie afin de mieux connaître l'évolution de la longévité humaine, en tenant compte des points d'attention que nous avons pris soin de détailler à travers ce premier article descriptif de la trajectoire de mortalité au-delà de 90 ans pour la France, la Belgique et le Québec.

Bibliographie

- Beard, R.E. (1959), « Note on some mathematical mortality models », G.E.W. Wolstenholme et M. O'Connor (eds), *CIBA Foundation Colloquia on Aging*, vol. 5, Boston: Little, Brown, and Company. <https://doi.org/10.1002/9780470715253.app1>
- Beaudry-Godin, M. (2010), « La démographie des centenaires québécois : validation des âges au décès, mesure de la mortalité et composante familiale de la longévité ». Thèse de doctorat. Département de démographie. Université de Montréal. <https://doi.org/10.7202/010281ar>
- Beltrán-Sánchez, H., Subramanian, S.V. (2019), « Period and cohort-specific trends in life expectancy at different ages: Analysis of survival in high-income countries », *Social Science & Medicine: Population Health*, vol.8. <http://hdl.handle.net/1866/4385>
- Belzile, L. R., Davison, A. C., Rootzén, H., Zholud, D. (2020), « Human mortality at extreme age », arXiv e-prints 2001.04507. <https://doi.org/10.1098/rsos.202097>
- Böhnstedt, M., Putter, H., Ouellette, N., Claeskens, G., Gampe, J. (2019) « Shifting attention to old age: Detecting mortality deceleration using focused model selection », arXiv e-prints 1905.05760.
- Bourbeau, R., Desjardins, B. (2002), « Dealing with problems in data quality for the measurement of mortality at advanced ages in Canada », *North American Actuarial Journal*, vol.6, n°3, p. 1-13. <https://doi.org/10.1080/10920277.2002.10596052>
- Burnham, K. P., Anderson, D. (2003), *Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretic Approach* (2nd ed.). New York. Springer-Verlag, 488p.
- Coale, A.J., Kisker, E.E. (1990), « Defects in data on old-age mortality in the United States: New procedures for calculating mortality schedules and life tables at the highest ages », *Asian and Pacific Population Forum*, vol.4, n°1, 32 p.

- Desjardins, B, Bourbeau, R. (2010), « The emergence of supercentenarians in Canada », in Maier H., Gampe J., *et al.* (eds), *Supercentenarians*, Berlin Heidelberg, Springer (coll. Demographic Research Monographs), p. 59-74.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-11520-2_4
- Feehan, D. (2018), « Separating the signal from the noise: Evidence for deceleration in old-age death rates », *Demography*, vol.55, n°6, p. 2025-2044.
<https://doi.org/10.1007/s13524-018-0728-x>
- Gampe, J. (2010), « Human mortality beyond age 110 », in Maier H., Gampe J., *et al.* (eds), *Supercentenarians*, Berlin Heidelberg, Springer (coll. Demographic Research Monographs), p. 231-245. https://doi.org/10.1007/978-3-642-11520-2_13
- Gavrilov, L.A., Grailova, N.S. (2014), « Mortality measurement at advanced ages: A study of the Social Security Administration Death Master File », *North American Actuarial Journal*, vol.15, n°3, p. 432-447.
<https://doi.org/10.1080/10920277.2011.10597629>
- Gavrilov, L.A., Gavrilova, N.S. (2019), « New trend in old-age: Gompertzialization of mortality trajectory », *Gerontology*, vol.65, p. 451-445.
<https://doi.org/10.1159/000500141>
- Gavrilova, N.S., Gavrilov, L.A. (2015), « Biodemography of old-age mortality in humans and rodents », *Journals of Gerontology: Biological Sciences*, vol.70, n°1, p. 1-9.
<https://doi.org/10.1093/gerona/glu009>
- Gompertz, B. (1825), « On the nature of the function expressive of the law of human mortality and on a new mode of determining the value of life contingencies », *Philosophical Transactions of the Royal Statistical Society*, vol.27, n°2, p. 513-583.
<https://doi.org/10.1098/rstl.1825.0026>
- Horiuchi, S., Coale, A. (1990), « Age patterns of mortality for older women: An analysis using the age-specific rate of mortality change with age », *Mathematical Population Studies*, vol.2, n°4, p. 245-267. <https://doi.org/10.1080/08898489009525312>
- Horiuchi, S., Wilmoth, J.R. (1998), « Deceleration in the age pattern of mortality at older ages », *Demography*, vol. 35, n°4, p. 391-412. <https://doi.org/10.2307/3004009>
- Kannisto, V. (1994), *Development of oldest old mortality, 1950 – 1990: Evidence from 28 developed countries*. Odense. Odense University Press.
- Kannisto, V., Lauritsen, J., Thatcher, A.R., Vaupel, J.W. (1994), « Reductions in mortality at advanced ages: several decades of evidence from 27 countries », *Population and Development Reviews*, vol.20, p. 793-870. <https://doi.org/10.2307/2137662>
- Makeham, W.M. (1860), « On the law of mortality and the construction of annuity tables », *The Assurance Magazine and Journal of the Institute of Actuaries*, vol.8, p. 301-310.
<https://doi.org/10.1017/s204616580000126x>
- Meslé, F. (2004), « Allongement de la vie et évolution des pathologies », *Gérontologie et sociétés*, n°108, p. 15-34. <https://doi.org/10.3917/gs.108.0015>
- Meslé, F., Vallin, J., Robine, J-M., Desplanques G., Cournil A. (2010), « Supercentenarians in France », in Maier H., Gampe J., *et al.* (eds), *Supercentenarians*, Berlin Heidelberg, Springer (coll. Demographic Research Monographs), p. 120-135.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-11520-2_7
- Nations Unies (2019). World Population Ageing. Département des affaires économiques et sociales, Division de la population, disponible sur le site Internet suivant :
<https://www.un.org/en/development/desa/population/publications/pdf/ageing/WorldPopulationAgeing2019-Report.pdf>
- Ouellette, N. (2016), « La forme de la courbe de mortalité des centenaires canadiens-français », *Gérontologie et société*, vol.38, n°151, p. 41-53.
<https://doi.org/10.3917/gsl.151.0041>
- Ouellette, N., Meslé, F., Vallin, J., Robine, J-M. (2020), « Supercentenarians and semi-supercentenarians in France », in Maier H., B. Jeune, J.W. Vaupel (eds), *Exceptional Lifespans*, Berlin Heidelberg, Springer (Demographic Research Monographs series), p. 105-123. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49970-9_9

- Pollard, J.H. (1973), *Mathematical models for the growth of human populations*. Cambridge, Cambridge University Press, 200p.
- Poulain, M. (2010a), « On the age validation of supercentenarians », in Maier H., Gampe J., *et al.* (eds), *Supercentenarians*, Berlin Heidelberg, Springer (coll. Demographic Research Monographs), p. 3-30. https://doi.org/10.1007/978-3-642-11520-2_1
- Poulain, M. (2010b), « Le registre de population belge », *Histoire de la population Belgique et de ses territoires: Chaire Quetelet 2005*, Louvain la Neuve. Louvain la Neuve, Presses universitaires de Louvain, p. 83-116.
- Poulain, M., Chambre, D., Foulon, M. (1999), « Centenarian validation in Belgium », in Jeune, B., Vaupel, J., (eds), *Validation of Exceptional Longevity*, Odense, Odense University Press (coll. Odense Monographs on Population Aging, vol. 6), p. 97-118.
- R Core Team (2007), R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienne, Autriche, à télécharger sur le site Internet suivant : <https://www.R-project.org>.
- Rau, R., Ebeling, M., Peters, F., Bohk-Ewald, C., Missov, T. (2017), « Where is the level of the mortality plateau? », papier présenté au *Living to 100 Symposium*, Orlando, 4-6 janvier.
- Rau, R., Muszynska, M.M., Vaupel, J.M., Baudisch, A. (2009), « At what age does mortality start to decelerate? », papier présenté au Population Association of American's annual meeting, Détroit (États-Unis), 30 avril au 2 mai.
- Rau, R., Soroko, E., Jasilionis, D., Vaupel, J.W. (2008), « Continued reductions in mortality at advanced ages », *Population Development and Review*, vol.34, n°4, p. 747-768. <https://doi.org/10.1111/j.1728-4457.2008.00249.x>
- Sauvy, A., (1961), *Les limites de la vie humaine*. Paris, Hachette, 151p.
- Thatcher, R. (1999), « The long-term pattern of adult mortality and the highest attained ages », *Journal of the Royal Statistical Society*, vol.162, part 1, p. 5-43. <https://doi.org/10.1111/1467-985x.00119>
- Thatcher, R., Kannisto, V., Andreev, K. (1998), *The force of mortality at ages 80 to 120*, Odense, Odense University Press (coll. Odense Monographs on Population Aging, vol.5), 104p.
- Vaupel, J., Rau, R., Domantas, J. (2006), « The remarkable, accelerating decline in mortality at older ages and the prospects for further improvement in life expectancy », *Biochimica Clinica*, vol.30, supp. n°1, s4-s5.
- Weibull, W.A. (1951), « A statistical distribution function of wide applicability », *Journal of Applied Mechanics*, n°18, p. 293-297. <https://doi.org/10.1115/1.4010337>