

ÉTUDE DES VULNÉRABILITÉS SANITAIRES AUX ÉVÉNEMENTS MÉTÉOROLOGIQUES EXTRÊMES ET ÉLABORATION DE SEUILS D'ALERTE POUR LE QUÉBEC

Fateh Chebana, INRS-ETE
Céline Campagna, INSPQ et INRS-ETE
Taha B. Ouarda, INRS-ETE
Pierre Gosselin, INSPQ et INRS-ETE
Éric Lavigne, Santé Canada

15 mars 2022

Les résultats et opinions présentés dans cette publication sont entièrement la responsabilité des auteurs et n'engagent pas Ouranos ni ses membres.

Ce projet est financé par le gouvernement du Québec et répond aux objectifs du Plan pour une économie verte 2030.



Table des matières

1. Introduction	4
2. Contexte / objectifs.....	4
3. Cadre théorique / compte-rendu de la revue de la littérature	5
4. Méthodologie / données	7
5. Résultats.....	10
6. Analyse et discussion	15
7. Conclusion et recommandations	19
8. Références	22

1. Introduction

Les événements météorologiques extrêmes, tels que les vagues de chaleur et les vagues de froid, ont des impacts importants sur la vie et la santé humaine, et peuvent augmenter la mortalité quotidienne (p. ex. [7], [8]). Par exemple, la vague de chaleur qui a touché plusieurs pays européens en été 2003 a causé environ 35 000 décès supplémentaires liés à la chaleur en Europe du Sud [9]. Au Québec, en juillet 2010, on a observé un excès de mortalité quotidienne d'environ 30 % [10]. En hiver, les décès excessifs liés au froid sont observés chaque année, par exemple une moyenne de 25 000 décès supplémentaires en hiver en Angleterre et au Pays de Galles [11].

Tous ces événements météorologiques extrêmes sont particulièrement importants pour la province de Québec. En effet, l'hiver est long et généralement froid par rapport aux autres endroits du monde. En plus, au Québec, les vagues de chaleur en été sont généralement sporadiques, mais récurrentes et en augmentation dans un climat changeant. De nombreuses études ont analysé le lien entre la santé et le climat (ex. [12]–[17]). Ainsi, l'amélioration et le développement continu du système d'alertes sanitaires québécois aux événements météorologiques extrêmes est nécessaire pour permettra aux autorités de santé publique de gérer le risque relié aux chaleurs ou froids extrêmes, et ainsi réduire les impacts sur la santé humaine avant et durant ces événements.

Pour établir un système d'alertes sanitaires aux variables météorologiques, il n'existe pas de méthode unique [1], [18]–[23]. Aucune définition universelle pour une vague de chaleur ou une vague de froid ayant un impact sur la santé n'est disponible, car elles varient en raison de la variation des températures dans différentes régions géographiques et de l'adaptation de leur population. De nombreux pays ont établi et développé leurs systèmes d'alerte et de surveillance météorologique reliés à la santé (p. ex. [1], [18]–[23]). Ces systèmes ont déjà démontré leurs utilité et efficacité dans la réduction de la mortalité liée aux événements météorologiques extrêmes ([24], [25]), mais la plupart portent seulement sur la chaleur.

2. Contexte / objectifs

L'objectif principal de cette étude est de développer de nouvelles méthodologies de construction de seuils-indicateurs pour certaines variables sanitaires importantes pour l'adaptation aux changements climatiques en santé, pour le Québec.

Les sous-objectifs spécifiques de ce projet sont :

- I. Établir des seuils sanitaires météorologiques pour le Québec, en se basant sur une approche déjà utilisée au Québec (méthode dite classique), pour des syndromes sanitaires et variables climatiques (certains événements météo extrêmes – température, smog, etc.) potentiellement associées, mais non étudiées auparavant :
- II. Explorer et proposer, pour le Québec, de nouvelles approches de construction des seuils-indicateurs et explorer l'application de ces nouvelles méthodologies.

3. Cadre théorique / compte-rendu de la revue de la littérature

Un système d'alerte se développe généralement en 2 parties. La première détermine les seuils (sanitaire et météorologiques), et la deuxième construit l'indicateur basé sur les variables météorologiques. Les systèmes d'alerte existants pour les vagues de chaleur se basent généralement sur des indicateurs météorologiques (température) à partir desquels des seuils sont déterminés, et la valeur de ces seuils est associée à une surmortalité importante, pour une région donnée. Cependant, les seuils d'une région ne peuvent être appliqués directement à une autre région. Si des régions comptent seulement un petit nombre d'habitants, ceci réduit la puissance des méthodes utilisées. De plus, les régions varient beaucoup en latitude et topographie, ce qui conduit à une hétérogénéité climatique. Par exemple, la méthode pour le système en France [19] prend en compte une tendance de mortalité, mais elle ne peut pas être appliquée aux zones où le nombre de décès est faible ou le niveau de mortalité est différent selon les régions. Les méthodes de [22], [23] permettent de prendre en compte les différents niveaux de mortalité journalière, néanmoins, elles ne portent pas sur l'hétérogénéité du climat. La méthode de [21] est l'opposée des deux dernières, puisqu'elle s'intéresse seulement au problème des différents niveaux de climat.

Pour le Québec, un système d'alerte pour les vagues de chaleur est déjà établi [1]. Il prend en compte la tendance (dans les données sanitaires ou climatiques) lors du calcul de l'association avec la surmortalité, ainsi que l'hétérogénéité du climat et de la densité de population des différentes régions de la province. De plus, considérant que, dans le modèle statistique, l'effet de la température diminue avec le temps (c.-à-d. le jour le plus proche du jour J cible a plus de contribution dans les modèles que

les jours précédents), son indicateur météorologique se base sur des moyennes non uniformément pondérées de température maximale et minimale quotidiennes sur 3 jours consécutifs. Dans les autres systèmes existants, on trouve normalement un indicateur pour un jour seulement [19], ou sur une moyenne uniformément pondérée [26].

Bien que les froids extrêmes aient des impacts importants sur la vie et la santé humaines, surtout pour les régions nordiques comme le Québec, il y a très peu de recherches sur les systèmes d'alerte pour le froid. Lors d'une revue de littérature, le seul système trouvé est établi en Angleterre pour la vague de chaleur, et pourrait aussi être utilisé pour déterminer les seuils dans le cas du froid [20].

La première limite du système actuellement en vigueur au Québec pour la chaleur consiste au choix du seuil. Ce choix est actuellement en partie subjectif (basé sur les modèles statistiques, mais également sur la gestion du risque), et non uniquement statistiquement fondé. En outre, dans la littérature, les seuils sont identifiés à partir d'une analyse sur toutes les observations et pas particulièrement les extrêmes.

La pollution de l'air est un problème majeur de santé publique avec un certain nombre d'études épidémiologiques rapportant l'impact important de divers polluants atmosphériques sur la mortalité et la morbidité [27]. Les maladies respiratoires et cardiovasculaires sont particulièrement impactées par la pollution de l'air [28], [29]. Les polluants les plus étudiés sont les particules fines (PM2.5) [30], [31], l'ozone (O3) [32] et le dioxyde d'azote (NO2) [33]. Ces effets ont conduit de nombreuses autorités de santé publique à mettre en place des systèmes d'alerte précoce [34]. De tels systèmes ont été implantés dans de nombreux pays comme le Royaume-Uni, les États-Unis, la France et la Chine [35], [36] ainsi qu'au Québec et au Canada [37]–[39]. Les systèmes d'alerte précoce actuels impliquent généralement la surveillance d'un indice de qualité de l'air (IQA) et l'utilisation d'un seuil ou d'une échelle prédéfinis (c'est-à-dire plusieurs seuils) pour informer la population des risques potentiels [34]. Les recherches sur les systèmes d'alerte précoce portent généralement sur l'amélioration de la modélisation et de la prévision de l'IQA [40]. Cependant, beaucoup moins d'attention est accordée au choix des seuils, qui sont principalement basés sur des revues globales d'évaluation des risques [41] et sont donc largement liés à la gestion des risques. La principale faiblesse des systèmes d'alerte précoce est donc que les seuils ne reflètent pas nécessairement avec précision l'impact des polluants atmosphériques sur la santé

publique, pour une région donnée. Des examens récents de la pollution de l'air et des impacts sur la santé montrent une grande variation mondiale des concentrations de PM2.5, avec une forte variabilité des estimations des effets entre les villes, jusqu'à un ordre de grandeur [42]. Ils montrent également, dans le contexte canadien, les effets nocifs de la pollution de l'air extérieur à des concentrations inférieures aux normes nord-américaines existantes pour les enfants. De plus, des effets hétérogènes des polluants atmosphériques ont été trouvés selon la ville, le sexe, le statut socio-économique et la saisonnalité [43]. Il semble y avoir des impacts spécifiques sur les personnes âgées, mais peu d'études ont spécifiquement abordé ce contexte [44]. De plus, l'impact sanitaire de chacun de ces polluants peut varier selon la saison, en interagissant avec la température [45].

4. Méthodologie

Données utilisées

Cette section présente les données utilisées au cours du projet. Elles sont principalement divisées en deux catégories: les variables environnementales et les variables sanitaires. La période d'étude est du 1er janvier 1994 au 31 décembre 2019.

Les données météorologiques sont les températures quotidiennes (max, min, moyenne), la pression de vapeur et la vitesse du vent (max, min, moyenne). Les deux premières sont extraites à partir de la base de données DayMet de la NASA, disponibles au www.daymet.ornl.gov. Ce sont des données simulées sur une grille spatiale de 1km × 1km. Seules les données situées dans les zones à l'intérieur ou près des zones d'écoumène de chacune des Régions Socio-Sanitaires (RSS) ont été extraites. Les données sur la vitesse du vent sont des observations à des stations fournies par Environnement et Changement Climatique Canada (ECCC). De même, seules les stations appartenant à la zone de l'écoumène ont été extraites.

Les données de pollution de l'air utilisées sont celles des deux principales régions métropolitaines de recensement (RMR) de la province de Québec: la ville de Québec et Montréal. Les valeurs journalières maximales des particules fines (PM2.5), de l'ozone (O3), et du dioxyde d'azote (NO2) proviennent du programme national de surveillance de la qualité de l'air (National Air Pollution Surveillance, NAPS) d'Environnement et changements climatiques Canada (ECCC).

Les données sanitaires utilisées pour les études sur la chaleur et le froid sont la mortalité et l'hospitalisation journalières toutes causes pour chacune des 18 RSS du Québec. Elles sont fournies par l'Institut National de Santé publique du Québec (INSPQ), dans le cadre d'une entente de collaboration. Pour l'étude sur la pollution atmosphérique, les données de mortalité pour les causes reliées à des problèmes cardiovasculaires et respiratoires (diagnostique primaire et secondaire) ont été utilisées.

Méthodes

1. Seuils d'alerte pour le froid : La méthodologie adoptée pour développer le système du froid est inspirée de celle de la chaleur actuellement utilisée au Québec [1]. Cependant, certaines adaptations et améliorations méthodologiques ont été ajoutées, et le système couvre l'ensemble du Québec. En effet, une méthode de choix du délai (lag; délai entre l'exposition au froid et l'observation de l'impact sanitaire) est incorporée afin de rendre ce choix plus objectif et mieux fondé. De plus, le calcul de la surmortalité (ou surhospitalisation) est revu en se basant sur les Splines (au lieu de la moyenne mobile) pour être plus représentatif des variations et des particularités des séries de mortalités. Entre autres, la sensibilité des résultats du facteur confondant de l'influenza a été vérifiée (ce qui n'était pas le cas pour le modèle de la chaleur). De plus, dans cette étude, on a développé deux modèles, un pour la mortalité et un autre pour l'hospitalisation. Le lecteur peut se référer à l'article publié [2] pour plus de détails méthodologiques.

2. Seuils d'alerte pour la pollution atmosphérique : La méthodologie adoptée pour développer le système de la pollution atmosphérique est également inspirée de celle de la chaleur actuellement utilisée au Québec. Ce projet couvre les deux plus grandes RMR de la province de Québec : Montréal et Québec, et vise à adapter les indicateurs et les seuils à la population de chaque ville, en se basant sur une évaluation des données des niveaux de pollution de l'air qui sont associés à des risques accrus de mortalité. À noter que peu d'études ont cherché à proposer des recommandations de pollution de l'air basées sur la santé, comme [46], qui pondère les polluants dans l'IQA en fonction des risques relatifs (RR) estimés pour la santé. [47] fixent un seuil pour les PM10 dans le cadre d'une évaluation globale des seuils d'alerte climatique pour le Grand Londres. Cependant, ces idées reposent sur l'interprétation d'une relation dose-délai-réponse et non sur l'estimation directe de seuils. Dans la présente étude, nous considérons une méthodologie qui permet d'estimer des seuils et des indicateurs sur des données

historiques de pollution de l'air et des effets observés sur la santé. La variable Ox a été utilisée comme indice combiné d'exposition (O_3 et NO_2 ; [53]). Le lecteur peut se référer à [3] pour plus de détails méthodologiques.

3. Seuils d'alerte mensuels et évolutifs pour la chaleur : La méthodologie proposée est également adaptée de travaux antérieurs [1], avec certaines modifications. L'échelle de temps est mensuelle (au lieu de la saison complète) et la période d'étude s'étend d'avril à octobre (au lieu de mai à septembre). Les seuils de température de T_{max} et T_{min} ont été explicitement modulés aux données climatiques de chaque mois. Cette période d'étude considère la non-acclimatation humaine aux vagues de chaleur potentielles qui pourraient survenir dans les périodes de transition (fin du printemps ou début de l'automne) [48]. De plus, une règle de détermination du seuil préliminaire en fonction des caractéristiques des vagues de chaleur a été introduite pour distinguer les épisodes de mortalité liés à la chaleur des artefacts. Des splines et un modèle non linéaire à décalage distribué (DLNM) ont également été appliqués pour calculer la surmortalité attendue ainsi que les délais (entre l'épisode de chaleur et l'impact sur la mortalité), respectivement, comme dans [49]. La méthode comprend quatre étapes : a) Calculer la surmortalité (EM) par rapport à une ligne de base (*baseline*) ; b) Identifier les épisodes de surmortalité liés à la chaleur ; c) Sélectionnez les retards maximaux pour les indicateurs ; d) Choisir les seuils optimaux et les indicateurs associés.

Dans cette étude, les données de chaque mois sont traitées séparément pour obtenir des seuils mensuels spécifiques. Cependant, le système (modèle) final est couvrir l'ensemble de la période. Ainsi, l'évaluation de la performance a été évaluée pour le système dans son ensemble en faisant le lien entre les mois. Le lecteur peut se référer à [4] pour plus de détails méthodologiques.

4. Développement méthodologique de seuils avec l'apprentissage machine: diverses approches ont été considérées. Les approches proposées sont les arbres de régression basés sur des modèles (MOB), les splines de régression adaptative multivariée (MARS), la méthode d'induction des règles du patient (PRIM) et les modèles d'indice adaptatifs (AIM). La plus simple identifiée est la régression de seuil, ou l'estimation du point de rupture lorsque la variable est le temps, qui cherche une rupture dans une relation linéaire. Cependant, cette méthode a tendance à considérer chaque variable séparément, c'est pourquoi nous considérons plutôt le cadre connexe des arbres de régression via l'algorithme MOB [50], qui divise de manière itérative la région couverte par X afin de tenir compte de l'interaction. Une autre

façon de voir les scissions consiste à les considérer comme des nœuds dans un contexte de spline linéaire. Nous considérons donc l'algorithme MARS qui ajoute itérativement des nœuds aux splines linéaires tout en tenant compte de l'interaction entre les variables dans X . Enfin, nous considérons également le cadre de l'estimation des règles, où les règles sont de la forme $X \geq s$. L'algorithme PRIM cherche à trouver de telles règles afin de maximiser une fonction objective, tandis que l'algorithme AIM utilise de telles règles pour la prédiction. Le lecteur peut se référer à [6] pour plus de détails méthodologiques.

5. Développement d'indices composites à partir d'indicateurs : Nous proposons ici un modèle nommé modèle d'indice additif groupé sous contraintes (CGAIM) pour créer des indices faciles à interpréter et prédictifs d'une variable de réponse, à partir d'une liste potentiellement longue de variables. Le CGAIM considère des groupes de prédicteurs qui vont naturellement ensemble pour produire des indices significatifs. Il permet également l'ajout de contraintes linéaires sur les poids des indices pour aider l'utilisateur à façonner les indices de manière interprétable, ainsi que des contraintes sur la forme de la relation entre les indices créés et la variable de réponse. Un algorithme efficace est proposé pour estimer le CGAIM. Une étude de simulation est réalisée pour évaluer les performances de l'algorithme proposé. Le CGAIM est ensuite appliqué pour construire des indices de chaleur et de qualité de l'air (pour le développement de seuils). Il permet de créer des indices significatifs pour aider les décideurs, tels que ceux de la santé publique, à prendre des mesures préventives. Nous pensons que le CGAIM pourrait devenir utile dans une grande variété de situations, telles que les études multi-polluants. Les contraintes permettent au modèle proposé d'intégrer des informations supplémentaires et d'être utile dans une grande variété de situations. Par exemple, des indices contraignants et la forme de la fonction peuvent permettre d'obtenir des estimations robustes dans des situations signal/bruit faibles, pour lesquelles les méthodes flexibles habituelles peuvent échouer [51]. En outre, les contraintes peuvent également forcer les coefficients à être estimés avec un signe spécifique ou une plage étroite pour réduire les problèmes de confusion de risque tels que le paradoxe d'inversion [52]. Le lecteur peut se référer à [5] pour plus de détails méthodologiques.

5. Résultats

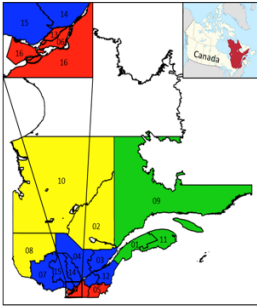
Cette section couvre les travaux des 5 études (déjà publiés), dont 3 recherches appliquées (froid, pollution et seuil évolutif) avec développement méthodologique. Les 2 autres projets sont d'avantages

fondamentaux, avec des contributions méthodologiques novatrices et leurs applications pour le Québec (seuils avec apprentissage machine, construction d'indice). Cette section décrit en résumé les travaux.

1. Seuils d'alerte pour le froid : Le modèle développé pour le froid couvre l'ensemble des régions de la province pour la surmortalité et les surhospitalisations. Les résultats sont résumés dans Tableau 1. On retrouve plusieurs nouveautés méthodologiques au niveau des délais (lags - en introduisant l'utilisation du DLNM afin de réduire la subjectivité), et l'utilisation des fonctions *Splines* afin de rendre le calcul de la surmortalité plus réaliste, tenir compte des variabilités dans les données et leur tendance, et réduire la subjectivité dans les modèles antérieurs ([1]). Le lecteur peut se référer à [2] pour les résultats détaillés.

Tableau 1 : Seuils de froid (Temp. maximale et minimale) reliés aux surhospitalisations (violet) ou surmortalités (rouge) selon la région sociosanitaire.

	RSS	Nom RSS	Nombre d'épisodes	Poids optimal		Seuils (°C)	Sensibilité (%)	FA (par an)
				a0	a1			
classe 1	5	Estrie	4	0.5	0.5	(-15,-23)	100	0.68
	6	Montréal						
	13	Laval						
	16	Montérégie						
classe 2	3	Capitale-Nationale	4	0.5	0.5	(-16,-28)	100	0.68
	4	Mauricie						
	7	Outaouais						
	12	Chaudière-Appalaches						
	14	Lanaudière						
classe 3	15	Laurentides	7	0.7	0.3	(-13,-26)	100	1.10
	2	Saguenay						
	8	Abitibi						
classe 4	10	Nord-du-Québec	6	0.7	0.3	(-17,-30)	100	1.30
	1	Bas-Saint-Laurent						
classe 4	9	Côte-Nord	4	0.5	0.5	(-15,-23)	100	1.27
	11	Gaspésie						



2. Seuils d'alerte pour la pollution atmosphérique : nous avons développé un modèle adapté en tenant compte de la surmortalité. La variable Ox a été utilisée comme indice combiné d'exposition (O3 et NO2; [53]). Les principaux résultats (seuils d'alertes selon les RMR et les saisons) sont présentés dans le Tableau 2. Le Tableau 3 présente une comparaison avec d'autres seuils de surveillance actuellement en utilisation, mais qui ne tiennent pas compte de l'impact sanitaire régional dans leur conception (leur conception est basée sur des évaluations du risque générique et la prise en compte des enjeux de gestion du risque). Le lecteur peut se référer à [3] pour les résultats détaillés.

Tableau 2 : Seuils d’alerte sanitaire pour la pollution atmosphérique applicables aux RMR de Montréal et Québec

Ville	Saison	PM _{2.5} (µg/m ³)			O _x (ppb)			Sensibilité (%)		FA par an	
		α ₀	α ₁	s	α ₀	α ₁	s	Jours	Épisodes	Jours	Épisodes
Montréal	Été	0.9	0.1	31	0.5	0.5	43	22.4	87.5	3.1	1.5
	Hiver	0.5	0.5	25	0.8	0.2	26	15.4	71.4	8.0	3.7
Ville de Québec	Été	0.5	0.5	32	0.8	0.2	23	20.4	85.7	4.7	2.6
	Hiver	0.5	0.5	33	0.7	0.3	21	9.5	50.0	15.5	7.4

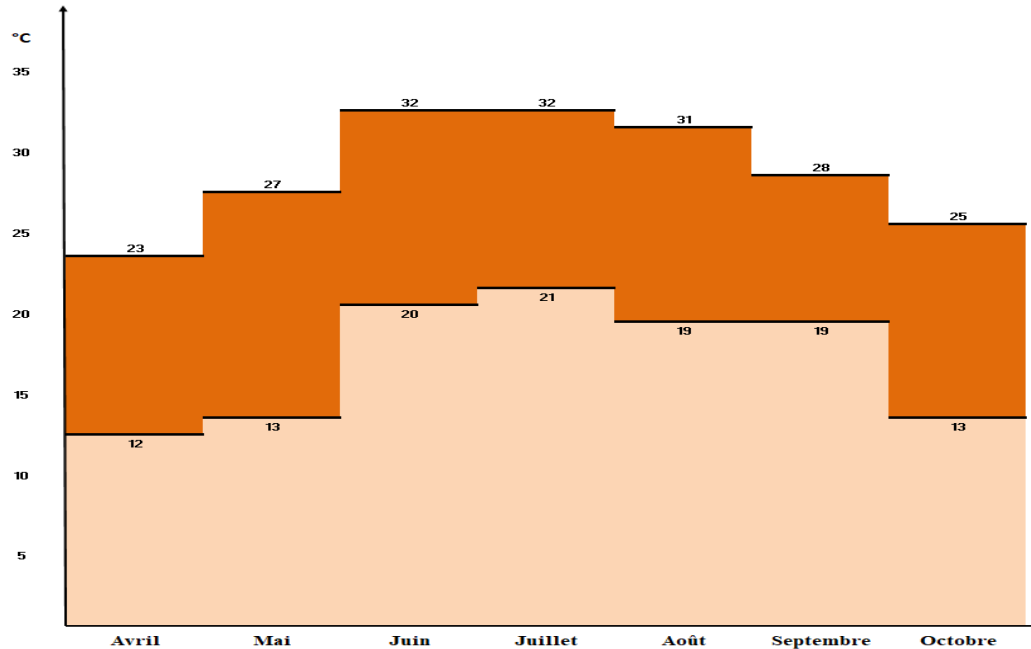
Tableau 3 : Comparaisons des seuils d’alerte sanitaire pour la pollution atmosphérique avec les seuils ou normes des différents systèmes de surveillance de pollution atmosphérique au Québec, Canada ou à l’international.

	PM _{2.5}		O ₃		NO ₂		O _x	Référence
	Indicateur	s (µg/m ³)	Indicateur	s (ppb)	Indicateur	s (ppb)	s (ppb)	
Monde	Moyenne sur 24h	25	Moyenne sur 8h	50	Moyenne sur 1h	106	69 *	[40]
Canada	Moyenne sur 24h	27	Moyenne sur 8h	62	Moyenne sur 1h	60	61 *	[37]
Province de Québec	Moyenne sur 1h	30	Moyenne sur 24h	80	Moyenne sur 1h	213	125 *	[39]
Montréal	Moyenne sur 3h	35	-	-	-	-	-	[54]

* valeurs estimées de O_x basées sur les valeurs indicatives de NO₂ et O₃ en utilisant la formule: $(2.075 \times O_3 + 1.07 \times NO_2) / 3.145$ [53]

3. Seuils d’alerte mensuels pour la chaleur : Un nouveau système est établi et fondé sur des seuils mensuels (pas le même seuil sur toute la saison) et couvre une saison plus élargie (incluant les mois d’avril et octobre). La Figure 1 résume et illustre l’évolution mensuelle des seuils sur cette saison élargie. Ainsi le système proposé tient compte de l’évolution saisonnière de la température, et de l’adaptation de la population. Le lecteur peut se référer à [4] pour les résultats détaillés. Les seuils sont plus faibles au printemps et à l’automne, en particulier en octobre. Ces résultats étaient attendus, puisque les seuils reflètent de l’évolution saisonnière de la température, la fréquence des vagues de chaleur (puissance statistique moindre au printemps et automne), et l’adaptation individuelle, populationnelle et organisationnelle à la chaleur. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour mieux identifier les facteurs explicatifs en cause.

Figure 1 : Seuils d’alerte mensuels pour la chaleur (Temp. maximale et minimale) reliés à une surmortalité dans la région métropolitaine de Montréal .



4. **Développement méthodologique de seuils** : Afin de déterminer le seuil dans un système d’alerte, différentes approches d’apprentissage machine ont été explorées. Cette recherche est novatrice puisque ces approches sont considérées pour la première fois dans la littérature pour déterminer les seuils, peu importe le domaine d’application. L’application de ces méthodes sur les données de la RMR de Montréal a montré la supériorité de l’approche PRIM, comparativement aux autres méthodes, comme présentées dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Seuils d’alerte sanitaire pour la chaleur et leur performance respective, selon les différentes méthodes statistiques et appliquées à la RMR de Montréal.

Méthode	Seuils		Alertes ^a			
	Tmin	Tmax	Nombre de jours	Nombre d'épisodes	Moyenne d'OM ^b (%)	Couverture (%)
MOB^c	-	32.7 (29.2-32.7)	12 (10-126)	9 (6-63)	42.6 (12.4-58.4)	13.4 (6.2-45.2)
MARS^d	18.4 (4.7-21.8)	32.7 (24.4-32.6)	10 (10-103)	7 (5-49)	47.0 (7.4-55.1)	12.3 (5.3-37.9)
PRIM^e	20.3 (19.3-21.8)	32.1 (29.2-32.6)	11 (8-25)	5 (4-16)	43.9 (8.6-59.3)	12.6 (3.1-22.0)
AIM^f	20.4 (18.4-20.4)	32.2 (28.2-32.3)	9 (12-275)	5 (6-97)	49.7 (8.5-59.5)	11.7 (13.3-69.8)
Référence^g	20.0	33.0	4	3	73.3	7.7

Les chiffres entre parenthèses sont les intervalles de confiance 95% de Bootstrap.

^a Le nombre de jours correspond au nombre absolu de dépassements, tandis que les épisodes correspondent à des rassemblements de jours de dépassement, séparés par moins de 3 jours.

^b OM : *Over-mortality*

^c MOB : *Model-based recursive partitioning*

^d MARS : *Multivariate adaptive regression splines*

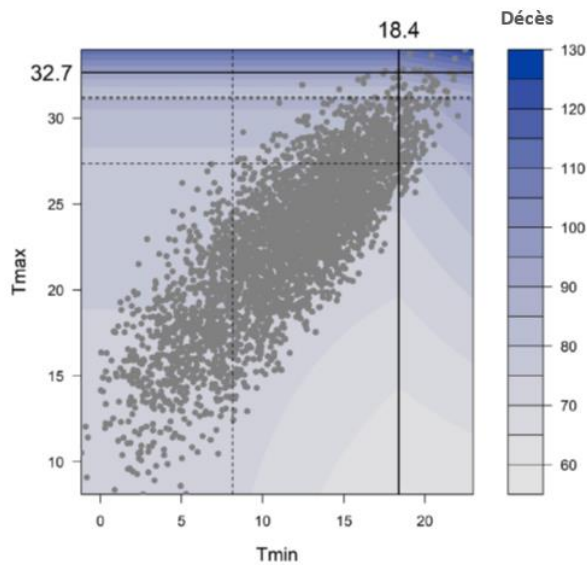
^e PRIM : *Patient Rule-Induction Method*

^f AIM : *Adaptive Index Models*

^g La référence est les seuils et les performances à partir de Chebana et al. 2013

En particulier, les seuils obtenus par PRIM sont illustrés sur la Figure 2 (se référer à [6] pour les résultats détaillés).

Figure 2 : Illustration des seuils d’alerte de Temp. minimale et maximale obtenus par la méthode PRIM, cas de la RMR de Montréal.



5. Développement d'indices composites à partir d'indicateurs : Les simulations montrent que le modèle proposé CGAIM peut estimer avec précision les poids de l'indice, ainsi que sa relation avec la variable sanitaire par rapport à d'autres modèles avancés et récents, ce qui est un pas de plus dans l'obtention d'indices représentatifs pour des applications pratiques. Les résultats montrent que les contraintes aident le modèle à récupérer les valeurs réelles des coefficients. L'étude de simulation montre également que le modèle est robuste pour les échantillons de petite taille, les prédicteurs hautement corrélés et les dimensions élevées avec des modèles de corrélation complexes. Le CGAIM est également comparé au *Projection Pursuit Regression* (PPR) pour évaluer les bénéfices du regroupement des variables, au *groupwise Minimum Average Aariance Estimator* (gMAVE) ainsi qu'aux algorithmes *Functional Additive Cumulative Time Series* (FACTS). Ces comparaisons suggèrent que le CGAIM est plus stable que ces algorithmes. De plus, les simulations montrent que le modèle peut récupérer efficacement les indices et variables les plus prédictifs de la réponse. Deux applications typiques de l'épidémiologie environnementale illustrent l'utilisation du CGAIM ainsi que ses avantages en pratique. La première application concerne un modèle multi-indices de chaleur estivale qui montre également les forces interprétatives du modèle, notamment à travers la sélection d'indices. La deuxième application est un indice unique de pollution de l'air. Les résultats obtenus dans ces applications chaleur et pollution de l'air sont à la fois cohérents avec la littérature scientifique et éclairants pour les systèmes d'alerte précoce. Il décrit également l'avantage des contraintes pour obtenir des résultats réalistes et stables (se référer à [5] pour les résultats détaillés).

6. Analyse et discussion

1. Seuils d'alerte pour le froid : La principale différence entre les vagues de chaleur et de froid est que les pics importants de surhospitalisations lors des épisodes de chaleur présentent généralement des valeurs extrêmement élevées, qui sont significativement différentes de la moyenne, alors que le signal est moins évident dans le cas du froid [56]. De plus, le délai de réponse en termes de mortalité et d'hospitalisation est court en période de canicule (quelques jours), alors qu'il est généralement plus long dans le cas du froid, parfois jusqu'à 14 jours [12], [14]. L'Organisation météorologique mondiale (OMM) a publié en 2018 des lignes directrices sur les phénomènes de froid extrême [55], tandis qu'une méta-analyse de 2013 [56] a passé en revue les critères utilisés par différents auteurs pour les vagues de froid dans plusieurs pays, incluant le Canada. Généralement, les seuils existants pour les événements

de froid extrême sont déterminés par une valeur absolue ou un quantile de variables météorologiques, sans lien connu avec un problème de santé. Le but de la méthode considérée dans la présente étude était d'ajuster ces seuils en combinant les effets des surhospitalisations et surmortalités. Par rapport aux seuils directement définis par les quantiles, le seuil-indicateur proposé ici a un nombre inférieur de fausses alertes et possède une sensibilité très élevée, ce qui est très intéressant. Cette étude est la première portant spécifiquement sur un modèle pour définir un système d'alerte sanitaire au froid axé sur les données d'hospitalisation au Québec. Les seuils de température définis par notre modèle sont plus élevés (chaud) que les seuils d'alerte de température de froid extrême émis par ECCC, puisque les seuils utilisés par ECCC visent à prévenir les engelures et l'exposition prolongée au froid extrême (ex. : travailleurs), alors que les nôtres visent plutôt à prévenir la mortalité et les hospitalisations reliées au froid (pas seulement extrême). Une analyse de sensibilité a démontré que la prise en compte des cas d'influenza, maladie infectieuse fréquente et mortelle chaque hiver au Québec, n'affecte pas les seuils générés.

2. Seuils d'alerte pour la pollution atmosphérique. De nombreuses organisations ont établi des lignes directrices sur la qualité de l'air à différentes échelles, telles que l'Organisation mondiale de la santé (OMS) à l'échelle mondiale, Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) pour le pays, le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements climatiques (MELCC) pour la province de Québec, et le Réseau de Surveillance de la Qualité de l'Air (RSQA) pour la seule ville de Montréal (environ la moitié de la région métropolitaine). Ces lignes directrices sont spécifiques à l'échelle géographique de gestion. Les valeurs seuils développées pour la RMR de Montréal par notre équipe pour les expositions de courte durée aux PM_{2.5} (31 µg/m³ et 25 µg/m³; été et hiver) se situent dans la fourchette de ces différentes recommandations. Le seuil estival montréalais est proche de celui utilisé par le MELCC dans la province de Québec, tandis que le seuil hivernal est plus proche de la recommandation de l'OMS. Cependant, les seuils montréalais trouvés pour le proxy Ox (prenant en compte O₃ et NO₂) sont bien inférieurs aux lignes directrices calculées. Cela peut s'expliquer par les différents indicateurs qui sont basés sur une exposition de très courte durée, alors que nous considérons ici des moyennes sur deux jours des valeurs maximales. Cela pourrait également être une indication que Ox (un indicateur du potentiel oxydatif) ait un impact à des valeurs plus faibles que prévu, démontrant le risque réel lorsqu'on prend en compte les mélanges de composés auxquels sont exposées les populations. Globalement, notre système est moins performant à Québec (plus de fausses alarmes et

une sensibilité moindre), s'expliquant par une plus faible puissance dans les calculs - la population de la région métropolitaine de Québec est de 800 000 contre environ 4 millions pour la région métropolitaine de Montréal. Cette différence se traduit par une moindre mortalité cardiovasculaire ou respiratoire moyenne (une moyenne de trois décès par jour). Cela rend la modélisation d'un système d'alerte plus périlleuse, puisque la réponse à une exposition de pollution atmosphérique extrême peut être cachée dans les variations quotidiennes.

3. Seuils d'alerte mensuels pour la chaleur : Cette étude propose pour la première fois un système adapté à la surmortalité selon les températures propres chaque mois (au lieu d'un système avec un seul seuil pour une saison entière). La détection des vagues de chaleur s'effectue ici sur une saison « chaleur » prolongée (avril-octobre) en fonction des caractéristiques des données sanitaires et de température de chaque mois, créant ainsi un système avec seuil adaptatif et évolutif. Les analyses de sensibilité confirment que le choix de la résolution mensuelle permet une bonne caractérisation des vagues de chaleur, a une bonne sensibilité et peu de fausses alertes. Dans ce nouveau système, le seuil d'alerte du mois de juillet est similaire au seuil de vagues de chaleur utilisé par le ministère de la Santé et des services sociaux du Québec³ pour la région montréalaise.

4. Développement méthodologique de seuils : Quatre méthodes d'apprentissage automatisé différentes ont été testées pour l'identification des seuils basée sur les données : MOB, MARS, PRIM et AIM. Ces méthodes ont été appliquées à un grand nombre d'ensembles de données simulées et à une étude de cas de données de santé, et comparées à l'aide d'un certain nombre de critères. Les résultats de l'étude de simulation et de l'exemple d'étude de cas montrent que les quatre méthodes peuvent aboutir à des seuils appropriés avec très peu de choix humain (subjectivité) préalable. En comparaison, les méthodes basées sur des modèles antérieurs, tels que GAM, peuvent ne pas toujours produire une relation suffisamment claire pour en dériver un seuil, un problème rencontré lors de la prise en compte des zones rurales, principalement en raison des dénombrements inférieurs (nombre de mortalités par jour; faible puissance statistique). Les comparaisons entre les quatre méthodes montrent que la meilleure méthode globale est PRIM, présentant la puissance de prédiction la plus élevée dans les simulations et un bon ajustement des événements observés de surmortalité élevée dans l'étude de cas.

³ <https://www.msss.gouv.qc.ca/professionnels/sante-environnementale/chaleur-extreme/systemes-d-alerte-et-de-surveillance/>

5. Développement d'indices composites à partir d'indicateurs : Suite au besoin croissant de comprendre l'impact des mélanges d'expositions environnementales (ou, comme ici, de variables hydrométéorologiques) sur la santé humaine, le présent document propose une méthode pour construire des indices avec contraintes sous la forme d'un modèle d'indice additif groupé sous contraintes (CGAIM). Le CGAIM devrait être utile à la fois pour la modélisation et la création d'indices complets pour les acteurs de la santé publique. Ses points forts incluent la possibilité d'inclure un nombre élevé de prédictors X_j (γ compris les délais/lags), d'inclure des informations préalables supplémentaires provenant d'experts en santé publique et de construire plusieurs indices simultanément. Par rapport aux travaux antérieurs dans la littérature sur le sujet, les principales nouveautés du travail sont donc : i) la possibilité d'ajouter d'éventuelles contraintes linéaires sur les poids de l'indice α_j , ii) l'inclusion d'un lissage contraint dans le modèle pour améliorer l'utilité des indices iii) un algorithme simple et efficace pour estimer les indices et iv) un critère de sélection des indices. La méthode proposée suppose que les variables et leur regroupement sont sélectionnés a priori, avec l'idée que dans de nombreux cas, le chercheur a une idée claire des variables pertinentes à inclure. Cette hypothèse est raisonnable dans de nombreuses applications dans lesquelles un groupement naturel de variables apparaît. Par exemple, en épidémiologie environnementale, les variables d'exposition peuvent souvent être regroupées dans des catégories telles que le climat, la pollution de l'air ou les variables de l'environnement bâti. Des outils courants pour déterminer quelles variables inclure dans une étude tels que les graphes acycliques dirigés ou le clustering peuvent également être utilisés pour déterminer un regroupement a priori. Lorsqu'un nombre limité de groupements concurrents sont étudiés, le critère GCV proposé dans le présent travail peut être utilisé pour trancher. Cependant, une procédure de sélection plus automatisée peut également être nécessaire et un domaine de recherche future consiste donc à proposer un mécanisme de regroupement flexible. Il s'agit d'un problème difficile, car le nombre de classifications possibles augmente considérablement avec le nombre de variables.

7. Conclusion et recommandations, pour chacun des projets

1. **Seuils d'alerte pour le froid** : Cette étude démontre qu'il est possible de développer un système d'alerte sanitaire pour prévenir la surmortalité et la surhospitalisation reliées au froid, en identifiant des seuils de froid pour chaque indicateur de température (Tmax et T min). Afin de couvrir non seulement les grandes villes, mais toutes les régions de la province, un regroupement climatique des régions a été effectué pour les mois froids. Ce type de regroupement avait déjà été fait pour le système d'alerte à la chaleur extrême utilisé au Québec par le MSSS et l'INSPQ, et développé à l'INRS. Pour une classe de régions donnée, les seuils de température pour les hospitalisations sont généralement supérieurs (plus chaud) à ceux pour la mortalité. Malgré que les impacts du froid sur la santé puissent survenir sur une longue période après l'exposition, de quelques jours à quelques semaines, la prise en compte d'indicateurs à court terme (inférieur à quatre jours de délai) ne réduit pas significativement les performances du système, car ils sont capables de prédire correctement les épisodes rapides et importants de surhospitalisation liés au froid avec un nombre acceptable de fausses alertes. De plus, dans un contexte de mesures d'urgence en lien avec le froid, les seuils-indicateurs (Tmin et T max) sont plus faciles à interpréter et à appliquer que ceux visant à prévenir des effets sanitaires à long terme. Enfin, il montre également que l'épidémiologie annuelle de l'influenza n'affecte pas les résultats, démontrant que les cas de mortalité et d'hospitalisation identifiés par le modèle sont en lien direct avec les épisodes de froid.

2. **Seuils d'alerte pour la pollution atmosphérique** : Un système d'alerte sanitaire pour la pollution atmosphérique couvrant les RMR de Montréal et Québec a été développé, démontrant ainsi sa faisabilité. Les seuils développés pour les PM2.5 sont conformes aux directives ou normes de différentes organisations nationales et internationales, mais sont davantage axés sur les événements extrêmes (donc court terme) de pollution et leur conséquence sur la santé, et sont plus précis. Cependant, les seuils développés pour l'indice Ox (un indice combiné de O3 et NO2) sont plus faibles que ceux de la littérature, supposant que la prise en compte des impacts de l'exposition combinée de ces deux composés est plus dommageable. Ces seuils pourront éventuellement être implantés dans le système de surveillance et de prévention en temps réel des impacts des événements météorologiques extrêmes sur la santé publique (SUPREME) du MSSS afin d'alerter les intervenants en santé publique et leurs collaborateurs. Cette étude nous rappelle également que les recommandations sanitaires établies à

l'échelle internationale pour la pollution atmosphérique sous-estiment la relation dose-réponse spécifique à chaque composé qui existe dans un contexte donné, particulièrement dans lors d'une exposition à court terme. En effet, les impacts réels sur la santé dans une zone géographique tiennent à la fois compte de la nature locale des polluants, de leur dispersion, de la sensibilité de la population locale compte tenu de sa démographie et de son état de santé, et de leurs différents comportements qui peuvent augmenter ou réduire l'exposition. De tels seuils adaptés pourraient également parler davantage aux décideurs locaux, car ils reflètent les impacts sur la santé de leurs citoyens. Plus d'études examinant les coûts-avantages impliqués dans le déploiement d'un tel système d'alerte seraient intéressantes pour le mettre en œuvre plus largement.

3. Seuils d'alerte mensuels pour la chaleur : Nous avons développé un système incluant des seuils de température propre chaque mois, ce qui permet de tenir compte de l'adaptation humaine ainsi que de la variabilité climatique au cours de la saison. Ce système, développé seulement dans la RMR de Montréal pour les besoins de la recherche, couvre une période plus longue que le système d'alerte pour la chaleur extrême en utilisation au Québec. Il peut aider les autorités de santé publique à se préparer aux vagues de chaleur pouvant survenir au printemps ou à l'automne, particulièrement dans le contexte de climat changeant. La méthodologie proposée est générale et pourra être aisément appliquée ou adaptée à d'autres régions du Québec ou du Canada. Le système pourrait également être amélioré en tenant compte d'autres données sanitaires, comme les hospitalisations.

4. Développement méthodologique de seuils : La détermination de seuil est un élément clé dans un système d'alerte. Diverses méthodes ont été envisagées pour établir des seuils, chacune avec ses propres forces et faiblesses. Cette partie du projet visait à proposer plusieurs approches axées sur les données et des algorithmes d'apprentissage machine afin d'établir des seuils. Explicitement, les approches proposées sont les arbres de régression basés sur des modèles (MOB), les splines de régression adaptative multivariée (MARS), la méthode d'induction des règles du patient (PRIM) et les modèles d'indice adaptatifs (AIM). D'une part, ces approches sont générales et ne sont pas spécifiques au contexte de la santé environnementale. D'autre part, initialement ces approches ne sont pas conçues pour la détermination des seuils. C'est dans cette partie du projet qu'elles ont été pour la première fois adaptées pour déterminer des seuils et ensuite appliquées dans le contexte des systèmes d'alerte santé-environnement. En se basant sur des simulations et une étude de cas réels, les résultats montrent que

les approches proposées, en plus d'être considérablement moins subjectives, elles sont plus efficaces pour prédire les jours défavorables que les seuils actuels et les méthodes de référence. Plus spécifiquement, l'approche PRIM est globalement à recommander.

5. Développement d'indices composites à partir d'indicateurs : La construction des indices est essentielle dans diverses applications, comme en épidémiologie environnementale. Ils servent à résumer les informations provenant de différentes expositions environnementales tout en conservant un fort pouvoir prédictif. Ainsi, dans un modèle pour établir un système d'alerte, les indices sont le second élément sur lequel les seuils s'appliquent. Pour ce faire, un modèle a été proposé et appelé "modèle d'indice additif groupé sous contraintes" (CGAIM) pour créer des indices faciles à interpréter et prédictifs d'une variable de réponse. Le CGAIM considère des groupes de prédicteurs (par exemple: température, humidité) qui vont naturellement ensemble pour produire des indices significatifs. Il permet également l'ajout de contraintes pour permettre à l'utilisateur à façonner les indices de manière interprétable et se servir de la forme de la relation entre les indices créés et la variable de réponse (mortalité). Les simulations conduites dans cette étude montrent de bonnes performances du CGAIM dans des situations complexes avec de nombreux prédicteurs corrélés (Tmin, Tmax, humidité, etc.). De plus, le CGAIM a été utilisé pour construire un indice de chaleur et un indice de qualité de l'air. De par sa conception et sa flexibilité, le CGAIM est utile dans une grande variété d'autres situations, telles que les études multi-polluants.

8. Conclusion générale et recommandations

Retombées pour l'adaptation.

Les résultats obtenus par ce projet pourraient mener à l'intégration du froid et de la pollution atmosphérique dans le système d'alertes sanitaires du Québec. Ce dernier pourrait également être adapté pour introduire les seuils mensuels de chaleur, et éventuellement, de froid.

Puisque les seuils développés sont basés sur les données historiques, la mise à jour de ces seuils devrait être effectuée tous les 5-10 ans, pour prendre en compte les changements climatiques, le changement démographique et l'adaptation climatique en santé de la population et du réseau de la santé.

Même si les projections climatiques prévoient une diminution du froid moyen et des vagues de grands froids, les impacts sanitaires du froid moyen et extrême intéressent de plus en plus la santé publique.

En effet, avec des hivers de plus en plus humides et tempérés, la population sera de moins en moins adaptée, particulièrement dans un contexte d'augmentation des inégalités sociales et l'augmentation du nombre de personnes en situation d'itinérance.

Avec l'augmentation du transport routier malgré les mesures de réduction des GES, et l'augmentation prévue des épisodes de fumée de feux de forêt, les seuils d'alerte de pollution atmosphérique pour la santé de la population sont particulièrement pertinents, d'autant plus que la littérature démontre un lien entre la chaleur et les impacts de la qualité de l'air.

Le développement méthodologique effectué, particulièrement le CGAIM, pourrait servir à plusieurs contextes d'adaptation, tels que les études épidémiologiques multivariées.

Suites recommandées.

- Considérer appliquer ces approches dans d'autres villes ou régions au Canada.
- Combiner les nouvelles approches développées avec d'autres variables environnementales ou sanitaires, par exemple des seuils évolutifs sur le froid, des seuils d'apprentissage machine sur la pollution atmosphérique.
- Étudier le comportement futur du système d'alerte à la chaleur actuel, ou encore les nouveaux systèmes, en considérant différents scénarios des changements climatiques.

9. Références

- [1] F. Chebana, B. Martel, P. Gosselin, J. X. Giroux, and T. B. M. J. Ouarda, "A general and flexible methodology to define thresholds for heat health watch and warning systems, applied to the province of Québec (Canada)," *Int. J. Biometeorol.*, vol. 57, no. 4, pp. 631–644, 2013.
- [2] B. Yan *et al.*, "A cold-health watch and warning system, applied to the province of Quebec (Canada).," *Sci. Total Environ.*, vol. 741, p. 140188, Nov. 2020.
- [3] P. Masselot, F. Chebana, É. Lavigne, C. Campagna, P. Gosselin, and T. B. M. J. Ouarda, "Toward an Improved Air Pollution Warning System in Quebec," *Int. J. Environ. Res. Public Heal.*, no. 2, p. 16, 2095., 2019.
- [4] M. A. Issa *et al.*, "A heat-health watch and warning system with extended season and evolving thresholds," *BMC Public Health*, vol. 21, no. 1, p. 1479, 2021.
- [5] P. Masselot, F. Chebana, C. Campagna, É. Lavigne, T. B. M. J. Ouarda, and P. Gosselin,

- “Constrained groupwise additive index models,” *Biostatistics*, p. kxac023, Jul. 2022.
- [6] P. Masselot, F. Chebana, C. Campagna, E. Lavigne, T. Ouarda, and P. Gosselin, *Machine learning approaches to identify thresholds in a heat-health warning system context*. 2021.
- [7] A. Gasparrini and B. Armstrong, “Time series analysis on the health effects of temperature: Advancements and limitations,” *Environ. Res.*, vol. 110, no. 6, pp. 633–638, 2010.
- [8] M. McGeehin and M. Mirabelli, “The potential impacts of climate variability and change on temperature-related morbidity and mortality in the United States.,” *Environ. Health Perspect.*, vol. 109 Suppl, no. May, pp. 185–9, 2001.
- [9] A. J. Valleron and A. Boumendil, “Épidémiologie et canicules: Analyses de la vague de chaleur 2003 en France,” *Comptes Rendus - Biol.*, vol. 327, no. 12, pp. 1125–1141, 2004.
- [10] R. Bustinza, G. Lebel, P. Gosselin, D. Bélanger, and F. Chebana, “Health impacts of the July 2010 heat wave in Québec, Canada,” *BMC Public Health*, vol. 13, no. 1, p. 56, 2013.
- [11] Z. Kmietowicz, “Excess winter deaths rose by 29% last year from 2011-12,” *BMJ Br. Med. J.*, vol. 347, Nov. 2013.
- [12] Y. Guo *et al.*, “Quantifying excess deaths related to heatwaves under climate change scenarios: A multicountry time series modelling study,” *PLOS Med.*, vol. 15, no. 7, p. e1002629, Jul. 2018.
- [13] K. L. Ebi, “Greater understanding is need of whether warmer and shorter winters associated with climate change could reduce winter mortality,” *Environ. Res. Lett.*, vol. 10, no. 11, p. 111002, 2015.
- [14] P. L. Kinney *et al.*, “Winter season mortality: Will climate warming bring benefits?,” *Environ. Res. Lett.*, vol. 10, no. 6, 2015.
- [15] M. Lee, F. Nordio, A. Zanobetti, P. Kinney, R. Vautard, and J. Schwartz, “Acclimatization across space and time in the effects of temperature on mortality: a time-series analysis,” *Environ. Heal.*, vol. 13, no. 1, p. 89, 2014.
- [16] A. Gasparrini *et al.*, “Projections of temperature-related excess mortality under climate change scenarios,” *Lancet Planet. Heal.*, vol. 1, no. 9, pp. e360–e367, 2017.
- [17] Y. Chiu, F. Chebana, B. Abdous, D. Be, and P. Gosselin, “Mortality and morbidity peaks modeling : An extreme value theory approach,” 2016.
- [18] S. M. Bernard and M. A. McGeehin, “Municipal Heat Wave Response Plans,” *Am. J. Public Health*, vol. 94, no. 9, pp. 1520–1522, Sep. 2004.
- [19] K. Laadi and M. Pascal, “Système d ’ alerte canicule et santé (Sacs 2005) Rapport

- opérationnel,” vol. 2005, no. Sacs, pp. 1–34, 2005.
- [20] G. Masato *et al.*, “Improving the health forecasting alert system for cold weather and heat-waves in England: A proof-of-concept using temperature-mortality relationships,” *PLoS One*, vol. 10, no. 10, pp. 1–15, 2015.
- [21] D. Ruddell, S. L. Harlan, S. Grossman-Clarke, and A. Buyantuev, *Risk and Exposure to Extreme Heat in Microclimates of Phoenix, AZ*. 2010.
- [22] S. Hajat and T. Kosatky, “Heat-related mortality: a review and exploration of heterogeneity,” *J. Epidemiol. Community Health*, vol. 64, no. 9, p. 753 LP-760, Sep. 2010.
- [23] M. Baccini *et al.*, “Impact of heat on mortality in 15 European cities: attributable deaths under different weather scenarios,” *J. Epidemiol. Community Health*, vol. 65, no. 1, p. 64 LP-70, Jan. 2011.
- [24] K. L. Ebi, T. J. Teisberg, L. S. Kalkstein, L. Robinson, and R. F. Weiher, “Heat watch/warning systems save lives: Estimated costs and benefits for Philadelphia 1995-98,” *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 85, no. 8, pp. 1067–1073, 2004.
- [25] L. S. Kalkstein, S. Greene, D. M. Mills, and J. Samenow, “An evaluation of the progress in reducing heat-related human mortality in major U.S. cities,” *Nat. Hazards*, vol. 56, no. 1, pp. 113–129, 2011.
- [26] L. Éric, F. Isabel, G. Maelenn, J. Alexandre, and K. Tom, *Programme de vigie et de prévention des effets de la chaleur accablante à Montréal*. 2005.
- [27] *Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP Project*. 2013, p. ; World Health Organization: Geneva, Switzerland.
- [28] F. Dominici, R. D. Peng, M. L. Bell, A. Mcdermott, S. L. Zeger, and J. M. Samet, “Fine Particulate Air Pollution and Hospital Admission for Cardiovascular and Respiratory Diseases,” vol. 295, no. 10, pp. 1127–1134, 2006.
- [29] W. J. Requia, M. D. Adams, A. Arain, S. Papatheodorou, P. Koutrakis, and M. Mahmoud, “Global Association of Air Pollution and Cardiorespiratory Diseases: A Systematic Review, Meta-Analysis, and Investigation of Modifier Variables,” *Am. J. Public Health*, vol. 108, no. S2, pp. S123–S130, Oct. 2017.
- [30] S. Achilleos, M.-A. Kioumourtzoglou, C.-D. Wu, J. D. Schwartz, P. Koutrakis, and S. I. Papatheodorou, “Acute effects of fine particulate matter constituents on mortality: A systematic review and meta-regression analysis.,” *Environ. Int.*, vol. 109, pp. 89–100, Dec.

2017.

- [31] A. Vodonos, Y. A. Awad, and J. Schwartz, "The concentration-response between long-term PM_{2.5} exposure and mortality; A meta-regression approach," *Environ. Res.*, vol. 166, pp. 677–689, 2018.
- [32] M. Medina-Ramon and J. Schwartz, "Who is more vulnerable to die from ozone air pollution?," *Epidemiology*, vol. 19, no. 5, pp. 672–679, Sep. 2008.
- [33] I. C. Mills, R. W. Atkinson, S. Kang, H. Walton, and H. R. Anderson, "Quantitative systematic review of the associations between short-term exposure to nitrogen dioxide and mortality and hospital admissions," *BMJ Open*, vol. 5, no. 5, p. e006946, May 2015.
- [34] F. . Kelly, G. . Fuller, H. . Walton, and J. . Fussell, "Monitoring air pollution: Use of early warning systems for public health," *Respirology*, pp. 7–19, 2012.
- [35] C. Li and Z. Zhu, "Research and application of a novel hybrid air quality early-warning system: A case study in China," *Sci. Total Environ.*, vol. 626, pp. 1421–1438, 2018.
- [36] P. Jiang, C. Li, R. Li, and H. Yang, "An innovative hybrid air pollution early-warning system based on pollutants forecasting and Extenics evaluation," *Knowledge-Based Syst.*, vol. 164, pp. 174–192, 2019.
- [37] *Canadian Environmental Sustainability Indicators: Air Quality*. 2018, p. ; Environment and Climate Change Canada: Gatineau.
- [38] D. M. Stieb, R. T. Burnett, M. Smith-Doiron, O. Brion, H. H. Shin, and V. Economou, "A New Multipollutant, No-Threshold Air Quality Health Index Based on Short-Term Associations Observed in Daily Time-Series Analyses," *J. Air Waste Manage. Assoc.*, vol. 58, no. 3, pp. 435–450, Mar. 2008.
- [39] *Ministère du Développement durable, Environnement et Lutte contre les Changements climatiques Indice de la qualité de l'air*. 2018, p. Available online: <http://www.iqa.mddefp.gouv.qc.ca>.
- [40] Y. Xu, W. Yang, and J. Wang, "Air quality early-warning system for cities in China," *Atmos. Environ.*, vol. 148, pp. 239–257, 2017.
- [41] *WHO Air Quality Guidelines for Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide: Global Update*. 2006, p. ; World Health Organization: Geneva, Switzerland,.
- [42] R. W. Atkinson, S. Kang, H. R. Anderson, I. C. Mills, and H. A. Walton, "Epidemiological time series studies of PM_{2.5} and daily mortality and hospital admissions: a systematic review and

- meta-analysis,” *Thorax*, vol. 69, no. 7, pp. 660–665, Jul. 2014.
- [43] L. A. Rodriguez-Villamizar, A. Magico, A. Osornio-Vargas, and B. H. Rowe, “The effects of outdoor air pollution on the respiratory health of Canadian children: A systematic review of epidemiological studies,” *Can. Respir. J.*, vol. 22, no. 5, pp. 282–292, 2015.
- [44] C. Wang, Y. Tu, Z. Yu, and R. Lu, “PM2.5 and Cardiovascular Diseases in the Elderly: An Overview,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 12, no. 7, pp. 8187–8197, Jul. 2015.
- [45] A. Analitis *et al.*, “Synergistic Effects of Ambient Temperature and Air Pollution on Health in Europe: Results from the PHASE Project,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 15, no. 9, Aug. 2018.
- [46] E. K. Cairncross, J. John, and M. Zunckel, “A novel air pollution index based on the relative risk of daily mortality associated with short-term exposure to common air pollutants,” *Atmos. Environ.*, vol. 41, no. 38, pp. 8442–8454, 2007.
- [47] M. S. Islam, T. J. Chausalet, and N. Koizumi, “Towards a threshold climate for emergency lower respiratory hospital admissions,” *Environ. Res.*, vol. 153, pp. 41–47, 2017.
- [48] A. Gasparrini, F. Scheipl, B. Armstrong, and M. G. Kenward, “A Penalized Framework for Distributed Lag Non-Linear Models,” no. September, pp. 938–948, 2017.
- [49] B. Armstrong *et al.*, “The Role of Humidity in Associations of High Temperature with Mortality: A Multicountry, Multicity Study,” *Environ. Health Perspect.*, vol. 127, no. 9, p. 97007, Sep. 2019.
- [50] A. Zeileis, T. Hothorn, and K. Hornik, “Model-Based Recursive Partitioning,” *J. Comput. Graph. Stat.*, vol. 17, no. 2, pp. 492–514, Jun. 2008.
- [51] B. Armstrong, A. Gasparrini, A. Tobias, and F. Sera, “Sample size issues in time series regressions of counts on environmental exposures,” *BMC Med. Res. Methodol.*, vol. 20, no. 1, p. 15, 2020.
- [52] C. A. Nickerson and N. J. L. Brown, “Simpson’s Paradox is suppression, but Lord’s Paradox is neither: clarification of and correction to Tu, Gunnell, and Gilthorpe (2008),” *Emerg. Themes Epidemiol.*, vol. 16, no. 1, p. 5, 2019.
- [53] S. G. Bratsch, “Standard Electrode Potentials and Temperature Coefficients in Water at 298.15 K.” p. J. Phys. Chem. Ref. Data 1989, 18, 1–21. [J, 1989.
- [54] *Réseau de surveillance de la qualité de l’air. Environmental Assessment Report 2017: Air Quality in Montreal*. 2017, p. ; Service de l’Environnement: Montreal, QC, Canada.

- [55] *Lignes directrices sur la définition et la surveillance des phénomènes météorologiques extrêmes.* 2018, p. ;World Meteorological Organization (WMO).
- [56] K. L. Ebi and D. Mills, "Winter mortality in a warming climate: A reassessment," *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Chang.*, vol. 4, no. 3, pp. 203–212, 2013.