



Des stratégies personnelles destinées à atténuer les effets de la pollution atmosphérique sur la santé pendant la pratique d'un sport ou d'une activité physique : revue narrative et énoncé de position de l'Académie canadienne de médecine du sport et de l'exercice et de la Société canadienne de physiologie de l'exercice

Andy Hung¹, Sarah Koch^{2,3,4}, Valérie Bougault⁵, Cameron M. Gee^{6,7}, Rômulo Bertuzzi⁸, Malindi Elmore⁷, Paddy McCluskey^{7,9}, Laura Hidalgo López^{2,3,4}, Judith Garcia-Aymerich^{2,3,4}, Michael S. Koehle^{1,9,10}

1. École de kinésiologie – *School of Kinesiology*, Faculté d'éducation, Université de la Colombie-Britannique | UBC, Vancouver, Colombie-Britannique, Canada.
2. ISGlobal | Institut pour la santé mondiale de Barcelone, Barcelone, Catalogne, Espagne.
3. UPF | Université Pompeu-Fabra, Barcelone, Catalogne, Espagne.
4. CIBERESP | Centre réseau de recherches biomédicales en épidémiologie et en santé publique, Madrid, Communauté de Madrid, Espagne.
5. LAMHESS | Laboratoire Motricité Humaine, Expertise, Sport, Santé, Université Côte d'Azur, Nice, Provence-Alpes-Côte d'Azur, France.
6. ICORD | Centre de collaborations internationales en recherches sur les traumatismes médullaires, Faculté de médecine, Université de la Colombie-Britannique | UBC, Vancouver, Colombie-Britannique, Canada.
7. Athlétisme Canada, Ottawa, Ontario, Canada.
8. GIRA | Groupe de recherche sur les performances en endurance, École d'éducation physique et de sport, Université de São Paulo | USP, São Paulo, São Paulo, Brésil.
9. Institut canadien du sport – Pacifique, Victoria, Colombie-Britannique, Canada.
10. Division Médecine du sport et de l'exercice, Faculté de médecine, Université de la Colombie-Britannique | UBC, Vancouver, Colombie-Britannique, Canada.

Correspondance : D' Michael S. Koehle, Université de la Colombie-Britannique | UBC, Chan Gunn Pavilion, 2553 Wesbrook Mall, Vancouver, Colombie-Britannique, Canada V6T 1Z3. michael.koehle@ubc.ca.

RÉSUMÉ

La pollution atmosphérique fait partie des principales menaces environnementales pour la santé à l'échelle mondiale aujourd'hui, particulièrement dans le contexte du sport et de l'exercice. À cet égard, les effets de la pollution atmosphérique, des épisodes de pollution (p. ex. les incendies généralisés) et des changements climatiques deviennent de plus en plus manifestes pour la population générale, tout comme leur impact sur le sport et l'exercice. C'est pourquoi la communauté sportive (c.-à-d. les athlètes, les entraîneurs et les membres des équipes de science et de médecine du sport) s'intéresse de plus en plus aux actions personnelles pratiques visant à réduire l'exposition à la pollution atmosphérique et les risques qui y sont liés. Des données limitées suggèrent que les stratégies suivantes pourraient être employées : minimiser toutes les expositions en réduisant le temps et en augmentant la distance; surveiller les conditions de pollution atmosphérique dans les lieux d'intérêt; limiter les exercices en plein air; utiliser des protocoles d'acclimatation; porter des masques N95; et recourir à une supplémentation en antioxydants. L'objectif global de cet énoncé de position de l'Académie canadienne de médecine du sport et de l'exercice et de la Société canadienne de physiologie de l'exercice est de détailler l'état



actuel des données probantes et de formuler des recommandations sur la mise en œuvre de ces stratégies personnelles pour prévenir et atténuer les effets néfastes sur la santé et la performance de l'exposition à la pollution atmosphérique pendant l'exercice, tout en reconnaissant que les données sont limitées.

INTRODUCTION

Les bienfaits de l'exercice et du sport pour la santé et les réponses physiologiques du corps à ces activités sont bien connus.¹ Les changements climatiques, lesquels entraînent pour l'humain des expositions accrues aux menaces environnementales, dont la fréquence d'occurrence, la durée et la gravité des phénomènes s'accroissent, ont le potentiel de modifier les réactions physiologiques typiques du corps et les bénéfices connus de l'exercice pour la santé.² Par exemple, les hausses de la fréquence respiratoire, de la température corporelle et du flux sanguin induites par l'exercice et une augmentation de l'activité métabolique peuvent amplifier les effets nocifs des polluants inhalés lorsque ces fonctions physiologiques sont exposées à de l'air de mauvaise qualité. L'augmentation des doses de particules absorbées par inhalation, le dépôt de polluants dans les voies respiratoires¹² et la circulation accélérée des particules et des gaz absorbés dans le système circulatoire peuvent affecter presque tous les organes, avoir un impact sur les performances lors de l'entraînement et, dans le pire des cas, nuire à la santé des athlètes.³⁻⁶

Des recherches conjointes menées aux États-Unis (Medicare), au Canada (MAPLE – *Mortality Air Pollution Associations in Low-Exposure Environments*) et en Europe (ELAPSE – *Effects of Low-Level Air Pollution: A Study in Europe*) montrent que l'exposition à la pollution atmosphérique, peu importe le niveau, même à de faibles concentrations de polluants, affecte la santé. Par conséquent, en septembre 2021, l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) a établi⁷⁻⁹ de nouveaux seuils pour les principaux polluants ambiants, dont les valeurs ont subi un abaissement significatif.¹⁰ Cependant, pour parvenir à décrire exhaustivement les risques pour la santé, la façon dont les avantages que procure la pratique d'exercices physiques changent dans un environnement où l'air est pollué et les effets sur la performance athlétique, d'autres recherches sont nécessaires.⁴⁻⁶ Alors qu'il est de plus en plus fréquent, de nos jours, de voir des entraînements et des compétitions se dérouler sur des sites où il y a un risque accru d'exposition à des polluants atmosphériques¹¹, il faut travailler à élaborer des stratégies visant à protéger la santé des athlètes et à optimiser les performances athlétiques. Le présent énoncé de position a pour but de fournir des recommandations fondées sur des données probantes relatives à des stratégies personnelles dont l'objectif vise à prévenir ou à atténuer les effets néfastes de l'exposition de l'humain à la pollution atmosphérique sur la santé et la performance pendant l'exercice.

LES PRINCIPAUX POLLUANTS ATMOSPHÉRIQUES, LEURS ORIGINES ET LES EFFETS SUR LA SANTÉ

La composition de la pollution atmosphérique comprend un mélange complexe de gaz et de particules.^{10,12} En raison des mélanges de polluants, la nature des effets sur la santé des athlètes s'avère hétérogène et subit l'influence de la toxicité de chacune des composantes constitutives, lesquelles varient dans l'espace et le temps. La liste ci-après comprend une description des caractéristiques biologiques, chimiques et physiques des matières particulaires (MP), de l'ozone (O₃), des oxydes d'azote (NO_x), des oxydes de soufre (SO_x), du monoxyde de carbone (CO) et des composés organiques volatils (COV), lesquels demeurent les polluants jugés les plus pertinents pour la santé publique, ainsi que les origines qu'on leur associe le plus communément. Chaque partie traite d'un polluant et comprend un résumé des effets reconnus sur les systèmes physiologiques qui s'avèrent pertinents dans le contexte de la performance athlétique. Cependant, bien que cet article traite de chacun des polluants, il existe possiblement des effets de synergie entre certains composants pour lesquels il existe peu de données.

Le tableau 1 liste, à titre de référence, les abréviations courantes des polluants atmosphériques, alors que la figure 1 présente les lignes directrices de l’OMS en matière de qualité de l’air.

Tableau 1 Abréviations utilisées pour désigner les polluants atmosphériques	
Abréviation	Signification
CO	Monoxyde de carbone
DE	Échappement des moteurs diesel
NO ₂	Dioxyde d’azote
NO _x	Oxydes d’azote
O ₃	Ozone
PM ou MP	Matière particulaire
PM ₁₀	Particules thoraciques (PM ayant un diamètre aérodynamique nominal moyen ≤ à 10 µm)
PM _{2,5}	Particules fines (PM ayant un diamètre aérodynamique nominal moyen ≤ à 2,5 µm)
SO ₂	Dioxyde de soufre
SO _x	Oxydes de soufre
TRAP PATR	Pollution atmosphérique liée au trafic routier
UFP PUF (ou PM _{0,1})	Particules ultra-fines (PM ayant un diamètre aérodynamique nominal moyen ≤ à 0,1 µm)
COV	Composés organiques volatils

Les matières particulaires (PM)

Les matières particulaires correspondent à un mélange complexe de particules solides et de gouttelettes de liquide comprenant divers éléments, dont des acides, des produits chimiques organiques, des métaux, du pollen et des petites particules de sol, de poussière ou de carbone.¹³ Les particules peuvent provenir directement d’une source comme des chantiers de construction, des routes non pavées, des champs, des cheminées industrielles ou des incendies. Cependant, la majorité des MP se forment dans l’atmosphère et sont produites par des réactions complexes de produits chimiques comme le dioxyde de soufre (SO₂) ou des oxydes d’azotes NO_x; des polluants qu’émettent les centrales électriques, les zones industrielles et le transport motorisé. La composition, la taille, la forme et la concentration des particules déterminent leur potentiel de menaces pour la santé.¹³ Plus la particule est petite, plus grande est la probabilité qu’elle pénètre profondément dans les voies respiratoires, qu’elle s’y dépose et qu’elle porte atteinte à la santé. Le classement des matières particulaires se base sur leur diamètre, lesquelles se rangent dans une des trois catégories généralement utilisées : les MP ≤ 10 µm (PM₁₀), les MP ≤ 2,5 µm (PM_{2,5}) et les MP ≤ 0,1 µm (PM_{0,1}), ces dernières étant souvent appelées *particules ultra-fines*. Il existe une corrélation entre l’exposition aux MP et l’apparition d’effets négatifs sur la santé respiratoire et cardiovasculaire, y compris la présence de symptômes respiratoires (p. ex. une respiration sifflante), du stress oxydatif ou d’un problème inflammatoire ou des changements affectant la fonction pulmonaire, la fréquence cardiaque, la pression artérielle (PA) et la cognition.¹³

L’ozone (O)

L’O₃ est une forme très réactive d’oxygène (O₂).¹⁴ L’O₃ se trouvant au niveau du sol est créé par des réactions chimiques qui se produisent entre les NO_x et les COV en présence de la lumière du soleil. Les principales sources de NO_x et de COV proviennent des installations industrielles et des services d’électricité, des gaz d’échappement des véhicules motorisés, des vapeurs d’essence et des solvants chimiques.¹⁴ En raison de son association avec les rayons UV, les niveaux d’O₃ augmentent souvent par temps chaud et ensoleillé. Conséquemment, un O₃ élevé et des températures ambiantes élevées vont

souvent de pair. Au cours des dernières années, l'exposition à l' O_3 a augmenté¹⁵ à l'échelle mondiale, reflétant une augmentation des émissions des précurseurs de l' O_3 , tels que les NO_x , lesquels sont associés à des températures plus chaudes en raison des changements climatiques. L' O_3 est un agent pathogène responsable de troubles respiratoires qui ne relèvent pas d'une exposition à des PM.¹⁴ Les symptômes liés à une exposition à l' O_3 comprennent une toux, un mal de gorge ou une irritation de la gorge, une douleur au moment de prendre une profonde inspiration et une difficulté à respirer.¹⁴ Chez les personnes atteintes d'une maladie respiratoire préexistante qui montrent une sensibilité à l'ozone les symptômes peuvent se trouver considérablement aggravés. Ainsi, l'exposition à l' O_3 peut entraîner une augmentation de la fréquence des crises d'asthme et diminuer l'effet des médicaments réguliers de contrôle de ce trouble respiratoire.¹⁴

Les oxydes d'azote (NO_x)

Les NO_x sont des produits chimiques hautement réactifs. Ceux-ci contribuent au smog, ce brouillard de teinte brune que l'on observe régulièrement au-dessus des villes, qui se forme lorsque les NO_x et les COV réagissent à la lumière du soleil et aux pluies acides. Le smog résulte en fait de la combinaison des NO_x , du SO_2 , de l'eau et de l' O_2 .^{16,17} Le processus de formation des NO_x repose principalement sur le rejet d'azote contenu dans les carburants pendant leur combustion ou généré par des événements naturels comme des incendies de forêt ou des éruptions volcaniques.¹⁶ Lorsqu'ils se combinent à d'autres composés dans l'atmosphère, tels que l'ammoniac, le NO_3^- (nitrate) devient un contributeur important à la formation secondaire des $PM_{2.5}$ et de l' O_3 .^{13,14} Une exposition à des concentrations élevées de NO_2 est associée à des symptômes respiratoires qui se trouvent aggravés, dont la toux, une respiration sifflante et des difficultés à respirer.¹⁶ Une exposition prolongée à des concentrations élevées de NO_2 peut contribuer à la pathogenèse de l'asthme et peut rendre une personne plus susceptible aux infections respiratoires.¹⁶

Les oxydes de soufre (SO_x)

Le SO_2 est un gaz de la famille des SO_x .¹⁸ Plus de 90 % des émissions de SO_x sont rejetées dans l'atmosphère sous la forme de SO_2 , un gaz incolore qui dégage une odeur à la fois âcre et sulfureuse distincte. Le SO_2 provient du soufre contenu dans des matières premières telles que le charbon, le pétrole et les minerais, lesquelles contiennent des métaux qui se dégagent pendant les processus de combustion et les procédés de raffinage.¹⁹ Comme mentionné précédemment, lorsque le SO_2 est dissout dans la vapeur d'eau qui se trouve dans l'air, ce mélange forme des acides (acide sulfurique et sulfate) et interagit avec d'autres gaz et particules pour produire des sulfates, lesquels peuvent s'avérer particulièrement nocifs pour les voies respiratoires. Le SO_2 a un effet irritant pour les yeux, les muqueuses, la peau et les voies respiratoires.¹⁹ Les personnes qui souffrent d'asthme semblent particulièrement affectées par les SO_x . Ceux-ci entraînent une diminution significative du volume expiratoire forcé en une seconde (VEMS) et de la capacité vitale forcée (CVF), un état qui peut encore s'aggraver par la pratique d'un exercice.²⁰

Le monoxyde de carbone

Le CO est un produit issu de la combustion incomplète de carburants à base d'hydrocarbures. Il s'agit d'un gaz incolore, inodore et sans goût, mais toxique.²¹ Les véhicules, l'industrie du bois, le chauffage résidentiel au bois et les feux de forêt représentent les sources d'émissions de CO les plus courantes. Suivant l'inhalation de CO, les particules se diffusent rapidement à travers la membrane alvéolaire et se combinent de manière réversible à l'hémoglobine avec une affinité 200 fois plus grande que l' O_2 pour former des molécules de carboxyhémoglobine.¹⁶ La carboxyhémoglobine inhibe la fonction du sang à transporter l' O_2 aux organes et aux tissus, causant une hypoxie tissulaire et une altération des

performances pendant l'exercice.²² Les organes principalement ciblés par un empoisonnement au CO sont le système nerveux central et le cœur. Une fois que le CO pénètre le système sanguin, le débit cardiaque maximal et la différence artérioveineuse maximale diminuent, réduisant la capacité d'absorption maximale d'oxygène ($\dot{V}O_2\text{max}$) et le rendement physique.²³ La relation entre l'exposition au CO et les conséquences sur la santé respiratoire demeure inconnue. Toutefois, parmi les symptômes courants de l'empoisonnement au CO, il y a notamment la confusion, des nausées, les maux de tête, des étourdissements, la fatigue et la somnolence. L'empoisonnement au CO peut affecter la capacité d'une personne à effectuer des tâches complexes et réduire sa capacité à l'exercice, sa perception visuelle et sa dextérité manuelle.^{16,24}

Les composés organiques volatils

Les COV désignent tous les composés présentant une pression de vapeur élevée et une faible solubilité dans l'eau. Il s'agit souvent des composants présents dans les carburants à base de pétrole, de fluides hydrauliques, de diluants à peinture et de produits de nettoyage à sec.²⁵ Les gaz d'échappement des moteurs diesels émettent également des COV. Lorsque les éléments des COV se combinent à ceux des NO_x , ils réagissent pour former de l' O_3 au niveau du sol. À l'extérieur, sous certaines conditions, les COV créent du smog. Les effets des COV sur la santé dépendent respectivement de la nature des COV, des niveaux de concentration des particules et de la durée d'exposition. Le benzène et le formaldéhyde, deux COV ayant fait l'objet de recherches poussées, sont classés comme des agents cancérigènes pour l'humain.²⁶ Une exposition prolongée aux COV peut causer des dommages au foie, aux reins et au système nerveux central alors qu'une exposition de courte durée peut causer une irritation des yeux et des voies respiratoires, des maux de tête, des étourdissements, des troubles visuels, de la fatigue, une perte de coordination, des réactions allergiques cutanées et des nausées.²⁶

À LA CROISÉE DE L'EXERCICE ET DE L'EXPOSITION À LA POLLUTION

Les voies qui mènent à l'exposition

Les voies conventionnelles qui mènent les humains à s'exposer à des polluants atmosphériques comprennent l'inhalation, l'ingestion, l'absorption cutanée; ainsi que d'autres qui le sont moins, comme l'absorption par les yeux.²⁷ L'inhalation correspond à la principale voie d'exposition pour la plupart des vapeurs, des gaz et des particules. Une fois inhalés, les composés chimiques de ces produits quittent le corps par expiration ou se déposent dans les voies respiratoires. S'ils se logent dans les voies respiratoires, il peut en résulter des dommages tissulaires en cas de contact direct ou encore d'autres troubles à un niveau systémique par la diffusion des composés par l'interface poumon-sang dans la circulation sanguine. Une fois en contact avec le tissu des voies respiratoires supérieures ou des poumons, les produits chimiques peuvent provoquer des effets indésirables allant de la simple irritation aux lésions tissulaires graves. Les substances qui se mêlent au sang, lequel circule dans le corps et irrigue les organes, ont, dès lors, le potentiel de causer d'autres troubles. Dans le contexte de la pratique de l'exercice physique, l'exposition à la pollution atmosphérique par inhalation revêt un intérêt particulier. Des augmentations du débit de ventilation par minute (VE), des trajets du flux d'air dans les voies respiratoires et des transitions entre la respiration par le nez et par la bouche contribuent à accroître la dose de polluants atmosphériques qui peut atteindre les voies respiratoires et s'y déposer.^{28,29} En effet, Daigle *et collab.*³⁰ ont rapporté un dépôt de particules ultra-fines 4,5 fois plus élevé dans les voies respiratoires à la suite de quatre séances d'exercice de 15 minutes ($\text{VE} = 38,1 \pm 9,5$ L/min) avec des périodes de repos de 15 minutes entre les séances comparativement aux données au repos seulement ($\text{VE} = 9,0 \pm 1,3$ L/min). De plus, les athlètes en situation de handicap peuvent avoir des conditions individuelles sur lesquelles une exposition à la pollution de l'air peut agir. Par exemple, pour les athlètes atteints d'une lésion sévère à la moelle épinière,³¹ la faiblesse musculaire expiratoire et les volumes



résiduels plus importants peuvent les exposer à un plus grand risque d'accumulation de particules en raison d'un plus grand espace mort dans le circuit respiratoire (c.-à-d. une diminution du débit et de l'échange d'air).³¹

Les effets sur la santé globale

Les effets à long terme semblent varier selon le polluant. L'O₃ présente le bilan le plus probant quant aux interactions avec l'exercice physique.⁴ Par exemple, à long terme, la pratique d'activités physiques dans des milieux qui présentent des niveaux élevés d'O₃ entraîne un risque accru pour les enfants de souffrir d'asthme.³² Cependant, une vaste étude menée au Danemark qui prenait en compte des expositions relativement faibles au NO₂ n'a rapporté chez les adultes aucun effet lié à l'interaction entre l'exposition à la pollution atmosphérique et les niveaux d'activité physique sur la mortalité, l'incidence de cas d'asthme, les maladies pulmonaires obstructives chroniques et les cas d'infarctus du myocarde.³³⁻³⁵ Deux autres études ont montré un effet protecteur de l'activité physique chez les adultes contre les conséquences néfastes de la pollution atmosphérique sur la santé pour ce qui est de la mortalité prématurée et de l'altération de la fonction pulmonaire.^{36,37} En résumé, un examen récent du mappage des données a confirmé les résultats antérieurs selon lesquels les bienfaits de l'activité physique pour la santé chez les personnes en bonne santé l'emportent généralement sur les risques liés à la pollution atmosphérique.⁵ Cependant, il n'y a pas de données suffisantes relatives aux athlètes pour qui le nombre de séances d'entraînement est très élevé, ce qui en fait un groupe de la population qu'il faut étudier davantage. Dans le présent énoncé de position, nous proposons des stratégies fondées sur des données probantes pour atténuer les effets néfastes de la pollution atmosphérique sur la santé et le rendement pendant l'entraînement et la compétition.

LES MÉTHODOLOGIES

D'abord réunis en comité, les membres du comité directeur (M.S.K, A.H., S.K.) ont déterminé les objectifs de l'énoncé de position. Ce comité a ensuite identifié des personnes d'intérêt ayant une expérience clinique ou universitaire dans le domaine de l'exercice physique et de la pollution atmosphérique et les a invitées à former un groupe élargi d'experts. Les membres de ce panel, lequel comprenait un athlète d'élite et des experts en médecine sportive, en médecine familiale, en pneumologie, en épidémiologie, en physiologie de l'exercice et en parasport, ont été soigneusement sélectionnés pour assurer une diversité et un équilibre des perspectives. Les bases de données bibliographiques et documentaires MEDLINE, Embase, CENTRAL, SPORTDiscus et AESD en agriculture et environnement ont été passées au peigne fin afin de trouver des publications évaluées par des pairs portant sur la pollution atmosphérique, l'exercice et les stratégies de prévention ou d'atténuation des effets de la pollution atmosphérique. Le comité de recherche a exclu les publications portant sur les personnes atteintes de maladies respiratoires ou cardiovasculaires, à l'exception d'asthme et de bronchoconstriction induite par l'exercice (B.I.E.) compte tenu de la prévalence de ces maladies dans les populations sportives.³⁸ Aucune restriction quant aux dates n'a été appliquée et une recherche finale a été réalisée le 1^{er} mars 2022. Les références bibliographiques des études incluses ont également été passées en revue une à une pour trouver des articles qui auraient été omis par mégarde. Un exemple de la stratégie de recherche se trouve à l'annexe 1 publiée en ligne en supplément. En raison du contexte limité des ressources identifiées au cours de la recherche préliminaire, et du besoin d'intégrer les observations empiriques émises par les experts, le comité a opté pour une revue narrative plutôt qu'un examen systématique. Compte tenu du peu de données publiées, le comité de direction a écarté l'application de la méthode GRADE³⁹ (*Grading of Recommendations, Assessment, Development and Evaluations*) et d'autres méthodes de consensus. Le comité directeur a procédé à l'évaluation de la documentation, puis a rédigé la première ébauche. Le panel d'experts a ensuite examiné le premier jet

du rapport. Tous les auteurs et membres du conseil d'administration de l'Académie canadienne de médecine du sport et de l'exercice et de la Société canadienne de physiologie de l'exercice ont approuvé la version définitive de l'énoncé de position.³⁹ Le rapport comprend un résumé des résultats et des recommandations (figure 2 et figure 3).

INTENSITÉ DE L'EXERCICE PHYSIQUE

La dose inhalée de pollution atmosphérique (c.-à-d. concentration×ventilation× durée) augmente généralement avec l'intensité de l'activité physique en raison d'une augmentation proportionnelle de la $\dot{V}E$.⁴⁰ Par conséquent, compte tenu de la relation connue « dose-réponse » entre la pollution atmosphérique et les résultats pour la santé, une augmentation de l'intensité de l'activité physique pourrait théoriquement augmenter les effets de la pollution atmosphérique sur la santé et la performance à l'effort. En effet, les organismes de santé publique recommandent généralement de restreindre ou d'éviter complètement les activités intenses pendant les périodes où la qualité de l'air est mauvaise.⁴¹ Pourtant, les données limitées suggèrent le contraire.

À notre connaissance, une seule recherche s'est penchée sur les effets différentiels à l'activité physique de faible et de haute intensité pratiquée dans des milieux où il y a des niveaux élevés de particules. Dans un essai transversal à double insu, 18 hommes qui demeurent actifs à des fins récréatives ont participé à deux séances d'exercices de 30 minutes alors qu'ils s'exposaient à des concentrations élevées d'échappement de diesel (DE) ($300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2.5}$) : une fois lors d'une activité physique de faible intensité (pic de $\dot{V}O_2$ à 30 %) et une fois lors d'une activité physique à intensité élevée (pic de $\dot{V}O_2$ à 60 %).⁴²⁻⁴⁴ Fait intéressant à noter, dans un cas comme dans l'autre, pour ce qui est du cyclisme pratiqué à faible et à haute intensité dans un milieu présentant des niveaux élevés d'échappement de diesel, aucune différence n'a été constatée peu importe qu'il s'agisse de la fonction respiratoire, d'inflammation, de la fonction autonome, de la nopinéphrine, de la circulation des NO_x ou de l'inflammation systémique.⁴²⁻⁴⁴ Plus surprenant encore, les auteurs ont constaté que même si la ventilation minute ($\dot{V}E$), la consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$), la production de dioxyde de carbone et le coût de l'exercice en O_2 augmentaient significativement lors de la pratique d'un exercice de faible intensité dans des conditions d'exposition à des émissions d'échappement de moteurs diesel, comparativement à des conditions où l'air est filtré, aucun effet lié à l'exposition durant les périodes de pratique de cyclisme de haute intensité n'a été relevé.⁴⁵ De même, une étude pertinente sur le sujet portait sur la comparaison de deux modalités d'exercice, lesquelles veillaient à administrer par inhalation des doses similaires d' O_3 chez 10 coureurs compétitifs de sexe masculin. Les activités d'analyse comprenaient une période d'exercice continu de 1 heure d'intensité modérée où la $\dot{V}E = 80$ L/min et une période de 1 heure comprenant une séance d'échauffement de 30 minutes suivie d'une séance d'exercice de 30 minutes, dont l'intensité était de niveau de compétition ($\dot{V}E = 112$ L/min).⁴⁶ La décroissance de la fonction pulmonaire était comparable entre les deux périodes, indiquant que le niveau d'intensité plus élevée n'amplifiait pas l'effet de l' O_3 . Pris ensemble, les résultats de ces études contrôlées ne reposent pas sur la prémisse selon laquelle l'augmentation de l'intensité de l'exercice potentialise les effets néfastes de la pollution atmosphérique. Bien que d'autres travaux de recherche soient nécessaires, l'objectif à l'heure actuelle n'est pas d'éviter spécifiquement les efforts de haute intensité en tant que tels, mais plutôt de réduire la dose totale inhalée au cours de la période d'activité physique.

En résumé

- Chercher à minimiser la dose totale d'air pollué inhalée (c.-à-d. le produit des concentrations de pollution atmosphérique, le taux de ventilation et la durée de l'exercice) pendant une période d'exercice.

RÉDUIRE L'EXPOSITION EN DURÉE ET EN DISTANCE

Une stratégie fondamentale à privilégier consiste à se distancier de l'air pollué et à limiter la durée d'exposition. L'exposition à la pollution varie considérablement dans le temps sur toutes périodes confondues, d'une heure à l'autre, d'un mois à l'autre. Les variations au cours d'une même journée peuvent être significatives et dépendent de multiples facteurs régionaux tels que les conditions météorologiques (p. ex. le vent, la température atmosphérique, les précipitations), les mouvements de circulation, la topographie du terrain et l'environnement bâti.⁴⁷ Étant donné que l'O₃ au niveau du sol est généré en réaction à la lumière ultraviolette, les niveaux d'O₃ culminent généralement dans l'après-midi, alors que les niveaux de particules semblent culminer le soir; les concentrations retombant au niveau de base tôt le matin.^{13,48} Ainsi, en l'absence de facteurs hors du commun, la période tôt le matin est généralement un moment de la journée où il y a peu de pollution atmosphérique. Il y a aussi, le long de ce fil du temps, les variations saisonnières qui affectent le niveau de pollution. Par exemple, certaines régions du monde présentent de fortes variations de pollution selon les saisons, comme la saison des feux de forêt dans les régions à l'ouest du Canada, des États-Unis et du Mexique et la saison de la brume en Asie du Sud-Est. Bien que ces événements saisonniers de pollution puissent durer des jours ou des semaines, les changements de direction du vent, des conditions météo et des zones géographiques peuvent entraîner des variations du niveau d'exposition à l'échelle locale; des éléments qui peuvent servir à choisir un lieu d'entraînement afin de minimiser l'exposition aux polluants.

Le lieu constitue un élément clé lorsque la pollution atmosphérique est un facteur à considérer. En général, la qualité de l'air des sites en milieu urbain s'avère de moins bonne qualité que celle des sites en milieu rural, bien que des événements environnementaux importants (p. ex. des feux de forêt) puissent modifier ce constat. Dans les zones urbaines, l'exposition à la pollution varie grandement. Les changements, même mineurs, liés à l'emplacement qu'une personne peut lui permettre de réduire significativement ses possibilités d'exposition à la pollution atmosphérique. Par exemple, il est indéniable que les niveaux d'exposition à des polluants diminuent de manière significative lorsque l'on s'éloigne des principales artères de circulation, même à une petite distance. En fait, de nombreux polluants (par exemple, le CO, les PM, les NO_x) atteignent des niveaux de pollution naturelle, c'est-à-dire des niveaux de pollution atmosphérique qui se produiraient en l'absence d'émissions anthropiques de particules,⁴⁹ à une distance de 400 mètres d'une route principale. Bien entendu, les relations concentration-distance varient selon les polluants atmosphériques, étant donné que certains polluants (p. ex. O₃) présentent moins de variabilité spatiale dans les milieux urbains.¹⁴ Néanmoins, il convient d'encourager les individus à se distancier physiquement autant que possible des sources importantes de pollution atmosphérique. Par exemple, les personnes qui se déplacent à vélo ou à pied devraient emprunter des rues plus étroites et des corridors verts lorsqu'ils peuvent le faire en toute sécurité; et pour les séances d'entraînement en plein air, pourquoi ne pas choisir de les tenir en plein milieu d'un espace vert. Il faut toutefois tenir compte du fait que, pour certains sportifs ayant des capacités différentes (p. ex., les athlètes en fauteuil roulant), le changement de lieu d'une séance, à court préavis, et l'accès aux espaces verts peuvent poser des défis supplémentaires.

En résumé

- Bien que les niveaux de pollution atmosphérique soient très variables, ils sont généralement à leur plus faible niveau tôt le matin. Les athlètes peuvent également envisager de participer à des épreuves lorsque les événements de pollution saisonnière à l'échelle locale (p. ex. feux de forêt, brume) risquent moins de se produire.
- Les athlètes sont encouragés à se distancier physiquement des sources de pollution atmosphérique, telles que les routes principales et les autoroutes, et à se diriger vers les espaces verts.



LA SURVEILLANCE DES NIVEAUX DE POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE

Pour optimiser l'utilisation du lieu et du temps accordé pour les périodes d'exercice, il faut bien comprendre les niveaux de pollution enregistrés en temps réel et les prévisions à court et à long terme. Il est possible de consulter des services qui fournissent les taux et les indices de pollution atmosphérique en temps réel et ceux prévus pour les lieux qui nous intéressent. Les sites Web et les applications des gouvernements locaux fournissent des données fiables. Par exemple, au Canada, le site gouvernemental suivant fournit des données en temps réel de bonne qualité avec un niveau de détail suffisant pour ce qui est de l'emplacement : https://meteo.gc.ca/airquality/pages/index_f.html. Ces sites Web et applications se révèlent également utiles au moment de planifier les lieux où tenir les séances d'exercice en plein air. Dans les grands centres urbains, la surveillance de la pollution atmosphérique se fait généralement en plusieurs endroits, de sorte que les utilisateurs peuvent comparer différents lieux au sein d'une agglomération urbaine pour déterminer quel site offre le niveau de pollution le plus faible. Une fois que le choix de la région générale pour tenir l'activité est fait, la personne peut choisir l'emplacement précis pour s'exercer en fonction de facteurs locaux spécifiques (p. ex., vers le centre des espaces verts et loin des sources locales de pollution).

Pour sensibiliser la population sur les niveaux de pollution atmosphérique les plus récents dans une région, de nombreuses autorités de santé publique attirent l'attention sur les indices de la qualité de l'air, les mesures agrégées quantifiant les concentrations de pollution atmosphérique présentes à un moment particulier et les risques pour la santé qui y sont associés.⁵⁰ Cependant, en l'absence d'un consensus à l'échelle internationale, les pays peuvent utiliser différents indices et différentes normes nationales de qualité de l'air, selon les polluants qui ont un intérêt pour eux. Par conséquent, il faut faire preuve de prudence lorsqu'il s'agit de comparer directement différents indices de la qualité de l'air. Au Canada, la Cote air santé (CAS) a été conçue pour tenir compte des effets additifs des NO₂, de l'O₃ et des PM_{2.5}. Pour les personnes âgées qui font de l'exercice à l'extérieur en milieu rural et urbain, il a été démontré que la CAS se révèle un outil prédictif des effets nocifs aigus sous-cliniques sur la santé cardiorespiratoire (p. ex. diminution de la variabilité cardiaque, augmentation du stress oxydatif, diminution du volume expiratoire maximal par seconde [VEMS]).⁵¹⁻⁵³

Il faut reconnaître que la plupart des sites Web et des indices s'appuient généralement sur les réseaux de postes de surveillance permanents ou sur des techniques de télédétection, lesquels sont conçus pour évaluer l'exposition de la population à des fins de réglementation.⁵⁴ Bien que les postes de surveillance soient capables de fournir des données précises et à long terme sur la qualité de l'air, leurs coûts de construction s'avèrent élevés. Par conséquent, leur nombre est insuffisant et ils sont rarement situés à proximité de lieux d'intérêt pour la pratique d'activités physiques et sportives. En d'autres mots, les données disponibles peuvent être non spécifiques au contexte de l'environnement où s'entraîne un athlète sur une base individuelle et les postes de surveillance sont incapables de fournir des données exploitables, hyperlocales et axées sur la résolution dans le temps. La fédération World Athletics a commencé d'importants travaux dans ce domaine, en déployant des capteurs de pollution de l'air à l'intérieur des principaux stades d'athlétisme pour fournir des mesures locales.^{54,55} Par ailleurs, les capteurs de pollution atmosphérique portables disponibles à faible coût apportent aujourd'hui une solution potentiellement prometteuse pour déterminer les niveaux d'exposition en un lieu.⁵⁶ Ces capteurs peuvent théoriquement transcender les limites spatiales et temporelles des estimations de la pollution atmosphérique qui proviennent de stations fixes, offrant aux athlètes la possibilité d'acquérir eux-mêmes des données immédiates et hyperlocales sur les niveaux de pollution afin qu'ils puissent modifier rapidement leurs comportements avant ou pendant une séance d'entraînement. Bien qu'il y ait eu une prolifération rapide de ces appareils au cours des dernières années, de nombreux appareils n'ont toujours pas obtenu une homologation de parties tierces. L'agence South Coast AQMD située en Californie fournit une évaluation objective des capteurs (<http://www.aqmd.gov/aq-spec/sensors>) [site en



anglais]). Cet organisme évalue la performance des capteurs de faible coût par rapport aux instruments de référence qui ont servi à dicter les normes et publie en ligne les résultats de ses évaluations. Nous ne recommandons ni n'approuvons aucun capteur spécifique pour le moment.

En résumé

- Réduire au minimum l'exposition à la pollution atmosphérique en surveillant les niveaux de pollution en temps réels et les prévisions relatives à ces niveaux qui touchent les lieux d'intérêt en utilisant des sources fiables (p. ex. les sites Web des administrations locales).
- Des capteurs de pollution de l'air portables et abordables permettent théoriquement d'évaluer en temps opportun les niveaux de pollution atmosphérique touchant une personne. Cependant, la performance de ces capteurs varie grandement.

LA PRATIQUE D'EXERCICE À L'INTÉRIEUR COMME SOLUTION ALTERNATIVE

Le choix de déplacer à l'intérieur une séance d'exercice qui devait se tenir à l'extérieur constitue une solution alternative pour diminuer l'exposition à un niveau élevé de pollution. Cependant, cela pourrait avoir comme conséquence inattendue un risque d'exposition à des polluants se retrouvant dans l'air intérieur. Par conséquent, l'efficacité de cette stratégie dépend du rapport entre les concentrations de pollution retrouvée dans l'air intérieur et l'extérieur. Dans l'analyse ci-après, nous nous pencherons sur plusieurs facteurs qui influencent le ratio des émissions, y compris les types et les sources de polluants atmosphériques, le degré d'infiltration des polluants et la ventilation des bâtiments.⁵⁷

Les types et les sources de polluants atmosphériques varient considérablement selon le type d'établissement sportif. Par exemple, les niveaux de PM, de CO de NO₂ peuvent être reconnus comme étant particulièrement importants dans les arénas de hockey ou les patinoires en raison de l'utilisation du propane ou de l'essence dans les surfaceuses à glace (p. ex., les Zambonis), et les concentrations de COV peuvent être préoccupantes dans les centres de conditionnement physique étant donné l'utilisation fréquente de produits désinfectants.^{3,58} De manière générale, certaines sources courantes de pollution de l'air dans les environnements d'activités sportives comprennent les surfaceuses à glace, la poussière, les moisissures, les produits de nettoyage, les peintures, les désinfectants, les assainisseurs d'air, les bougies, la poussière de craie et la cire de planche à neige ou à ski. Pour un aperçu complet des types et des sources pertinentes de polluants atmosphériques dans les environnements sportifs intérieurs, nous citons en référence une recherche récente de Salonen *et collab.*⁵⁸

La pollution de l'air extérieur environnant influence également la qualité de l'air intérieur des bâtiments en raison de la ventilation naturelle et des infiltrations d'air (c.-à-d. la circulation des polluants contenus dans l'air entre les environnements intérieurs et extérieurs par des fissures et des fuites dans un bâtiment). Par exemple, Weichenthal⁵⁷ et ses collègues ont réalisé une étude croisée portant sur des femmes en bonne santé. Ils ont ainsi procédé à comparer les réponses cardiovasculaires des femmes alors qu'elles pratiquaient le cyclisme dans un environnement extérieur ou intérieur.⁵⁹ Des niveaux similaires de particules fines – PM_{2,5} – ont été enregistrés entre les environnements intérieurs et extérieurs, directement attribuables à des fenêtres ouvertes.⁵⁹ De même, une autre étude a révélé des concentrations élevées de PM_{2,5} dans un gymnase d'école primaire à Prague attribuables, selon les théories des auteurs, à la pénétration de la pollution de l'air provenant de la circulation des véhicules à moteur d'une rue à proximité où le trafic est dense.⁶⁰ Ainsi, dans certains bâtiments, l'acte de fermer les portes et les fenêtres pourrait réduire l'échange d'air avec l'extérieur et, par conséquent, réduire les concentrations de polluants à l'intérieur. Cependant, il reste que les polluants atmosphériques provenant de sources intérieures peuvent possiblement se retrouver « piégés ». Les purificateurs d'air portatifs (PAP) et les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation centraux (CVC) dotés de filtres intégrés (p. ex. les filtres à particules de haute efficacité [HEPA]) offrent des solutions

prometteuses, malgré le manque de données probantes sur les changements dans les résultats pour la santé découlant de leur utilisation.⁶¹

Néanmoins, lorsque le ratio entre les concentrations de polluants dans l'air intérieur et l'air extérieur est bon, c'est-à-dire que la qualité de l'air intérieur dépasse la qualité de l'air extérieur, des données limitées indiquent que la pratique d'activités physiques à l'intérieur peut procurer certains avantages physiologiques. Plusieurs études menées auprès d'adultes en bonne santé ont montré que, comparativement à un lieu intérieur où l'air est nettoyé par un filtre HEPA, la pratique d'un exercice où l'on respire l'air ambiant affichant des niveaux élevés de pollution atmosphérique liée à la circulation automobile peut nuire au métabolisme du glucose, augmenter l'inflammation systémique et atténuer l'hypotension post-exercice.⁶²⁻⁶⁵ Dans une autre étude portant sur des personnes âgées au Brésil, des chercheurs ont rapporté une amélioration du taux de glycémie, du facteur neurotrophique dérivé du cerveau et de la fonction cognitive après 12 semaines d'entraînement aérobique dans un environnement intérieur, par rapport à un parc urbain extérieur.⁶⁶

En résumé

- Lorsque les concentrations de pollution de l'air ambiant sont élevées, il peut être avantageux de déplacer un exercice de l'extérieur à l'intérieur après avoir pris en considération la qualité de l'air intérieur et les co-expositions possibles (p. ex. les températures intérieures).
- Des améliorations peuvent aussi être apportées à la qualité de l'air intérieur en contrôlant des sources de pollution de l'air intérieur, en optimisant la ventilation et en utilisant des purificateurs d'air portables équipés de filtres HEPA.

ACCLIMATATION

L'acclimatation à la pollution atmosphérique peut s'avérer une stratégie de performance viable au sein de certains groupes (c.-à-d. les athlètes de haut niveau). Plusieurs petites recherches de laboratoire impliquant des expositions consécutives à court terme à l'O₃ tous les jours pendant les périodes d'exercice ont examiné l'effet d'acclimatation relatif à la fonction respiratoire et aux réactions en présence de symptômes. En général, ces études impliquaient des adultes en bonne santé, ou atteints d'asthme qualifié léger, qui s'exerçaient de manière intermittente à basse intensité en présence de concentrations élevées d'O₃ (entre 200 et 500 ppb) pendant environ 2 heures durant 4 ou 5 jours consécutifs. Dans ces recherches, le VEMS post-exercice était pire durant les deux premiers jours d'exposition à l'O₃, avant de s'améliorer graduellement au cours des expositions quotidiennes consécutives, de sorte que le VEMS des derniers jours d'exposition à l'O₃ était similaire aux niveaux observés à la suite d'une séance d'exercice dans un lieu où l'air est filtré.^{67,68} Cependant, cette acclimatation semble durer moins d'une semaine.^{68,69} Une étude a examiné les effets potentiels sur les résultats de performance et a trouvé qu'après quatre jours consécutifs d'exposition à 350 ppb d'O₃, le temps de performance et le pic de VO₂ ne différaient pas de ceux constatés dans des conditions où l'air est filtré;⁷⁰ cependant, il y a probablement une variabilité inter-individuelle importante dans la réaction. L'effet d'acclimatation à l'O₃ peut dépendre, en partie, de la concentration.⁷¹ Dans une étude de modélisation utilisant un ensemble de données de plus de 650 000 résultats de performance en plein air d'athlètes au collégial, ceux dont l'O₃ a affecté la performance le plus grandement sont les athlètes qui ont été exposés aux niveaux le plus bas d'O₃ sept jours avant leur épreuve. Cela vient corroborer un effet d'acclimatation possible qui dépendrait d'une exposition sur plusieurs jours.⁷²

La possibilité d'acclimatation à d'autres polluants, pour ce qui est du rapport avec l'exercice, demeure floue. Dans une étude portant sur 16 athlètes de sexe masculin au collégial, lesquels devaient effectuer pendant deux jours consécutifs des tests d'effort maximal tout en étant exposés à des niveaux élevés de matières particulaires (environ 340 000 particules/cm³), aucun effet d'acclimatation n'a été observé.⁷³ Les chercheurs ont trouvé une seule étude qui examinait les effets d'une exposition quotidienne



pendant les périodes d'exercice au NO₂ pendant quatre jours consécutifs. L'étude en question a fait état d'une diminution du VEMS, de la capacité vitale forcée et du statut antioxydant après le premier jour d'exposition, mais l'ampleur des baisses s'est atténuée après le quatrième jour.⁷⁴ Néanmoins, la concentration de NO₂ des doses administrées était plusieurs fois supérieure aux concentrations ambiantes.

En résumé, parmi les polluants, l'O₃ semble être celui pour lequel les athlètes possèdent le plus de potentiel d'acclimatation. L'interprétation des résultats doit toutefois se faire avec prudence, compte tenu des niveaux très élevés d'O₃, du nombre limité de paramètres et du faible niveau d'intensité à l'effort utilisé. Il faut donc reconnaître que, jusqu'à ce que l'on puisse évaluer correctement la sécurité et l'efficacité réelle d'un tel plan, l'utilisation d'un protocole d'acclimatation à l'O₃ demeure basée sur des suppositions.

En résumé

- Des études en laboratoire suggèrent que l'exposition à des niveaux élevés d'ozone sur plusieurs jours consécutifs peut permettre aux athlètes de s'acclimater aux effets délétères de l'ozone sur la capacité pulmonaire.
- Les athlètes doivent savoir que la sécurité et l'efficacité relevant d'un protocole d'acclimatation à l'ozone, dans le contexte du sport et de la performance, n'ont toujours pas fait l'objet de véritables tests en dehors des laboratoires de recherche.

L'EXPOSITION AVANT UNE COMPÉTITION

L'exposition à la pollution atmosphérique avant une séance d'exercice peut avoir des répercussions sur la santé cardiorespiratoire et sur la performance d'une personne, même lorsque la qualité de l'air où elle s'exerce est optimale. Il s'agit d'une considération pratique importante, car les athlètes et les personnes qui pratiquent un exercice sont probablement exposés à des niveaux plus élevés de pollution atmosphérique lorsqu'ils voyagent vers le lieu qu'ils désignent comme étant leur environnement sportif. Par exemple, alors que le temps de trajet en autobus représente généralement moins de 5 % du total de la journée, ce trajet peut être une source d'exposition à certains polluants liés à la circulation qui peut équivaloir à entre 11 % et 70 % de l'exposition quotidienne.⁷⁵ Aux fins de la présente analyse, nous nous servons du terme « pré-exercice » pour parler de l'exposition aux polluants atmosphériques pendant les heures qui précèdent une période d'exercice, alors que « acclimatation » fait référence à des protocoles intentionnels dont l'application se fait sur plusieurs jours et lesquels impliquent des expositions à court terme à des niveaux élevés de pollution atmosphérique.

Deux études portant sur les effets de l'exposition à des polluants sur le système cardiorespiratoire et la performance avant l'exercice ont été réalisées dans des conditions de laboratoire contrôlées, où les participants étaient exposés à des niveaux élevés de gaz d'échappement de moteur diesel de PM_{2,5} de 300 µg/m³. Une étude portant sur huit athlètes de sexe masculin entraînés à la performance d'endurance a montré que l'exposition de ces derniers à des particules de DE pendant 60 minutes avant leur séance d'exercice, alors qu'ils étaient au repos, a fait accroître la fréquence cardiaque à l'effort et a restreint la dilatation bronchique provoquée par l'exercice. Cependant, les performances dans une épreuve de cyclisme dans un contre-la-montre de 20 km n'ont pas été affectées.⁷⁶ La deuxième étude, dans le cadre de laquelle 11 adultes plus âgés en bonne santé étaient exposés au repos à des particules de DE pendant 2 heures avant une épreuve de cyclisme d'intensité constante exécutée 2,5 heures suivant ladite exposition, a indiqué une réduction de la tolérance à l'effort et de la réponse ventilatoire et des difficultés à respirer.⁷⁷

Il est donc recommandé de réduire au minimum l'exposition à la pollution atmosphérique avant l'exercice. Par exemple, pour les sports organisés nécessitant le transport par autobus des membres de

l'équipe, les personnes devraient éviter de se réunir dans des lieux semi-fermés ou il faudrait éviter de laisser l'autobus en marche en attendant que les passagers embarquent. Sinon, dans la mesure du possible, il faudrait complètement éviter de voyager. Par ailleurs, en route vers les sites d'entraînement ou de compétition, les athlètes peuvent chercher à minimiser leur risque d'exposition à la pollution atmosphérique en fermant les vitres du véhicule dans lequel ils se trouvent, en allumant la climatisation et en utilisant des filtres à air d'habitacle. Hors des périodes d'entraînement ou des épreuves de compétition dans des environnements où la pollution par les particules fines est particulièrement élevée, le port d'un masque qui filtre efficacement les particules peut s'avérer bénéfique.

En résumé

- Réduire au minimum l'exposition à la pollution atmosphérique pendant le trajet vers les installations où se tiennent les périodes d'exercice en fermant les vitres des véhicules, en allumant la climatisation et en utilisant des filtres à air d'habitacle.

APPAREILS DE PROTECTION RESPIRATOIRE ET MASQUES

Lorsqu'il s'avère impossible d'éviter d'être exposé à des polluants, on peut envisager de porter un masque qui filtre l'air inhalé. L'efficacité d'un tel masque dépend de plusieurs facteurs : type de polluant, type de filtre, capacité d'absorption du matériau, la mise en place et la qualité du dispositif d'étanchéité facial. En raison des caractéristiques faciales de chaque utilisateur, il est impossible d'assurer une étanchéité optimale avec un seul masque (par exemple, les masques certifiés pour adultes ne conviennent pas aux enfants). Aussi, la protection que confèrent les couvre-visages en tissu et les masques chirurgicaux, lesquels sont devenus monnaie courante pendant la pandémie de COVID-19, est inégale compte tenu de l'incapacité de former un joint étanche, ce qui permet aux polluants d'emprunter la voie de moindre résistance, c'est-à-dire de passer par les petites ouvertures entre le joint du masque et la peau, au lieu d'être filtrés par le dispositif de protection.⁷⁸

Étonnamment, il y a un manque évident de recherches portant sur les effets des masques sur la santé et les performances dans le contexte de la pollution de l'air. Langrish *et collab.* ont trouvé un effet bénéfique et autonome pour la tension artérielle (TA) lié au port d'un masque N95 pendant une promenade de 2 heures. Cependant, il faut noter que les participants ont porté des masques pendant 24 heures la veille et le jour de l'analyse (pour un total de 48 heures), ce qui limite la généralisabilité des résultats.⁷⁹ Dans une étude randomisée à double insu réalisée récemment, le port d'un masque N95 pendant une randonnée de 2 heures s'est avéré bénéfique pour la fonction pulmonaire et contre le stress oxydatif des voies respiratoires et l'inflammation systémique, contrairement à un simple masque faux semblant.⁸⁰ Chez les enfants, le port d'un masque N95 spécifiquement adaptés pour les populations pédiatriques s'est avéré confortable et sécuritaire lorsqu'ils marchaient rapidement.⁸¹ La seule étude portant sur l'utilisation de masques avec filtre au charbon activé pour se protéger contre l'O₃ a relevé une amélioration de la fonction pulmonaire comparativement au port d'un simple masque faux semblant, mais a également fait état d'un inconfort et de difficultés à respirer.⁸²

Bien que des méta-analyses récentes aient souligné l'effet minime du port d'un masque N95 pendant l'exercice sur la fonction physiologique et la performance,⁸³ ces masques ne sont pas de manière générale tolérés pendant la pratique d'activités physiques. Par conséquent, vu le manque d'études portant sur les effets sur la santé et la performance qui découlent du port d'un masque lors d'exercices d'intensité modérée à supérieure dans un environnement très pollué, nous ne recommandons pas expressément le port d'un masque dans ces circonstances. Néanmoins, les athlètes qui s'exercent dans des environnements où il y a de fortes concentrations de particules peuvent envisager de porter un masque N95 correctement ajusté avant et après un entraînement ou une compétition afin de minimiser les effets indésirables potentiels d'une pré-exposition à des polluants.

En résumé

- Les athlètes dans des environnements qui présentent des niveaux élevés de MP peuvent envisager de porter un masque qui a été vérifié (c.-à-d. les N95, les KN95, les FFP2) et qui permet d'empêcher ≥ 95 % des particules en suspension dans l'air d'atteindre les voies respiratoires en dehors des séances d'entraînement ou des épreuves de compétition. Les masques en tissu et les masques chirurgicaux ne sont pas recommandés en raison de l'impossibilité de former un joint hermétique avec la peau du visage, ce qui compromet leur efficacité.
- L'efficacité d'un masque dépend : 1) d'une utilisation correcte et appropriée; 2) d'un bon ajustement et une vérification de l'étanchéité; 3) de l'entretien et du remplacement du masque après saturation.

LES MÉDICAMENTS

L'asthme provoqué par l'effort ou le B.I.E. est un trouble respiratoire particulièrement répandu chez les populations de personnes sportives, ce qui suscite des préoccupations étant donné que la pollution atmosphérique peut provoquer des exacerbations aiguës chez les personnes asthmatiques.³⁸ Les médicaments courants de première et de deuxième intention comprennent les β_2 -agonistes inhalés (p. ex. le salbutamol/albutérol, le salmétérol), les corticostéroïdes inhalés, les anticholinergiques et les antagonistes des récepteurs des leucotriènes (p. ex. le montelukast).³⁸ Comme la pollution atmosphérique contribue au B.I.E. en amplifiant le stress oxydatif et les poussées inflammatoires, certains ont émis l'hypothèse que ces médicaments pourraient être des médicaments prophylactiques efficaces. Cependant, les recherches sur le sujet restent limitées et chaque médicament entraîne vraisemblablement des effets différents et agit probablement différemment selon le polluant. À l'opposé, certains ont soulevé des préoccupations quant à la contre-productivité des médicaments contre l'asthme qui pourraient faciliter le dépôt de polluants plus loin dans l'arbre bronchique par la voie de la bronchodilatation. En effet, des recherches récentes sur les souris ont démontré des exacerbations dans l'inflammation respiratoire induite par l' O_3 avec l'utilisation combinée de deux médicaments à action prolongée, les β_2 -agonistes et les glucocorticoïdes.⁸⁴

Dans deux essais à double insu contrôlés avec placebo menés auprès d'athlètes de compétition non asthmatiques exposés à de l' O_3 , le salbutamol n'a pas atténué les effets de l' O_3 sur la fonction pulmonaire, les symptômes ou les performances à l'effort.^{85,86} Dans une étude récente exposant de jeunes adultes atteints de B.I.E. à des concentrations élevées de gaz d'échappement de moteurs diesel, l'utilisation de salbutamol en période pré-exercice a entraîné une dilation bronchique et a facilité le travail respiratoire, mais n'a affecté ni la dyspnée ni les fonctions micro- ou macro-vasculaire ou cardiaque, en comparaison à des conditions où l'air est filtré.^{87,88} L'administration de salmétérol, un agoniste β_2 à longue durée d'action, chez les adultes asthmatiques exposés au SO_2 a limité les baisses des changements constatés avant et après l'exercice en ce qui concerne le VEMS et les symptômes.⁸⁹ Certaines études suggèrent que l'utilisation de montelukast, du moins dans des conditions bien contrôlées, s'avérerait efficace pour atténuer la bronchoconstriction provoquée par une exposition au SO_2 et à des matières particulaires ainsi que l'inflammation respiratoire et le dysfonctionnement endothélial.⁹⁰⁻⁹²

Dans l'ensemble, il n'existe actuellement aucune preuve suggérant que les médicaments contre l'asthme peuvent aggraver les effets aigus de l'exposition à la pollution atmosphérique pendant la pratique d'exercices. De même, il n'y a pas non plus d'appui soutenant l'utilisation de ces médicaments chez les personnes non asthmatiques ou l'augmentation de la dose chez les asthmatiques faisant de l'exercice dans des conditions où le taux de pollution est élevé. Des données probantes limitées suggèrent que l'utilisation de montelukast ou de salmétérol procurerait des avantages vasculaires et respiratoires dans certaines conditions, mais il n'existe aucune preuve voulant que ces changements se



traduisent en un avantage ergogénique. Cependant, avant de prescrire du montelukast, il faudrait engager un processus décisionnel partagé afin d'évaluer le rapport risque-avantage de ce médicament, en raison des effets secondaires graves de nature neuropsychiatrique.⁹³ En résumé, les patients asthmatiques ou atteints de B.I.E. devraient continuer à utiliser les médicaments contre l'asthme comme prescrits et éviter d'augmenter leurs doses de médicaments avant de faire de l'exercice dans un environnement pollué. Comme toujours, les athlètes doivent se conformer à la réglementation antidopage en vigueur qui s'applique dans le cas de l'utilisation de médicaments (<https://www.wada-ama.org/fr/liste-des-interdictions>).

En résumé

- Les médicaments contre l'asthme ne semblent pas atténuer ou aggraver les effets de l'exposition à la pollution atmosphérique pendant l'exercice.
- Les athlètes asthmatiques ou atteints de B.I.E., selon le cas, devraient continuer à contrôler leur état, d'un point de vue pharmacologique, suivant la dose et la fréquence prescrites.
- Les praticiens doivent rester informés et à jour sur le plan de la réglementation antidopage spécifique qui encadre l'organisation sportive.

LES SUPPLÉMENTS VITAMINIQUES

De nombreuses recherches examinent l'interaction entre les suppléments vitaminiques et la pollution, étant donné que de multiples polluants atmosphériques (p. ex., PM, O₃) exercent des effets nocifs sur la santé cardiorespiratoire en augmentant les niveaux de stress oxydatif.⁹⁴ Cependant, relativement peu d'études ont exploré le rôle potentiel que peut jouer une supplémentation en antioxydant sur la modulation des effets de l'exposition à la pollution atmosphérique pendant l'exercice sur la santé et la performance. Signalons à ce propos que l'exercice est connu pour améliorer les niveaux de santé cardiorespiratoire en influençant favorablement sa capacité antioxydante, ce qui peut potentiellement compenser les effets pro-oxydants de la pollution atmosphérique.⁹⁴

Dans deux études écologiques dans laquelle on suit des cyclistes des Pays-Bas considérés amateurs et en bonne santé pendant un été, la supplémentation en antioxydant a eu un effet prophylactique contre les diminutions aiguës de la fonction pulmonaire provoquées par l'O₃. Dans la première phase d'essais, les niveaux ambiants d'O₃ étaient associés de façon négative à la capacité vitale forcée (CVF), au VEMS et au débit maximal expiratoire en période post-exercice; la prise pendant 12 semaines de β-carotène, de vitamine E, et de vitamine C au quotidien (commençant une semaine avant les mesures) a modifié cette relation.⁹⁵ Les résultats ont été reproduits dans une deuxième phase d'essais, dans laquelle on utilisait un échantillon de plus grande taille comptant 38 cyclistes : une exposition de 100 µg/m³ d'O₃ (~51 ppb) a réduit le VEMS et la CVF de 95 ml et de 125 ml respectivement, et la supplémentation quotidienne en antioxydants a atténué ces diminutions.⁹⁶ Cependant, il existe une variabilité entre les études. Ainsi, un des essais à double insu n'a relevé aucune amélioration en ce qui concerne l'inflammation ou des symptômes respiratoires provoqués par l'O₃, malgré une diminution significative de la fonction pulmonaire⁹⁷, alors que l'autre n'a relevé aucune protection du côté de la fonction pulmonaire et de l'inflammation.⁹⁸ Dans la seule étude examinant les effets sur la performance, l'utilisation de la supplémentation en antioxydants chez les coureurs expérimentés n'a eu aucune incidence sur la vitesse moyenne, la fréquence cardiaque, le niveau d'effort perçu ou sur le temps total dans un contre-la-montre de 8 km effectué dans des conditions de 100 ppb d'O₃.⁹⁹

Les avantages de la supplémentation en antioxydants sont moins évidents dans un contexte où la pollution de l'air provient de la circulation des véhicules à moteur. Une supplémentation ponctuelle en jus rouge-orange 2,5 heures avant un test Yo Yo de récupération intermittente a réduit les hausses de la fréquence cardiaque et de la pression systolique, des lésions des muscles squelettiques et de la peroxydation lipidique provoquées par la pollution de l'air provenant de la circulation des véhicules à

moteur en période post-exercice.¹⁰⁰ Cependant, bien que les auteurs aient signalé des réductions du pic de $\dot{V}O_2$ en raison d'une exposition à des polluants provenant de la circulation de véhicules à moteur, ils n'ont soulevé aucune modification en raison de l'effet de la supplémentation en jus rouge-orange.¹⁰⁰ En résumé, tout en reconnaissant une variabilité significative entre les études, il semble qu'une supplémentation diététique en antioxydants de 250 à 650 mg de vitamine C, de 75 à 100 mg de vitamine E et 25 mg de β -carotène pendant au moins une semaine avant de faire de l'exercice dans un environnement où le niveau d' O_3 est considéré élevé puisse réduire des effets de l' O_3 , particulièrement chez les personnes dont l'apport alimentaire s'avère inadéquat.

En résumé

- Pendant au moins une semaine avant de faire de l'exercice dans un environnement présentant des niveaux élevés d' O_3 , les athlètes peuvent envisager la possibilité de consommer de 250 à 650 mg de vitamine C, de 75 à 100 mg de vitamine E et 25 mg de β -carotène.

CONCLUSION

La pollution atmosphérique revêt une importance particulière dans le contexte du sport alors que les athlètes inhalent généralement des doses élevées de polluants atmosphériques de toxicité aiguë ou chronique. Alors qu'il reste encore plusieurs points à éclaircir sur les effets de la pratique d'exercices physiques dans un environnement contaminé par la pollution atmosphérique tant sur la santé, le bien-être et la performance, les effets de ce type de pollution sur la santé sont bien documentés et considérables. Évidemment, il s'avère nécessaire d'apporter des changements aux politiques nationales pour avoir un impact durable, mais les stratégies pratiques, de niveau individuel, fondées sur des données probantes et proposées ici fournissent aux athlètes un outil important pour réduire leurs risques d'exposition à la pollution atmosphérique et ses effets. D'après la revue de la littérature et les perspectives du panel d'auteurs, les athlètes peuvent minimiser les conséquences des expositions à la pollution atmosphérique en dehors des périodes d'entraînement et des épreuves de compétition en surveillant les concentrations de polluants, en faisant de l'exercice le matin ou dans des endroits où les risques d'événements de pollution saisonnière sont moins probables, en minimisant les expositions avant l'exercice et pendant les trajets vers les sites d'entraînement et de compétition, en portant des masques de protection respiratoire et en optimisant la consommation d'antioxydants. Les athlètes asthmatiques ou atteints de B.I.E., selon le cas, devraient continuer de prendre les médicaments que leurs médecins leur prescrivent. Les expositions à l'ozone sur plusieurs jours consécutifs avant une compétition peuvent également contribuer à atténuer les effets de la pollution par l'ozone sur la fonction pulmonaire. Pendant la pratique d'exercices physiques, les athlètes devraient s'efforcer de réduire au minimum la dose totale de pollution atmosphérique inhalée et se distancer considérablement des sources importantes de pollution atmosphérique (p. ex. les artères principales de circulation).

Le contenu de cet énoncé de position doit être interprété dans le contexte de ses limites. Le plus important demeure l'incertitude et la disponibilité limitée des données probantes fondamentales sur lesquelles s'appuient les recommandations émises. Comme prévu, la recherche documentaire a recensé relativement peu d'études de recherche pertinentes pour chacune des stratégies; certaines ne pouvant reposer sur peu, ou pas, d'études randomisées et comparatives de haute qualité sur lesquelles se fier pour étudier spécifiquement leur efficacité. De plus, bien que des méthodologies systématiques aient été utilisées au cours de la recherche documentaire, une approche narrative était nécessaire en raison de la disponibilité limitée des données probantes fondamentales et de l'hétérogénéité des méthodologies. Pour adopter une approche vraiment personnalisée pour atténuer les conséquences de la pollution atmosphérique pour ce qui est de la pratique de sports et d'exercices physiques, l'argument pour d'autres recherches sur les différentes composantes complexes liées à l'exercice (p. ex., la fréquence, l'intensité, la modalité et la durée) et à la pollution atmosphérique (p. ex., le type, les



sources, les concentrations et les mélanges) est défendable. Nous n'avons pas été en mesure de trouver des études portant sur l'efficacité à long terme d'une stratégie quelconque basée sur des résultats cliniques ou de performance tangibles non plus. Il y a aussi un manque évident de diversité dans la base de données probantes concernant le type de sport et le niveau de compétition – la plupart des données proviennent de recherches réalisées auprès de jeunes adultes en bonne santé ayant comme modèle de cadre d'étude le cyclisme, la course ou la marche.

Cet énoncé vise à sensibiliser le public sur une source de préoccupation croissante qui touche le domaine du sport et de l'exercice physique et à fournir des conseils sur le sujet. Les avantages et les inconvénients de chaque stratégie demeurent, dans une certaine mesure, conditionnels. De futurs essais contrôlés randomisés bien conçus sont nécessaires pour valider empiriquement l'efficacité de chaque stratégie en matière d'optimisation de la santé et de la performance des athlètes. En toutes circonstances, cet énoncé ne devrait pas remplacer un jugement d'ordre clinique. De plus, un processus décisionnel partagé et éclairé devrait être entrepris avant l'adoption de toute intervention.

Twitter @mskoehle @Sh_Koch @VBougault @CameronMGee @MalindiElmore @McCluskeyPaddy @Judithgarciaaym

Collaborateurs M.S.K. a conceptualisé l'énoncé de position et a veillé à l'exécution des fonctions pour en assurer la publication. Tous les auteurs ont contribué à l'examen des données, à l'analyse ou à la rédaction du document, en passant par deux périodes de révisions. Tous les auteurs ont approuvé la version finale de l'énoncé de position.

Financement Sarah Koch (S.K.) a reçu une subvention de recherche de la Commission européenne en vertu du programme Actions Marie Skłodowska-Curie (840 513). ISGlobal reconnaît le soutien du ministère de la Science et de l'Innovation du gouvernement espagnol par l'entremise du programme de 2019-2023 du centre d'excellence *Centro de Excelencia Severo Ochoa* (CEX2018-000806-S) et de l'organisation Generalitat de Catalunya par l'entremise du programme CERCA.

Conflit d'intérêts Aucun déclaré.

Consentement du patient pour publication Ne s'applique pas.

Approbation éthique Cette étude ne fait pas appel à des participants humains.

Provenance et examen par les pairs Rapport non effectué sur commande; examiné par des pairs de l'extérieur.

Déclaration concernant la disponibilité des données Le partage des données ne s'applique pas dans ce cas-ci, car aucun ensemble de données n'a été généré ou analysé, selon le cas, pour la présente étude.

Identifiants ORCID

Sarah Koch <https://orcid.org/0000-0001-9461-8407>

Valérie Bougault <https://orcid.org/0000-0002-2258-6562>

Rômulo Bertuzzi <https://orcid.org/0000-0002-0407-9620>

Judith Garcia-Aymerich <https://orcid.org/0000-0002-7097-4586>

Michael S. Koehle <https://orcid.org/0000-0001-7026-8422>

RÉFÉRENCES

- 1 Bull F.C., Al-Ansari S.S., Biddle S., *et collab.* World Health Organization 2020 guidelines on physical activity and sedentary behaviour. *Br J Sports Med* 2020;**54**:1451–62.
- 2 Bernard P., Chevance G., Kingsbury C., *et collab.* Climate Change, Physical Activity and Sport: A Systematic Review. *Sports Medicine* 2021;**51**:1041–59.
- 3 Giles L., Koehle M.S. The health effects of exercising in air pollution. *Sports Medicine* 2014;**44**:223–49.
- 4 Hung A., Nelson H., Koehle M.S. The Acute Effects of Exercising in Air Pollution: A Systematic Review of Randomized Controlled Trials. *Sports Medicine* 2022;**52**:139–64.
- 5 Tainio M., Jovanovic Z., Nieuwenhuijsen M.J., *et collab.* Air pollution, physical activity and health: A mapping review of the evidence. *Environ Int* 2021;**147**:105954.
- 6 DeFlorio-Barker S., Lobdell D.T., Stone S.L., *et collab.* Acute effects of short-term exposure to air pollution while being physically active, the potential for modification: A review of the literature. *Prev Med (Baltim)* 2020;**139**:106195.
- 7 Dominici F., Schwartz J., Di Q., *et collab.* Assessing Adverse Health Effects of Long-Term Exposure to Low Levels of Ambient Air Pollution: Phase 1. 2019.
- 8 Brauer M., Brook J.R., Christidis T., *et collab.* Mortality–Air Pollution Associations in Low-Exposure Environments (MAPLE): Phase 1. 2019.
- 9 Brunekreef B., Strak M., Chen J., *et collab.* Mortality and Morbidity Effects of Long-Term Exposure to Low-Level PM_{2.5}, BC, NO₂, and O₃: An Analysis of European Cohorts in the ELAPSE Project. Boston, MA: 2021.
- 10 Organisation mondiale de la Santé. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. 2021.
- 11 Ross W.J., Orr M. Predicting climate impacts to the Olympic Games and FIFA Men’s World Cups from 2022 to 2032. *Sport Soc* 2021;**1**–22.
- 12 Dominici F., Peng R.D., Barr C.D., *et collab.* Protecting human health from air pollution: shifting from a single-pollutant to a multipollutant approach. *Epidemiology* 2010;**21**:187–94.
- 13 U.S. Environmental Protection Agency. Integrated Science Assessment (ISA) for Particulate Matter (rapport final, déc. 2019). Washington, DC: 2019.
- 14 U.S. Environmental Protection Agency. Integrated Science Assessment (ISA) for Ozone and Related Photochemical Oxidants (rapport final, avril 2020). 2020.
- 15 Health Effects Institute. Ozone Exposure | State of Global Air 2020. 2020. <https://www.stateofglobalair.org/air/ozone> (page consultée le 8 juin 2022).
- 16 Koenig J.Q. *Health Effects of Ambient Air Pollution*. 1re éd. Boston, MA: : Springer 2000.
- 17 U.S. Environmental Protection Agency. Nitrogen Oxides (NO_x), Why and How They Are Controlled. 1999.
- 18 Santé Canada. Évaluation des risques pour la santé humaine du dioxyde de soufre. 2016.
- 19 U.S. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Medical Management Guidelines for Sulfur Dioxide. 2014. <https://wwwn.cdc.gov/TSP/MMG/MMGDetails.aspx?mmgid=249&toxid=46> (page consultée le 7 févr. 2022).
- 20 Linn W.S., Avol E.L., Peng R.C., *et collab.* Replicated dose-response study of sulfur dioxide effects in normal, atopic, and asthmatic volunteers. *American Review of Respiratory Disease* 1987;**136**:1127–34.
- 21 Environnement et ressources naturelles Canada. Principaux contaminants atmosphériques : monoxyde de carbone. 2016. <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/pollution-atmospherique/polluants/principaux-contaminants/monoxyde-carbone.html> (page consultée le 9 déc. 2021).



- 22 Adir Y., Merdler A., Haim S. Ben, *et collab.* Effects of exposure to low concentrations of carbon monoxide on exercise performance and myocardial perfusion in young healthy men. *Occup Environ Med* 1999;**56**:535–8.
- 23 Ekblom B., Huot R., Stein E.M., *et collab.* Effect of changes in arterial oxygen content on circulation and physical performance. *J Appl Physiol* 1975;**39**:71–5.
- 24 Raub J.A., Benignus V.A. Carbon monoxide and the nervous system. *Neurosci Biobehav Rev* 2002;**26**:925–40.
- 25 U.S. Environmental Protection Agency. What are volatile organic compounds (VOCs). <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/what-are-volatile-organic-compounds-vocs> (page consultée le 7 févr. 2022).
- 26 U.S. Environmental Protection Agency. Volatile Organic Compounds' Impact on Indoor Air Quality. <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/volatile-organic-compounds-impact-indoor-air-quality> (page consultée le 7 févr. 2022).
- 27 Furtaw E.J. An overview of human exposure modeling activities at the USEPA's National Exposure Research Laboratory. *Toxicol Ind Health* 2016;**17**:302–14.
- 28 Cutrufello P.T., Smoliga J.M., Rundell K.W. Small Things Make a Big Difference Particulate Matter and Exercise. *Sports Medicine* 2012;**42**:1041–58.
- 29 Kesavanathan J., Swift D.D.L. Human Nasal Passage Particle Deposition: The Effect of Particle Size, Flow Rate, and Anatomical Factors. *Aerosol Science and Technology* 1998;**28**:457–63.
- 30 Daigle C.C., Chalupa D.C., Gibb F.R., *et collab.* Ultrafine particle deposition in humans during rest and exercise. *Inhal Toxicol* 2003;**15**:539–52.
- 31 Gee C.M., Eves N.D., Sheel A.W., *et collab.* How does cervical spinal cord injury impact the cardiopulmonary response to exercise? *Respir Physiol Neurobiol* 2021;**293**:103714.
- 32 McConnell R., Berhane K., Gilliland F., *et collab.* Asthma in exercising children exposed to ozone. *The Lancet* 2002;**360**:411.
- 33 Andersen Z.J., de Nazelle A., Mendez M.A., *et collab.* A study of the combined effects of physical activity and air pollution on mortality in elderly urban residents: the Danish Diet, Cancer, and Health Cohort. *Environ Health Perspect* 2015;**123**:557–63.
- 34 Fisher J.E., Loft S., Ulrik C.S., *et collab.* Physical Activity, Air Pollution, and the Risk of Asthma and Chronic Obstructive Pulmonary Disease. *Am J Respir Crit Care Med* 2016;**194**:855–65.
- 35 Kubesch N.J., Therning Jørgensen J., Hoffmann B., *et collab.* Effects of Leisure-Time and Transport-Related Physical Activities on the Risk of Incident and Recurrent Myocardial Infarction and Interaction with Traffic-Related Air Pollution: A Cohort Study. *J Am Heart Assoc* 2018;**7**:e009554.
- 36 Wong C.-M., Ou C.-Q., Thach T.-Q., *et collab.* Does regular exercise protect against air pollution-associated mortality? *Prev Med (Baltim)* 2007;**44**:386–92.
- 37 Lamichhane D.K., Leem J.H., Kim H.C. Associations between ambient particulate matter and nitrogen dioxide and chronic obstructive pulmonary diseases in adults and effect modification by demographic and lifestyle factors. *Int J Environ Res Public Health* 2018;**15**:363.
- 38 Parsons J.P., Hallstrand T.S., Mastrorarde J.G., *et collab.* An official American Thoracic Society clinical practice guideline: exercise-induced bronchoconstriction. *Am J Respir Crit Care Med* 2013;**187**:1016–27.
- 39 Guyatt G.H., Oxman A.D., Vist G.E., *et collab.* GRADE: An emerging consensus on rating quality of evidence and strength of recommendations. *BMJ* 2008;**336**:924–6.
- 40 Greenwald R., Hayat M.J., Dons E., *et collab.* Estimating minute ventilation and air pollution inhaled dose using heart rate, breath frequency, age, sex and forced vital capacity: A pooled-data analysis. *PLoS One* 2019;**14**:e0218673.

- 41 Santé Canada. Descriptions des messages de la cote air santé. 2015. <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/cote-air-sante/descriptions-messages.html> (page consultée le 15 nov. 2021).
- 42 Giles L.V., Carlsten C., Koehle M.S. The pulmonary and autonomic effects of high-intensity and low-intensity exercise in diesel exhaust. *Environmental Health* 2018;**17**:87.
- 43 Giles L.V., Tebbutt S.J., Carlsten C., *et collab.* The effect of low and high-intensity cycling in diesel exhaust on flow-mediated dilation, circulating NOx, endothelin-1 and blood pressure. *PLoS One* 2018;**13**:e0192419.
- 44 Giles L.V., Tebbutt S.J., Carlsten C., *et collab.* Effects of low-intensity and high-intensity cycling with diesel exhaust exposure on soluble P-selectin, E-selectin, I-CAM-1, VCAM-1 and complete blood count. *BMJ Open Sport Exerc Med* 2019;**5**:e000625.
- 45 Giles L.V., Brandenburg J.P., Carlsten C., *et collab.* Physiological responses to diesel exhaust exposure are modified by cycling intensity. *Med Sci Sports Exerc* 2014;**46**:1999–2006.
- 46 Adams W.C., Schelegle E.S. Ozone and high ventilation effects on pulmonary function and endurance performance. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol* 1983;**55**:805–12.
- 47 Bergmann M.L., Andersen Z.J., Amini H., *et collab.* Ultrafine particle exposure for bicycle commutes in rush and non-rush hour traffic: A repeated measures study in Copenhagen, Denmark. *Environmental Pollution* 2021;**294**:118631.
- 48 U.S. Environmental Protection Agency. What is Ozone? 2021. <https://www.epa.gov/ozone-pollution-and-your-patients-health/what-ozone> (page consultée le 30 nov. 2021).
- 49 Karner A.A., Eisinger D.S., Niemeier D.A. Near-roadway air quality: Synthesizing the findings from real-world data. *Environ Sci Technol* 2010;**44**:5334–44.
- 50 Stieb D.M., Burnett R.T., Smith-Doiron M., *et collab.* 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* 2008;**58**:435–50.
- 51 Stieb D.M., Shutt R., Kauri L.M., *et collab.* Cardiorespiratory Effects of Air Pollution in a Panel Study of Winter Outdoor Physical Activity in Older Adults. *J Occup Environ Med* 2018;**60**:673–82.
- 52 Stieb D., Shutt R.H., Kauri L.M., *et collab.* Associations between air pollution and cardio-respiratory physiological measures in older adults exercising outdoors. *Int J Environ Health Res* 2021;**31**:901–14.
- 53 Stieb D.M., Shutt R., Kauri L., *et collab.* Cardio-Respiratory Effects of Air Pollution in a Panel Study of Outdoor Physical Activity and Health in Rural Older Adults. *J Occup Environ Med* 2017;**59**:356–64.
- 54 Viana M., Karatzas K., Arvanitis A., *et collab.* Air Quality Sensors Systems as Tools to Support Guidance in Athletics Stadia for Elite and Recreational Athletes. *Int J Environ Res Public Health* 2022;**19**:3561.
- 55 Reche C., Viana M., van Drooge B.L., *et collab.* Athletes' exposure to air pollution during World Athletics Relays: A pilot study. *Science of the Total Environment* 2020;**717**:137161.
- 56 Larkin A., Hystad P. Towards Personal Exposures: How Technology Is Changing Air Pollution and Health Research. *Curr Environ Health Rep* 2017;**4**:463–71.
- 57 Leung D.Y.C. Outdoor-indoor air pollution in urban environment: challenges and opportunity. *Front Environ Sci* 2015;**2**:69.
- 58 Salonen H., Salthammer T., Morawska L. Human exposure to air contaminants in sports environments. *Indoor Air* 2020;**30**:1109–29.
- 59 Weichenthal S., Hatzopoulou M., Goldberg M.S. Exposure to traffic-related air pollution during physical activity and acute changes in blood pressure, autonomic and micro-vascular function in women: a cross-over study. *Part Fibre Toxicol* 2014;**11**:70.
- 60 Braniš M., Šafránek J., Hytychová A. Indoor and outdoor sources of size-resolved mass concentration of particulate matter in a school gym-implications for exposure of exercising children. *Environmental Science and Pollution Research* 2011;**18**:598–609.



- 61 Allen R.W., Barn P. Individual- and Household-Level Interventions to Reduce Air Pollution Exposures and Health Risks: a Review of the Recent Literature. *Curr Environ Health Rep* 2020;**7**:424–40.
- 62 Jacobs L., Nawrot T.S., De Geus B., *et collab*. Subclinical responses in healthy cyclists briefly exposed to traffic-related air pollution: an intervention study. *Environmental Health* 2010;**9**:64.
- 63 Pasqua L.A., Damasceno M.V., Cruz R., *et collab*. Exercising in the urban center: Inflammatory and cardiovascular effects of prolonged exercise under air pollution. *Chemosphere* 2020;**254**:126817.
- 64 Cruz R., Koch S., Matsuda M., *et collab*. Air pollution and high-intensity interval exercise: Implications to anti-inflammatory balance, metabolome and cardiovascular responses. *Science of The Total Environment* 2021;**809**:151094.
- 65 Cruz R., Pasqua L., Silveira A., *et collab*. Traffic-related air pollution and endurance exercise: Characterizing non-targeted serum metabolomics profiling. *Environmental Pollution* 2021;**291**:118204.
- 66 Cassilhas R.C., de Sousa R.A.L., Caxa L., *et collab*. Indoor aerobic exercise reduces exposure to pollution, improves cognitive function, and enhances BDNF levels in the elderly. *Air Qual Atmos Health* 2021;**15**:35–45.
- 67 Hackney J.D., Linn W.S., Mohler J.G., *et collab*. Adaptation to short term respiratory effects of ozone in men exposed repeatedly. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol* 1977;**43**:82–5.
- 68 Gong H., McManus M.S., Linn W.S. Attenuated response to repeated daily ozone exposures in asthmatic subjects. *Arch Environ Health* 1997;**52**:34–41.
- 69 Kulle T.J., Sauder L.R., Kerr H.D., *et collab*. Duration of pulmonary function adaptation to ozone in humans. *Am Ind Hyg Assoc J* 1982;**43**:832–7.
- 70 Foxcroft W., Adams W. Effects of ozone exposure on four consecutive days on work performance and VO₂max. *J Appl Physiol* 1986;**61**:960–6.
- 71 Folinsbee L.J., Bedi J.F., Horvath S.M. Respiratory responses in humans repeatedly exposed to low concentrations of ozone. *American Review of Respiratory Disease* 1980;**121**:431–9.
- 72 Mullins J.T. Ambient air pollution and human performance: Contemporaneous and acclimatization effects of ozone exposure on athletic performance. *Health Econ* 2018;**27**:1189–200.
- 73 Cutrufello P.T., Rundell K.W., Smoliga J.M., *et collab*. Inhaled whole exhaust and its effect on exercise performance and vascular function. *Inhal Toxicol* 2011;**23**:658–67.
- 74 Blomberg A., Krishna M.T., Helleday R., *et collab*. Persistent airway inflammation but accommodated antioxidant and lung function responses after repeated daily exposure to nitrogen dioxide. *Am J Respir Crit Care Med* 1999;**159**:536–43.
- 75 Van Ryswyk K., Evans G.J., Kulka R., *et collab*. Personal exposures to traffic-related air pollution in three Canadian bus transit systems: the Urban Transportation Exposure Study. *J Expo Sci Environ Epidemiol* 2021;**31**:628–40.
- 76 Giles L.V., Carlsten C., Koehle M.S. The effect of pre-exercise diesel exhaust exposure on cycling performance and cardio-respiratory variables. *Inhal Toxicol* 2012;**24**:783–9.
- 77 Syed N., Ryu M.H., Dhillon S., *et collab*. Effects of traffic-related air pollution on exercise endurance, dyspnea and cardiorespiratory physiology in health and COPD – A randomized, placebo-controlled crossover trial. *Chest* 2021;**S0012-3692**:04207–0.
- 78 Shakya K.M., Noyes A., Kallin R., *et collab*. Evaluating the efficacy of cloth facemasks in reducing particulate matter exposure. *J Expo Sci Environ Epidemiol* 2017;**27**:352–7.
- 79 Langrish J.P., Mills N.L., Chan J.K.K., *et collab*. Beneficial cardiovascular effects of reducing exposure to particulate air pollution with a simple facemask. *Part Fibre Toxicol* 2009;**6**:8.
- 80 Jiang M., Meng X., Qi L., *et collab*. The health effects of wearing facemasks on cardiopulmonary system of healthy young adults: A double-blinded, randomized crossover trial. *Int J Hyg Environ Health* 2021;**236**:113806.

- 81 Goh D.Y.T, Mun M.W., Lee W.L.J., *et collab.* A randomised clinical trial to evaluate the safety, fit, comfort of a novel N95 mask in children. *Sci Rep* 2019;**9**:18952.
- 82 Avol E.L., Linn W.S., Wightman L.H., *et collab.* Laboratory evaluation of a disposable half-face mask for protection against ozone. *American Review of Respiratory Disease* 1982;**126**:818–21.
- 83 Shaw K.A., Zello G.A., Butcher S.J., *et collab.* The impact of face masks on performance and physiological outcomes during exercise: A systematic review and meta-analysis. *Applied Physiology, Nutrition and Metabolism* 2021;**46**:693–703.
- 84 Henriquez A.R., Snow S.J., Schladweiler M.C., *et collab.* Exacerbation of ozone-induced pulmonary and systemic effects by β 2-adrenergic and/or glucocorticoid receptor agonist/s. *Sci Rep* 2019;**9**:17925.
- 85 Gong H.J., Bedi J.F., Horvath S.M. Inhaled albuterol does not protect against ozone toxicity in nonasthmatic athletes. *Arch Environ Health* 1988;**43**:46–53.
- 86 McKenzie D., Stirling D., Fadl S., *et collab.* The effects of salbutamol on pulmonary function in cyclists exposed to ozone: a pilot study. *Canadian Journal of Sport Sciences* 1987;**12**:46–8.
- 87 Koch S., Zelembaba A., Tran R., *et collab.* Vascular effects of physical activity are not modified by short-term inhaled diesel exhaust: Results of a controlled human exposure study. *Environ Res* 2020;**183**:109270.
- 88 Koch S., Welch J.F., Tran R., *et collab.* Ventilatory responses to constant load exercise following the inhalation of a short-acting β 2-agonist in a laboratory-controlled diesel exhaust exposure study in individuals with exercise-induced bronchoconstriction. *Environ Int* 2021;**146**:106182.
- 89 Gong H., Linn W.S., Shamoo D.A., *et collab.* Effect of Inhaled Salmeterol on Sulfur Dioxide-Induced Bronchoconstriction in Asthmatic Subjects. *Chest* 1996;**110**:1229–64.
- 90 Rundell K.W., Steigerwald M.D., Fisk M.Z. Montelukast prevents vascular endothelial dysfunction from internal combustion exhaust inhalation during exercise. *Inhal Toxicol* 2010;**22**:754–9.
- 91 Gong H., Linn W.S., Terrell S.L., *et collab.* Anti-inflammatory and lung function effects of montelukast in asthmatic volunteers exposed to sulfur dioxide. *Chest* 2000;**119**:402–8.
- 92 Rundell K.W., Spiering B.A., Baumann J.M., *et collab.* Bronchoconstriction provoked by exercise in a high-particulate-matter environment is attenuated by montelukast. *Inhal Toxicol* 2005;**17**:99–105.
- 93 U.S. Food & Drug Administration. FDA requires Boxed Warning about serious mental health side effects for asthma and allergy drug montelukast (Singulair); advises restricting use for allergic rhinitis. 2020. <https://www.fda.gov/media/135840/download> (page consultée le 18 nov. 2021).
- 94 Gangwar R.S., Bevan G.H., Palanivel R., *et collab.* Oxidative stress pathways of air pollution mediated toxicity: Recent insights. *Redox Biol* 2020;**34**:101545.
- 95 Grievink L., Jansen S.M., van't Veer P., *et collab.* Acute effects of ozone on pulmonary function of cyclists receiving antioxidant supplements. *Occup Environ Med* 1998;**55**:13–7.
- 96 Grievink L., Zijlstra A.G., Ke X., *et collab.* Double-blind intervention trial on modulation of ozone effects on pulmonary function by antioxidant supplements. *Am J Epidemiol* 1999;**149**:306–14.
- 97 Samet J.M., Hatch G.E., Horstman D., *et collab.* Effect of Antioxidant Supplementation on Ozone-Induced Lung Injury in Human Subjects. *Am J Respir Crit Care Med* 2001;**164**:25.
- 98 Mudway I.S., Behndig A.F., Helleday R., *et collab.* Vitamin supplementation does not protect against symptoms in ozone-responsive subjects. *Free Radic Biol Med* 2006;**40**:1702–12.
- 99 Gomes E.C., Allgrove J.E., Florida-James G., *et collab.* Effect of vitamin supplementation on lung injury and running performance in a hot, humid, and ozone-polluted environment. *Scand J Med Sci Sports* 2011;**21**:e452-60.
- 100 Boussetta N., Abdelmalek S., Khouloud A., *et collab.* Does red orange juice supplementation has a protective effect on performance, cardiovascular parameters, muscle damage and oxidative stress markers following the Yo-Yo Intermittent Recovery Test Level-1 under polluted air? *Int J Environ Health Res* 2020;**30**:630–42.

