

Impact des paramètres environnementaux sur la performance au marathon

Nour El Helou^{1,2,3}, Muriel Tafflet^{1,4}, Geoffroy Berthelot^{1,2}, Julien Tolaini¹, Andy Marc^{1,2}, Marion Guillaume¹, Christophe Hausswirth⁵, Jean-François Toussaint^{1,2,6}

¹ IRMES (Institut de Recherche bioMédicale et d'Epidémiologie du Sport), INSEP, Paris,

² Université Paris Descartes, Sorbonne Paris Cité, Rue de l'école de médecine, Paris, France

³ Université Saint Joseph, Faculté de Pharmacie, Département de Nutrition, Beyrouth, Liban.

⁴ INSERM, U970, Paris Cardiovascular Research Center - PARCC, Paris, France

⁵ Département de Recherche, INSEP, Paris, France

⁶ CIMS, Hôtel-Dieu, AP-HP, Paris, France

Abstract

Objectif: Les objectifs de cette étude sont de décrire la distribution des performances de tous les coureurs des plus grands marathons mondiaux et de déterminer les paramètres environnementaux qui ont l'impact le plus important.

Méthodes: Nous avons analysé les résultats de six marathons européens (Paris, Londres, Berlin) et américains (Boston, Chicago, New York) de 2001 à 2010 à travers les performances de 1 791 972 participants (tous les arrivants de chaque course). Les mesures de quatre facteurs environnementaux ont été recueillies pour chacune des 60 courses: température (°C), humidité (%), point de rosée (°C), et pression atmosphérique au niveau de la mer (hPA), ainsi que les concentrations de quatre polluants atmosphériques : NO₂ – SO₂ – O₃ and PM₁₀ (µg.m⁻³).

Résultats: Les performances annuelles de chaque course ont une distribution normale avec des paramètres de distribution (moyenne et écart type) qui diffèrent selon les facteurs environnementaux. La température de l'air et la performance sont significativement corrélées à travers un modèle quadratique. Les températures optimales auxquelles sont atteintes les vitesses maximales moyennes des coureurs varient selon le niveau de performance. Lorsque la température augmente au-delà ou diminue en deça de ces optima, la vitesse de course diminue et les taux d'abandons des coureurs augmentent. L'ozone affecte également les performances, mais son effet pourrait être lié à l'augmentation de la température. Les autres paramètres environnementaux n'ont pas d'impact significatif.

Conclusions: La quantité importante de données analysées et le modèle développé dans cette étude mettent en évidence l'influence majeure de la température de l'air au-dessus de tout autre paramètre climatique sur les capacités humaine et son adaptation aux conditions climatiques.

Mots-clés: Environnement, température de l'air, pollution de l'air, sport, coureurs de longue distance.

Introduction

Comme la plupart des caractères phénotypiques, la performance sportive est multifactorielle et influencée par des facteurs génétiques et environnementaux: les facteurs exogènes contribuent à l'expression des caractères prédisposant chez les meilleurs athlètes [1, 2]. Le marathon est l'une des compétitions d'endurance les plus difficiles ; c'est une course de participation massive qui a lieu dans des conditions environnementales très variables, avec des températures qui diffèrent parfois entre le départ et l'arrivée d'une même course [3-5]. La chaleur est préjudiciable pour les coureurs pendant le marathon et est généralement référencé comme limitant pour le contrôle de la thermorégulation [3, 6]. Plus de cas d'hyperthermie (température interne $\geq 39^{\circ}\text{C}$) se produisent lors de températures ambiantes chaudes, tandis que l'hypothermie (température interne $\leq 35^{\circ}\text{C}$) se produit parfois lors de températures ambiantes froides [3].

De plus, participer à des épreuves urbaines de plein air expose les athlètes à la pollution de l'air, ce qui soulève des inquiétudes à la fois sur la performance et sur la santé [7]. Les coureurs pourraient être à risque lors des compétitions car ils sont sujets à des taux de ventilation élevés et la vitesse de l'air inhalé augmente ce qui amplifie la dose de polluants inhalés, et leur transport plus profond dans les poumons [7-9]. Les coureurs passent de la respiration nasale à la respiration par la bouche pendant l'effort, ils contournent ainsi les mécanismes de filtration nasale pour les grosses particules, et ceci pourrait augmenter les effets délétères des polluants sur la santé et sur les performances sportives [8, 10]. L'exposition à la pollution atmosphérique au cours de l'exercice pourrait nuire à la performance d'un athlète dans les épreuves d'endurance d'une durée d'au moins une heure [7, 10].

La relation entre le déclin des performances en marathon avec des températures de l'air plus élevées a été bien établie. Vihma [6] et Ely et al. [11, 12] ont montré un ralentissement progressif et quantifiable des performances de marathon lorsque le WBGT (Wet Bulb Globe Temperature) augmente, chez des hommes et femmes de différents niveaux. Ely et al. [13] ainsi que Montain et al. [14] ont également constaté que des températures plus fraîches (5-10°C) étaient associées à une meilleure capacité à maintenir une vitesse lors d'un marathon par rapport à des conditions plus chaudes, en particulier chez les coureurs les plus rapides; la météo a affecté le rythme de course et l'impact dépendait du classement final. Marr et Ely [9] ont trouvé des corrélations significatives entre l'augmentation de l'indice WBGT et des PM_{10} ,

avec un ralentissement des performances en marathon des hommes et des femmes, mais ils n'ont pas trouvé de corrélation significative avec un autre polluant.

Les études antérieures ont surtout analysé les performances des 3 premiers hommes et femmes ainsi que les 25e, 100e, et 300e places du classement à l'arrivée [11, 13-16]. Ici, nous visons l'exhaustivité et nous avons analysé le nombre total de participants afin de quantifier l'effet du climat sur l'ensemble des coureurs.

Les objectifs de cette étude étaient: 1) d'analyser tous les niveaux de performance non seulement les coureurs élites en décrivant la distribution des performances de l'ensemble des participants aux marathons par course, année et sexe, 2) pour déterminer l'impact des paramètres environnementaux: sur cette distribution des performances des hommes et des femmes (premier et dernier arrivés, quantiles de distribution), et sur le pourcentage d'abandons des coureurs. Nous avons ensuite modélisé la relation entre la vitesse de course et la température de l'air afin de déterminer les conditions environnementales optimales pour atteindre les meilleures performances de course, et afin d'aider, en fonction des paramètres environnementaux connus, à prédire la distribution et informer les coureurs sur les résultats possibles lors de courses pendant différentes températures ambiantes. Nous avons testé l'hypothèse que les distributions des performances de tous les coureurs peuvent être similaires dans toutes les courses, et peuvent être similairement affectées par la température.

Méthodes

Collecte des données

Les résultats des marathons de six villes inclus dans les «IAAF Gold Labeled Road Races» et «World Marathon Majors» ont été étudiés : Berlin, Boston, Chicago, Londres, New York et Paris. De 2001 à 2010 (les données sont peu disponibles avant 2001), les temps d'arrivée en heures: minutes: secondes, de tous les participants ayant franchi la ligne d'arrivée ont été recueillis pour chaque course. Ces données sont disponibles publiquement et accessibles sur le site Internet officiel de chaque marathon, et sur les sites Web des archives de marathon [17] et des données complémentaires en cas de besoin ont été demandées à partir des sites officiels de chaque course. Un consentement éclairé écrit n'a donc pas été nécessaire par chaque athlète. Le nombre total de performances obtenues était de 1,791,972 pour les 60

courses (10 années x 6 marathons), dont 1,791,071 performances pour lesquelles le sexe était connu. Nous avons également recueilli le nombre total de coureurs ayant pris le départ de chaque course afin de calculer le nombre et le pourcentage d'abandons par course.

Les données météorologiques correspondant au jour, heure, durée et lieu de chaque course, ont été obtenues à partir du site web « Weather Underground » [5]. Quatre facteurs climatiques ont été recueillis pour chacune des 60 courses: température de l'air (°C), humidité de l'air (%), températures du point de rosée (°C) et pression atmosphérique au niveau de la mer (hPA). La moyenne de chacun de ces paramètres a été calculée pour les 4 premières heures après le départ de chaque course. Les données de pollution de l'air correspondant au jour, heure, durée et lieu de chaque course ont également été obtenues à travers les concentrations de trois polluants atmosphériques: NO₂ – SO₂ – O₃ (µg.m⁻³) par le biais de l'Agence Environnementale de chaque état pour les marathons Américains (la « Illinois Environmental Protection Agency » pour le marathon de Chicago, le « Massachusetts Department of Environmental Protection » pour le marathon de Boston et le « New York State Department of Environmental Conservation » pour le marathon de New York), et par le biais des sites internet officiels des organismes environnementaux des trois villes européennes [18-20]. Toutes les valeurs des polluants ont été moyennées pour les 4 premières heures après le départ de chaque course.

Les mesures simultanées des polluants atmosphériques pour les dix années de course (2001-2010) n'étaient disponibles que pour 3 polluants, parce que les sites de surveillance de la pollution de l'air ne mesurent généralement qu'un sous-ensemble des polluants et peuvent ne pas avoir été actifs pour toutes les années. Par exemple, les mesures des particules PM₁₀ n'ont été recueillies que pour Paris et Berlin, car il n'y avait pas assez de mesures pour les quatre autres villes.

Analyse et sélection des données

Les performances des hommes et femmes ont été analysées séparément. Pour chaque course et chaque sexe, chaque année, nous avons testé les distributions normales et log-normale pour les performances et testé la normalité et la log-normalité journal en utilisant la statistique de *Kolmogorov-Smirnov D*. Nous avons rejeté l'hypothèse nulle (lorsque l'échantillon a une distribution normale ou log-normale) lorsque les valeurs de $p < 0,01$.

Les statistiques suivantes (niveaux de performance) ont été déterminées pour la distribution de l'ensemble des performances des coureurs de chaque course, chaque année et pour chaque sexe:

- Le premier percentile de la distribution (P1), représentant l'élite de chaque course.
- Le vainqueur
- Le dernier arrivé
- Le premier quartile de la distribution (Q1), représentant le 25e percentile des meilleurs coureurs de la course étudiée.
- La médiane
- L'intervalle interquartile (IQR), qui représente la dispersion statistique, étant égal à la différence entre le troisième et le premier quartile.

Un test de corrélation de Spearman a été effectué entre chaque niveau de performance et les paramètres environnementales (climat et pollution) afin de quantifier l'impact des conditions météorologiques et de la pollution sur les performances en marathon. Les tests de corrélation de Spearman ont également été effectués entre chaque paramètre environnemental. Le facteur année n'a pas été inclus parce que nous avons précédemment démontré que, pendant les dix dernières années, les performances marathon progressaient maintenant à un rythme plus lent [21].

Température et vitesse de course

Nous avons modélisé la relation entre la vitesse de course de chaque niveau de performance pour chaque sexe, avec la température de l'air, en utilisant un modèle polynomial quadratique du second degré, qui semble approprié pour décrire de telles corrélations physiologiques [22-24].

L'équation polynomiale du second degré a été appliquée pour déterminer la température optimale à laquelle la vitesse de course maximale est atteinte pour chaque niveau de performance pour chaque sexe, et a été ensuite utilisée pour calculer le degré de diminution

de la vitesse associée à chaque augmentation ou diminution de température au-delà de l'optimum.

De même, nous avons modélisé la relation entre la température de l'air et le pourcentage d'abandons des coureurs.

Toutes les analyses ont été effectuées à l'aide des logiciels MATLAB et SAS.

Résultats

Le nombre total de participants ayant pris le départ et le nombre total de participants ayant franchi l'arrivée des 6 marathons ont augmenté au cours des 10 années étudiées (figure 1). Les caractéristiques des marathons sont décrites dans les supplementary data (tableau S1). La course avec le plus petit nombre de coureurs était Boston 2001 avec 13381 participants ayant terminé la course et le plus grand nombre a été vu à New York 2010 avec 44763 participants ayant terminé la course.

Trois marathons ont lieu en Avril, les trois autres au cours de l'automne. Les températures de l'air ont varié de 1,7°C (Chicago 2009) à 25,2°C (Boston 2004) (tableau 1).

Distribution des performances

Pour toutes les 60 courses étudiées, la distribution des performances des hommes et des femmes étaient une bonne approximation des distributions «log-normale» et «normale» (valeurs p des statistiques Kolmogorov-Smirnov $\geq 0,01$).

La figure 2 illustre des exemples de distribution des performances des hommes pour 4 courses : deux courses à Paris (2002: $T^{\circ}= 7,6^{\circ}\text{C}$ et 2007: $T^{\circ}= 17,4^{\circ}\text{C}$) et deux à Chicago (2002: $T^{\circ}= 5,4^{\circ}\text{C}$ et 2007: $T^{\circ}= 25^{\circ}\text{C}$).

On remarque un écart stable entre les performances masculines et féminines de tous les niveaux de performances dans tous les marathons, les femmes étant en moyenne plus lentes de $10,3\% \pm 1,6\%$ (moyenne \pm écart-type) que les hommes (tableau S1); les vainqueurs chez

les femmes sont de $9,9\% \pm 1,5\%$ plus lentes que les vainqueurs masculins, la moyenne de la médiane féminine est de $9,9\% \pm 1,6\%$ plus lente que celle des hommes, et le Q1 moyen des femmes de $11,1\% \pm 1,5\%$ plus lent que le Q1 masculin.

Corrélations

Les résultats des corrélations de Spearman sont affichés dans le tableau 2, les corrélations détaillées par marathon sont disponibles dans les données supplémentaires « supplementary data » (Tableau S2).

Le paramètre environnemental ayant eu les corrélations les plus significatives avec les performances était la température de l'air: significativement corrélée avec tous les niveaux de performance des coureurs masculins et féminins.

L'humidité était le deuxième paramètre avec un impact important sur les performances, et était significativement corrélée avec le P1 des femmes et avec tous les niveaux de performance des hommes.

Le point de rosée et la pression atmosphérique ont eu une légère influence ($p < 0,1$) seulement sur le P1 des hommes et le P1 des femmes respectivement, et n'ont pas affecté les autres niveaux de performance.

En ce qui concerne les polluants atmosphériques, le NO_2 a eu la corrélation la plus significative avec la performance: significativement corrélé avec Q1, IQR et la médiane pour les deux sexes. Le dioxyde de soufre (SO_2) a été corrélée avec le P1 des hommes mais ce n'était pas significatif ($p < 0,01$) et a une légère influence ($p < 0,1$) sur le Q1 hommes. Enfin l'ozone (O_3) n'a eu qu'une faible influence ($p < 0,1$) sur le Q1 des hommes. Mais dans l'analyse marathon par marathon, l'ozone (O_3) a eu la corrélation la plus significative avec la performance parmi les polluants (Tableau S2): il était significativement corrélée avec tous les niveaux de performance (P1, Q1, IQR et médiane) pour les marathons de Berlin et Boston (sauf IQR hommes) pour les deux sexes. L'ozone a également affecté les performances à Chicago (P1 hommes, Q1 et la médiane des hommes), et à New York (Q1 femmes).

Température et vitesse de course

Lorsque la température a augmenté au-dessus de l'optimum, une baisse des performances a été observée. La figure 3 décrit la relation entre les vitesses de course des marathons et la température de l'air, à travers une courbe polynomiale quadratique du second degré pour le P1 des femmes et le Q1 des hommes de toutes les 60 courses.

Pour chaque niveau de performance, la diminution de la vitesse associée à une augmentation ou diminution de la température est présentée dans les données supplémentaires (Tableau S3).

Par exemple, la température optimale à laquelle le P1 des femmes a atteint leur vitesse maximale a été de 9,9°C, et une augmentation de 1°C par rapport à cette température optimale se traduit par une perte de vitesse de 0,03%. Les températures optimales pour lesquelles les vitesses maximales ont été atteintes chez les hommes et les femmes, varient entre 3,8°C et 9,9°C en fonction de chaque niveau de performance (tableau S3).

Des températures plus élevées ont été associées à des pourcentages d'abandons plus élevés de coureurs pendant la course (figure 4). Après avoir testé des modèles linéaires, quadratiques, exponentielles et logarithmiques, l'équation quadratique du second degré a été retenue car elle a donné le meilleur fit ($r^2 = 0,36$, $p < 0,0001$) pour modéliser le pourcentage d'abandons des coureurs associé à la température de l'air (figure 4):

$$\% \text{ withdrawal } s = -0.59 \times t^{\circ}C + 0.02 \times t^{\circ}C^2 + 5.75$$

Discussion

Notre étude est la première à notre connaissance, ayant analysé l'exhaustivité des performances de tous les coureurs de trois grands marathons européens (Berlin, Paris et Londres, qui n'ont pas été analysés précédemment) et trois marathons américains. Les études antérieures ont surtout analysé les marathons américains, dont Chicago, Boston et New York qui sont analysés dans cette étude [9, 11-15], mais elles n'avaient inclus que les performances des 3 premiers hommes et femmes ainsi que les 25ème-, 100e, et 300e places du classement final [11, 13-15]. Dans la présente étude, nous avons analysé le nombre total de participants afin de quantifier de manière exhaustive l'effet du climat sur les coureurs de tous les niveaux

de performance. Nos résultats mettent à jour et étendent les résultats antérieurs, et concluent que le principal facteur environnemental influençant la performance en marathon reste la température. La tendance de réduction de la performance lorsque la température augmente est analogue chez les hommes et les femmes, ce qui suggère qu'il n'y a pas de différences apparentes entre les sexes. De plus, l'écart moyen entre les performances des hommes et femmes est le même dans tous les marathons et à tous les niveaux de performance (tableau 1). Ceci est cohérent avec nos travaux antérieurs qui ont montré que l'écart entre les sexes dans la performance sportive est stable depuis plus de 25 ans, quelles que soient les conditions environnementales [25].

Plus la température augmente, et plus la vitesse de course diminue (Tableau S3). Ceci est appuyé par l'augmentation du pourcentage d'abandons des coureurs lorsque les courses sont disputées par un temps très chaud (figure 4), et par le shift significatif des résultats des courses de l'ensemble de la distribution des performances (figure 2). L'effet significatif de la température de l'air sur les valeurs médianes (tableau 2) suggère également que les performances de tous les coureurs sont similairement touchées par une augmentation de la température de l'air, comme le montre la figure 2, qui illustre la distribution des performances de courses à Paris et à Chicago avec différentes températures de l'air: le décalage significatif des performances vers la droite (ralentissement) concerne toutes les catégories de coureurs quel que soit leur niveau de performance, des élites aux coureurs les moins qualifiés. De plus, le pourcentage d'abandons des coureurs de Chicago en 2007 a été le plus élevé (30,74%) parmi les 60 courses étudiées (figure 1 et figure 4). Roberts [26] a rapporté que les organisateurs ont tenté d'interrompre la course au bout de 3,5h après le départ, mais la plupart des coureurs ont franchi la ligne d'arrivée bien plus tard (jusqu'à 7h après le départ), avec 66 hospitalisations (12 cas de soins intensifs souffrant de troubles d'hydratation, de syndromes de choc thermique et 1 décès). Lors du marathon de Boston de 2004 ($T^{\circ}= 22,5^{\circ}\text{C}$) plus de 300 cas d'urgence médicale ont été observés, par conséquent l'heure du départ de la course a changé de midi (12h00) pour démarrer plus tôt (10h00) dans le but de diminuer le stress thermique et le nombre d'accidents connexes [26]. Le marathon de Londres en 2007 a été couru dans un temps chaud par rapport au temps moyen de Londres ($T^{\circ}= 19,1^{\circ}\text{C}$ contre une moyenne de $11,6^{\circ}\text{C}$ pour les neuf autres années analysées dans cette étude), 73 cas d'hospitalisation ont été enregistrés dont 6 cas de déséquilibre électrolytique grave et un décès; le temps d'arrivée moyen (moyenne de tous les participants) était de 17

min plus lent que d'habitude. En revanche, en 2008 le temps était frais et pluvieux ($T^{\circ}=9,9^{\circ}\text{C}$), et le nombre de cas médicaux a été inférieur de 20% [26].

Nos résultats ont montré que le pourcentage d'abandons des coureurs lors des courses augmente significativement avec l'augmentation de la température (figure 4). La limite supérieure acceptable pour la compétition jugée par l'American College of Sports Medicine (ACSM) est un indice WBGT de 28°C , mais il peut ne pas refléter le profil de sécurité des coureurs de marathons non-acclimatés et non-élites [3, 26-28]. Roberts [26] a déclaré que le marathon devrait être interdit pour les coureurs non-élite à un WBGT de $20,5^{\circ}\text{C}$. Nos résultats suggèrent qu'il n'existe pas de seuil, mais un processus continu de part et d'autre d'un optimum: plus l'écart s'éloigne de la température optimale, moins de tolérance et plus de risque. En fait, dans des environnements chauds et humides, non seulement la performance est potentiellement compromise, mais la santé est aussi à risque [29], tous deux sont similairement affectés. Dès que le WBGT est supérieur à 13°C , le taux de d'abandons et de cas médicaux commencent à augmenter [26] comme nous observons dans notre étude à la figure 4.

Le climat chaud augmente le risque d'hyperthermie induite par l'exercice, son premier effet mesurable est la réduction de la performance physique [4, 14, 29-31] contraignant ainsi les systèmes cardiovasculaire, musculaire et le système nerveux central [32, 33]. Des travaux plus récents ont suggéré que la fatigue centrale se développe avant que la température corporelle n'augmente: les preuves affirment que les sujets réduiraient inconsciemment leur vitesse, plus tôt après le début d'un exercice effectué lorsque l'environnement est chaud, même si la température interne est encore plus faible que les niveaux associés aux méfaits de l'hyperthermie. L'exercice est donc homéostatiquement régulé par la diminution de l'intensité de l'activité (diminution de la performance de course et de la production de chaleur) afin d'éviter l'hyperthermie et ses conséquences [34, 35]. D'autre part, le climat frais est associé à une meilleure capacité à maintenir une vitesse et puissance de course par rapport à des conditions plus chaudes, mais un climat très froid a également tendance à réduire les performances [29, 36, 37].

Parmi les vainqueurs des courses étudiées, le record du monde masculin du marathon a été battu à Berlin en 2007 et 2008 (Haile Gebrselassie en 02:03:59), ainsi que le record du monde féminin du marathon, battu à Londres en 2003 (Paula Radcliffe en 02:15:25). Les vitesses des vainqueurs n'ont pas été affectées de la même manière que celles des autres

coureurs par la température de l'air et les autres paramètres environnementaux, parce que les meilleures performances peuvent fluctuer d'une année à l'autre en raison de nombreux facteurs, tels que la récompense financière, les stratégies de course, ou la compétition en général [11]. Une autre explication est que, parmi toutes les 60 courses étudiées, 89,5% des gagnants masculins étaient d'origine africaine (57,9% du Kenya, 21,1% de l'Ethiopie et 10,5% de l'Erythrée, Maroc et Afrique du Sud), ainsi que 54,5% des gagnantes féminines (27,3% du Kenya et 27,3% de l'Ethiopie- données non présentées). Les coureurs africains pourraient avoir un avantage sur les athlètes caucasiens, peut-être en raison d'une combinaison unique des principaux déterminants des performances d'endurance tels que la consommation d'oxygène maximale, l'utilisation fractionnelle du VO_{2max} et l'économie de course [38]. Ils seraient également mieux performants dans des environnements chauds car ils sont généralement plus minces que les coureurs caucasiens (gabarits et indice de masse corporelle plus petits) et donc produisent moins de chaleur et ont des taux de stockage de chaleur plus bas [38-40]. Les facteurs psychologiques peuvent également jouer un rôle, une hypothèse suggère que, indépendamment de l'existence éventuelle d'avantages physiologiques chez les coureurs d'Afrique de l'Est, la croyance que de telles différences existent peut créer un contexte et une attitude ayant des conséquences positives sur la performance [41, 42].

La génétique et l'entraînement influencent la tolérance à l'hyperthermie [4, 38, 43]. L'acclimatation qui implique des expositions répétées à l'exercice pendant la chaleur, a significativement amélioré le temps d'exercice avant la fatigue. Une thermorégulation optimale est observée chez les coureurs qui ont été acclimatés à la chaleur et qui évitent d'avoir soif avant et pendant la course. Comme les vainqueurs seraient plus acclimatés à la chaleur, leurs meilleures performances pourraient être moins influencées par la température [4, 29, 30, 44]. Eviter la sensation de soif plutôt qu'avoir une hydratation optimale empêche le déclin de la performance [45]; des études récentes ont indiqué que Haile Gebrselassie a perdu 10% de son poids corporel quand il a établi son record du monde, contredisant l'idée que la déshydratation associée à une perte de poids de 2% au cours d'un exercice nuit à la performance, [45-47].

Des études antérieures ont suggéré que l'impact des conditions météorologiques sur la vitesse de course peut dépendre du niveau de performance du coureur et de sa position d'arrivée dans le classement général, les coureurs plus rapides étant moins affectés que les plus lents

[6, 13, 14, 29]. Cela pourrait être expliqué par le fait que durant une course, les coureurs plus lents sont plus longtemps exposés aux conditions environnementales [11]. De plus, les coureurs plus lents ont tendance à courir à plus de proximité d'autres coureurs avec formation de clusters [48, 49], ce qui peut causer un stress thermique plus élevé par rapport au fait de courir solo [50]. Ces éléments ne sont toutefois pas confirmés dans cette étude après analyse des performances de l'ensemble des participants; au niveau d'une population, la température provoque son plein effet et a un impact similaire quelle que soit la capacité initiale du coureur. Les différences de condition physique (potentiel physiologique) peuvent également contribuer à des différences de performances et à des différences dans les capacités à faire face à l'augmentation du stress thermique [11, 48, 49].

Il y avait une forte corrélation entre la vitesse de course et la température de l'air (figure 3). Les vitesses moyennes maximales ont été effectuées à des températures optimales comprises entre 3,8°C et 9,9°C en fonction du niveau de performance (Tableau S3); de légères augmentations de températures ont causé des diminutions des performances de marathon d'une manière prévisible et quantifiable. D'autre part, des diminutions importantes des températures en-dessous de l'optimum réduisent aussi les performances. Ces températures optimales trouvées dans la présente étude sont comprises dans l'intervalle de WBGT idéale de 5-10°C trouvée dans des études précédentes [14]; d'autres études ont indiqué qu'un climat de 10-12°C WBGT est la norme pour des performances rapides et une baisse de performance est observée avec l'augmentation de l'indice WBGT [12, 27, 51, 52]. Les meilleurs temps d'arrivée en marathon et la plupart des records du monde de marathon ont été obtenus lors de températures ambiantes fraîches (10-15°C) et ont été effectués tôt le matin au printemps et en automne [12]. L'analyse des performances de Gebrselassie à Berlin révèle qu'ils suivent la même tendance, avec deux records du monde obtenus lors de plus faibles température (14°C en 2007 et 13°C en 2008, contre 18°C en 2009 et 22°C en 2006, quand il a également remporté ces deux courses sans battre le record du monde).

La relation entre la vitesse de course et la température de l'air définie dans notre étude (figure 3) est similaire à la relation observée entre la mortalité et la température de l'air (modèle-en-U asymétrique) en France définie par Laaidi et al [53], où les taux de mortalité augmentent lorsque les températures sont les plus basses et les plus élevées. Un «optimum thermique» se trouve entre les deux, où les taux de mortalité sont minimales [53]. La grande influence de la température sur la performance est comparable à son influence sur la mortalité, ce qui

suggère que les performances sportives et la mortalité sont thermodynamiquement régulées. Cela souligne également l'utilité des programmes de prévention, de l'évaluation des impacts sur la santé publique et de l'acclimatation avant de participer à des marathons chauds [53]. Des corrélations similaires ont également été trouvées entre la température et la performance de nage des poisson-chat juvéniles du sud [22], et entre les augmentations de la température de l'eau en été et des taux élevés de mortalité des saumons rouges adultes [23], suggérant que les adaptations physiologiques à la température, sont similaires dans différents taxons, mais varient dans des limites spécifiques aux espèces et affectent les performances.

Pollution atmosphérique et performance

Les taux de pollution mesurés dans cette étude n'ont pas eu d'impact sur la performance, à l'exception de l'ozone (tableau S2) et du NO₂ (tableau 2). Mesurer l'effet séparé d'un seul polluant n'est pas simple, car il n'est pas isolé dans l'air inhalé, mais au contraire combiné avec d'autres polluants ; ainsi l'influence observée sur la performance est probablement due à l'effet combiné de ces multiples paramètres. En outre la plupart des marathons ont lieu le dimanche matin, lorsque l'activité des transports urbains et de ses émissions associées sont faibles, et les réactions photochimiques stimulées par les rayonnements solaires n'ont pas encore produit les polluants secondaires comme l'ozone [9]. C'est l'explication la plus probable de nos résultats, ce qui confirme les études antérieures. Parmi les polluants atmosphériques analysés dans la présente étude, l'ozone et le NO₂ ont eu le plus d'effet sur la diminution des performances de marathon (Tableau S2). Il a été démontré que les concentrations d'ozone dans l'air sont linéairement croissantes avec la température [7, 8, 10]; ainsi dans notre étude, les effets de l'ozone peuvent être secondaires et étroitement liés à l'effet de la température sur la performance comme on le voit à Berlin et Chicago. Cependant les effets de l'ozone et d'autres polluants sont connus pour être préjudiciables aux performances sportives uniquement lorsque l'exposition est suffisamment élevée. De nombreuses études n'ont montré aucun effet des polluants atmosphériques sur les performances sportives [9] ; et certaines ont montré que les PM_{2.5} et l'acidité des aérosols ont été associés à des diminutions aiguës de la fonction pulmonaire, mais ces diminutions étaient peu susceptibles d'entraîner des symptômes cliniques [54]. D'autres études ont montré que l'exposition chronique à un mélange de polluants au cours de l'exercice peut entraîner une diminution des fonctions pulmonaires, ou un dysfonctionnement vasculaire, et peut

compromettre la performance [55]. Pendant les marathons étudiés dans cette étude, les concentrations des polluants atmosphériques n'ont jamais été au-delà des limites fixées par les agences environnementales nationales (US Environmental Protection Agency-EPA; AirParif; European Environmental Agency- EEA) ou au-delà des niveaux connus pour affecter la fonction pulmonaire dans les situations de laboratoire [9].

Conclusions

La température de l'air est le principal facteur influençant les vitesses de course en marathon quel que soit le niveau de performance de l'athlète. Elle a un grand impact sur la distribution des performances de l'ensemble des coureurs ainsi que sur le pourcentage d'abandons. La vitesse de course de tous les niveaux est directement liée à la température à travers un modèle quadratique. Toute augmentation ou diminution autour de la température optimale se traduit par diminution de la vitesse de course. L'ozone a également une influence sur la performance, mais son effet pourrait être principalement lié à l'effet de la température. Le modèle développé dans cette étude pourrait être utilisé pour des prédictions futures, afin d'évaluer les variations de performances prévues avec des conditions météorologiques changeantes.

Remerciements

Nous remercions le Centre National de Développement du Sport et les ministères de la Santé et des Sports. Nous tenons à remercier les équipes de l'INSEP pour leur soutien. Nous tenons à remercier Mme Karine Schaal pour sa relecture du manuscrit.

Références

1. Lippi G, Favaloro EJ, Guidi GC (2008) The genetic basis of human athletic performance. Why are psychological components so often overlooked? *J Physiol* 586(Pt 12):3017; author reply 3019-3020.
2. Macarthur DG, North KN (2005) Genes and human elite athletic performance. *Hum Genet* 116(5): 331-339.
3. Cheuvront SN, Haymes EM (2001) Thermoregulation and marathon running, biological and environmental influences. *Sports Med* 31(10): 743-762.
4. Kenefick RW, Cheuvront SN, Sawka MN (2007) Thermoregulatory function during the marathon. *Sports Med* 37(4-5): 312-315.
5. Weather Underground online website: Internet weather service. Weather data from each marathon race retrieved from www.wunderground.com/history/. Accessed 30 March 2011.
6. Vihma T (2010) Effects of weather on the performance of marathon runners. *Int J Biometeorol* 54(3): 297-306.
7. Shephard RJ (1984) Athletic performance and urban air pollution. *Can Med Assoc J* 131(2): 105-109.
8. Chimenti L, Morici G, Paterno A, Bonanno A, Vultaggio M, et al. (2009) Environmental conditions, air pollutants, and airway cells in runners: A longitudinal field study. *J Sports Sci* 27(9): 925-935.
9. Marr LC, Ely MR (2010) Effect of air pollution on marathon running performance. *Med Sci Sports Exerc* 42(3): 585-591.
10. Lippi G, Guidi GC, Maffulli N (2008) Air pollution and sports performance in Beijing. *Int J Sports Med* 29: 696-698.
11. Ely MR, Cheuvront SN, Roberts WO, Montain SJ (2007) Impact of weather on marathon-running performance. *Med Sci Sports Exerc* 39(3): 487-493.
12. Ely MR, Cheuvront SN, Montain SJ (2007) Neither cloud cover nor low solar loads are associated with fast marathon performance. *Med Sci Sports Exerc* 39(11): 2029-2035.

13. Ely MR, Martin DE, Cheuvront SN, Montain SJ (2008) Effect of ambient temperature on marathon pacing is dependent on runner ability. *Med Sci Sports Exerc* 40(9): 1675-1680.
14. Montain SJ, Ely MR, Cheuvront SN (2007) Marathon performance in thermally stressing conditions. *Sports Med* 37(4-5): 320-323.
15. Martin DE, Buoncristiani JF (1999). The effects of temperature on marathon runners' performance. *Chance* 12(4): 20-24.
16. Trapasso LM, Cooper JD (1989) Record performances at the Boston Marathon: biometeorological factors. *Int J Biometeorol* 33(4): 233-237.
17. Online worldwide athletic results database website. Marathons races results retrieved from www.athlinks.com. Accessed 30 Avril 2011.
18. AirParif website. Air pollution data for Paris retrieved (March – May 2009) from: www.airparif.com
19. Air pollution data for Berlin retrieved (June 24, 2009) from: <http://www.env-it.de/stationen/public/language.do;jsessionid=FB278996EE26B0351076A5D974C8BD04?language=en>
20. LondonAir website. Air pollution data for London retrieved (May 26, 2009) from: <http://www.londonair.org.uk/london/asp/default.asp>
21. Berthelot G, Tafflet M, El Helou N, Len S, Escolano S et al. (2010) Athlete atypicality on the edge of human achievement: Performances stagnate after the last peak, in 1988. *PLoS ONE*, 5 (1), e8800. DOI: 10.1371/journal.pone.0008800.
22. Zeng LQ, Cao ZD, Fu SJ, Peng JL, Wang YX (2009) Effect of temperature on swimming performance in juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis*). *Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol* 153(2): 125-130.
23. Eliason EJ, Clark TD, Hague MJ, Hanson LM, Gallagher ZS et al. (2011) Differences in thermal tolerance among sockeye salmon populations. *Science* 332(6025): 109-112.
24. Kirschbaum MUF, Watt MS (2011) Use of a process-based model to describe spatial variation in Pinus radiate productivity in New Zealand. *Forest Ecology and Management* 262: 1008–1019.
25. Thibault V, Guillaume M, Berthelot G, El Helou N, Schaal K, et al. (2010) Women and men in sport performance: the gender gap has not evolved since 1983. *J Sports Sci Med* 9: 214-223.
26. Roberts WO (2010) Determining a “do not start” temperature for a marathon on the basis of adverse outcomes. *Med Sci Sports Exerc* 42(2): 226-232.

27. Zhang S, Meng G, Wang Y, Li J (1992) Study of the relationships between weather conditions and the marathon race, and of meteorotropic effects on distance runners. *Int J Biometeorol* 36: 63-68.
28. Armstrong LE, Epstein Y, Greenleaf JE, Haymes EM, Hubbard RW, et al. (1996) American College of Sports Medicine position stand. Heat and cold illnesses during distance running. *Med Sci Sports Exerc* 28(12): i-x
29. Maughan RJ, Watson P, Shirreffs SM (2007) Heat and cold, what does the environment do to the marathon runner? *Sports Med* 37(4-5): 396-399.
30. Hargreaves M (2008) Physiological limits to exercise performance in the heat. *J Sci Med Sport* 11(1): 66-71.
31. Walters TJ, Ryan KL, Tate LM, Mason PA (2000) Exercise in the heat is limited by a critical internal temperature. *J Appl Physiol* 89: 799-806.
32. Coyle EF (2007) Physiological regulation of marathon performance. *Sports Med* 37(4-5): 306-311.
33. González-Alonso J (2007) Hyperthermia Impairs Brain, Heart and Muscle Function in Exercising Humans. *Sports Med* 37(4-5): 371-373.
34. Tucker R, Rauch L, Harley YX, Noakes TD (2004) Impaired exercise performance in the heat is associated with an anticipatory reduction in skeletal muscle recruitment. *Pflugers Arch* 448(4):422-430.
35. Tucker R, Marle T, Lambert EV, Noakes TD (2006) The rate of heat storage mediates an anticipatory reduction in exercise intensity during cycling at a fixed rating of perceived exertion. *J Physiol* 574(Pt 3):905-915.
36. Nimmo M (2004) Exercise in the cold. *J Sports Sci* 22: 898-915.
37. Weller AS, Millard CE, Stroud MA, Greenhaff PL, Macdonald IA (1997) Physiological responses to a cold, wet, and windy environment during prolonged intermittent walking. *Am J Physiol* 272(1 Pt 2): R226-R233.
38. Larsen HB (2003) Kenyan dominance in distance running. *Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol* 136(1): 161-170.
39. Marino FE, Lambert MI, Noakes TD (2004) Superior performance of African runners in warm humid but not in cool environmental conditions. *J Appl Physiol* 96: 124-130.
40. Marino FE, Mbambo Z, Kortekaas E, Wilson G, Lambert MI et al. (2000) Advantages of smaller body mass during distance running in warm, humid environments. *Pflügers Arch* 441(2-3): 359-367.
41. Hamilton B (2000) East African running dominance: what is behind it? *Br J Sports Med* 34(5):391-394.

42. Baker J, Horton S (2003) East African running dominance revisited: a role for stereotype threat? *Br J Sports Med* 37(6):553-555.
43. Sawka MN, Young A (2006) Physiological systems and their responses to conditions of heat and cold. In: Tipton CM, editor. *American College of Sports Medicine's Advanced exercise physiology*. Philadelphia (PA): Lippincott Williams and Wilkins. 535-563p.
44. Zouhal H, Groussard C, Vincent S, Jacob C, Abderrahman AB et al. (2009) Athletic performance and weight changes during the "Marathon of Sands" in athletes well-trained in endurance. *Int J Sports Med* 30: 516-521.
45. Goulet ED (2011) Effect of exercise-induced dehydration on time-trial exercise performance: a meta-analysis. *Br J Sports Med* 45(14):1149-1156.
46. Zouhal H, Groussard C, Minter G, Vincent S, Cretual A et al. (2011) Inverse relationship between percentage body weight change and finishing time in 643 forty-two-kilometre marathon runners. *Br J Sports Med* 45(14):1101-1105.
47. Beis LY, Wright-Whyte M, Fudge B, Noakes T, Pitsiladis YP (2012) Drinking Behaviors of Elite Male Runners During Marathon Competition. *Clin J Sport Med*. March [Epub ahead of print] doi: 10.1097/JSM.0b013e31824a55d7.
48. Alvarez-Ramirez J, Rodriguez E (2006) Scaling properties of marathon races. *Physica A: Stat Mech Appl* 365(2): 509-520.
49. Alvarez-Ramirez J, Rodriguez E, Dagduga L (2007) Time-correlations in marathon arrival sequences. *Physica A: Stat Mech Appl* 380: 447-454.
50. Dawson NJ, De Freitas CR, Mackey WJ, Young AA (1987) The stressful microclimate created by massed fun runners. *Transactions of the Menzies Foundation* 14: 41-44.
51. Galloway SDR, Maughan RJ (1997) Effects of ambient temperature on the capacity to perform prolonged cycle exercise in man. *Med Sci Sports Exerc* 29(9): 1240-2149.
52. Buoncristiani JF, Martin DE (1983) Factors affecting runners' marathon performance. *Chance* 6(4): 24-30.
53. Laaidi M, Laaidi K, Besancenot JP (2006) Temperature-related mortality in France, a comparison between regions with different climates from the perspective of global warming. *Int J Biometeorol* 51(2): 145-153.
54. Korrick SA, Neas LM, Dockery DW, Gold DR, Allen GA, et al. (1998) Effects of ozone and other pollutants on the pulmonary function of adult hickers. *Environ Health Perspect* 106: 93-99.
55. Rundell KW. Effect of air pollution on athlete health and performance. *Br J Sports Med*. 2012 [Epub ahead of print]

Figure Legends

Figure 1: Number of starters and finishers by marathon and year (missing data points for Boston, Chicago and Paris marathons).

Figure 2: Distribution of performances: example of men's performances distribution for Chicago (in 2002: $T^{\circ}\text{C}=5.4^{\circ}\text{C}$; and in 2007: $T^{\circ}\text{C}= 25^{\circ}\text{C}$); and Paris (in 2002: $T^{\circ}\text{C}=7.6^{\circ}\text{C}$; and in 2007: $T^{\circ}\text{C}=17.4^{\circ}\text{C}$).

Figure 3: Quadratic second degree polynomial fit for Women's P1 running speeds vs. air temperature, $r^2= 0.27$; $p<0.001$; $\text{max}=9.9^{\circ}\text{C}$. B) Men's Q1 running speeds vs. air temperature, $r^2= 0.24$; $p<0.001$; $\text{max}=6^{\circ}\text{C}$.

Figure 4: Relationship between air temperature and the percentage of runners' withdrawals, modeled with a quadratic fit (blue curve, $r^2=0.36$; $p<0.0001$). The green curve represents the quadratic fit without the maxima (Chicago 2007: 30.74% withdrawals at a race temperature of 25°C).

Marathon	Paramètre	N	Moyenne	Dev Std	Minimum	Maximum
Berlin Septembre Départ 9h	Temperature (°C)	10	14.9	3.2	11.3	21.3
	Dew Point (°C)	10	10.6	1.8	5.8	12.3
	Humidity (%)	10	78.0	14.5	55.0	98.5
	Atmospheric pressure (hPA)	10	1017.0	6.3	1003.0	1029.0
	NO ₂ (µg.m ⁻³)	10	26.5	4.0	20.8	33.2
	O ₃ (µg.m ⁻³)	10	41.0	17.3	21.2	81.8
	PM ₁₀ (µg.m ⁻³)	8	25.1	11.4	7.6	46.5
	SO ₂ (µg.m ⁻³)	10	5.0	3.1	1.1	10.7
Boston Avril Départ 10h	Temperature (°C)	10	11.8	5.1	8.0	25.2
	Dew Point (°C)	10	3.9	3.8	-2.1	10.2
	Humidity (%)	10	62.6	19.9	28.3	91.0
	Atmospheric pressure (hPA)	10	1013.0	12.4	981.6	1029.0
	NO ₂ (µg.m ⁻³)	10	29.3	10.3	14.6	50.5
	O ₃ (µg.m ⁻³)	10	73.5	25.7	18.5	122.7
	PM ₁₀ (µg.m ⁻³)	0
	SO ₂ (µg.m ⁻³)	10	7.0	2.9	1.6	12.1
Chicago Octobre Départ 7h30	Temperature (°C)	10	12.1	7.5	1.7	25.0
	Dew Point (°C)	10	4.9	7.6	-5.9	19.0
	Humidity (%)	10	62.8	8.1	52.3	79.2
	Atmospheric pressure (hPA)	10	1022.0	6.4	1012.0	1031.0
	NO ₂ (µg.m ⁻³)	10	27.9	13.0	9.7	52.0
	O ₃ (µg.m ⁻³)	10	57.1	15.1	35.9	84.0
	PM ₁₀ (µg.m ⁻³)	2	26.7	11.6	15.3	38.0
	SO ₂ (µg.m ⁻³)	9	6.5	3.1	2.1	12.4
London Avril Départ 9h30	Temperature (°C)	10	12.4	3.2	9.5	19.1
	Dew Point (°C)	10	6.0	2.9	0.8	10.7
	Humidity (%)	10	66.9	16.7	42.9	86.1
	Atmospheric pressure (hPA)	10	1010.0	12.5	976.4	1020.0
	NO ₂ (µg.m ⁻³)	10	44.8	14.5	22.8	72.2
	O ₃ (µg.m ⁻³)	9	51.4	17.1	35.0	92.3
	PM ₁₀ (µg.m ⁻³)	2	27.8	14.5	13.7	41.9
	SO ₂ (µg.m ⁻³)	10	4.5	2.8	0.0	8.8
New York Novembre Départ 10h	Temperature (°C)	10	12.5	4.1	7.1	18.4
	Dew Point (°C)	10	2.3	6.4	-5.6	12.8
	Humidity (%)	10	51.1	12.1	36.5	79.8
	Atmospheric pressure (hPA)	10	1020.0	7.8	1009.0	1034.0
	NO ₂ (µg.m ⁻³)	9	55.1	17.2	21.9	77.3
	O ₃ (µg.m ⁻³)	10	32.6	12.3	11.1	53.8
	PM ₁₀ (µg.m ⁻³)	10	5.0	0.0	5.0	5.0
	SO ₂ (µg.m ⁻³)	9	19.7	12.2	4.8	42.4
Paris Avril Départ 8h45	Temperature (°C)	10	9.2	3.2	4.8	17.4
	Dew Point (°C)	10	4.2	4.1	-3.6	13.4
	Humidity (%)	10	72.4	10.1	45.9	85.4
	Atmospheric pressure (hPA)	10	1019.0	6.2	1005.0	1026.0
	NO ₂ (µg.m ⁻³)	10	43.0	13.7	23.4	73.1
	O ₃ (µg.m ⁻³)	10	66.9	9.8	55.2	82.1
	PM ₁₀ (µg.m ⁻³)	10	37.9	32.6	16.6	132.7
	SO ₂ (µg.m ⁻³)	10	6.4	3.7	1.5	12.2

Tableau 1. Moyenne et valeurs des paramètres climatiques et de pollution pour les 6 marathons.

Paramètre	Genre	P1	Médiane	Q1	IQR
Température	Femmes	0.31*	0.30*	0.35**	0.15
	Hommes	0.48***	0.40***	0.44***	0.25\$
Point de rosée	Femmes	0.14	0.18	0.21	0.01
	Hommes	0.25\$	0.19	0.20	0.10
Humidité	Femmes	- 0.3*	-0.16	-0.19	-0.21
	Hommes	- 0.34**	- 0.28*	- 0.32*	-0.19
Pression Atm.	Femmes	0.22\$	0.06	0.07	0.06
	Hommes	0.13	0.04	0.06	0.06
NO ₂	Femmes	0.11	0.40**	0.43***	0.33*
	Hommes	0.25\$	0.38**	0.35**	0.27*
O ₃	Femmes	0.01	-0.15	-0.11	-0.20
	Hommes	-0.05	-0.21	- 0.24\$	-0.11
PM10	Femmes	0.08	0.15	0.25	0.03
	Hommes	0.10	0.10	0.09	0.16
SO ₂	Femmes	0.21	0.13	0.21	0.02
	Hommes	0.37**	0.20	0.25\$	0.04

Tableau 2. Résultats des corrélations de Spearman entre les niveaux de performance au marathon performance et les paramètres environnementaux : \$ = p<0.1; * = p<0.05; ** = p<0.01; *** = p<0.001. P1: premier percentile, Q1: premier quartile, IQR: Range de l'inter-quartile.