

Réflexion Sport

Scientifique & technique

EXTRAIT

Comment
affronter
l'été chaud,
humide et pollué
des JOP 2020 ?

The background of the cover is an aerial photograph of a densely populated city, likely Tokyo, given the context of the JOP 2020. The city is viewed from a high angle, showing a mix of modern skyscrapers and older, lower-rise buildings. A major highway with multiple lanes of traffic runs through the center of the image. The sky is a pale, hazy blue, suggesting a hot and humid atmosphere, which aligns with the text about a "hot, humid and polluted summer".

Comment affronter l'été chaud, humide et pollué des JOP 2020 ?



Par Franck Brocherie

Chercheur au laboratoire Sport, expertise et performance (EA 7370),
Institut national du sport, de l'expertise et de la performance (INSEP),
Paris, France.



Sébastien Racinais

Directeur du Aspetar Orthopaedic and Sports Medicine Hospital, Athlete
Health and Performance Research Centre, Doha, Qatar.

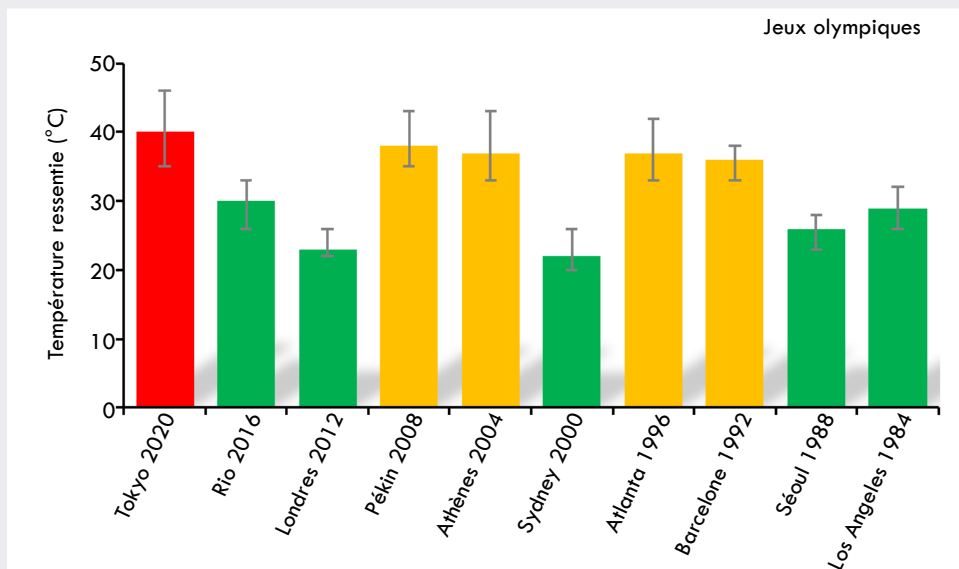


La perspective de Tokyo 2020, dans la fournaise de l'été japonais, impose de s'interroger sur l'impact de la chaleur sur la performance sportive et surtout comment bien l'appréhender dans une logique compétitive.

“... performer dans ces conditions extrêmes, et éviter les complications cliniques qui peuvent en découler, ne s'improvise pas.”

Compte tenu du réchauffement climatique (une augmentation moyenne de la température mondiale de + 1 °C au cours du siècle dernier, selon l'Organisation météorologique mondiale),

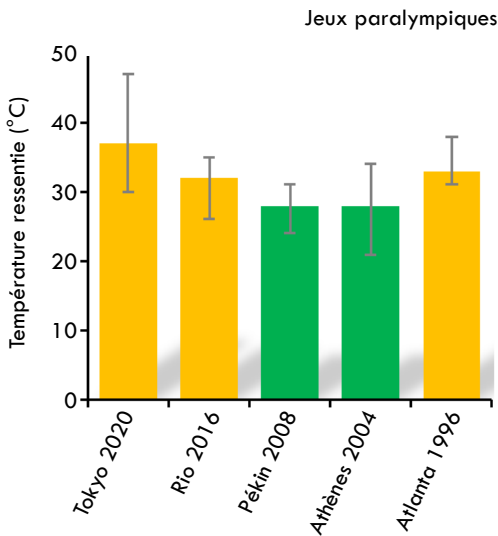
de plus en plus d'épreuves sportives se déroulent en condition chaude. Les Jeux olympiques (JO) et paralympiques (JP) – regroupés sous la dénomination JOP – d'été n'échappent pas à la règle avec la prochaine édition organisée à Tokyo en 2020, prévue pour être la plus chaude de l'histoire (Fig. 1). Le problème n'est pourtant pas nouveau puisque la question s'est déjà posée bien avant les premières considérations scientifiques (JO d'Atlanta 1996 ; Nielsen, 1996). En effet, les JO 1964 de Tokyo (déjà) avaient été judicieusement planifiés en octobre pour éviter les conséquences délétères du climat sous-tropical du Japon (classification de Köppen-Geiger). Car



même si les effets de la chaleur et de l'humidité suivent un continuum qui dépend de la balance entre production et dissipation de la chaleur, l'influence nuisible du stress thermique au cours d'un exercice prolongé est bien établie (Sawka *et al.* 2011), avec des conséquences potentiellement exacerbées chez les athlètes paralympiques dont certains (blessés médullaires) manifestent des dysfonctionnements des mécanismes thermorégulateurs (Bambhani, 2002 ; Price, 2016). Un contexte qu'il convient d'analyser précisément car performer dans ces conditions extrêmes, et éviter les complications cliniques qui peuvent en découler, ne s'improvise pas. ▶



©iStockphoto



Tolérance à la chaleur :

- alarmante
- contraignante
- tolérable

Fourchette de température :

- | année la plus élevée
- | moyenne des années
- | année la plus faible

Figure 1 – Comparaison des températures ressenties (c.-à-d. une expression de la sensation subjective de froid ou de chaleur en fonction de la température mesurée, du vent et de l'humidité relative) dans les différentes villes hôtes des Jeux olympique et paralympique (Source : Szubski, 2016, <https://www.sportifcities.com/tokyo-2020-heat-factor/>).

Un impact divergeant selon les sports

Il est important de noter que les effets de la température divergent en fonction de l'intensité et de la durée de l'exercice (Guy *et al.* 2015). D'un côté, une augmentation de la température musculaire s'avère bénéfique à la performance dans les disciplines dites explosives (sprints, sauts) [Girard *et al.* 2015 ; Racinais *et al.* 2017]. D'un autre côté, dans le cas d'un exercice prolongé, la température centrale augmente après quelques minutes seulement (Saltin *et al.* 1968), nécessitant le transfert de la chaleur des muscles vers la peau *via* une augmentation du flux sanguin (Roberts et Wenger, 1979), suivi d'une dissipation de cette chaleur dans l'environnement notamment par l'évaporation de la transpiration (Kerslake, 1955). Si la chaleur, produite à l'exercice, ne peut pas être dissipée dans l'environnement, la température centrale va continuer à monter, et celle-ci ne se stabilisera qu'en réponse à une baisse de la production de chaleur, donc de l'intensité d'exercice.

Heureusement, différentes stratégies chroniques (avant la compétition) ou aiguës (durant la compétition) permettent d'améliorer la dissipation de la chaleur et donc d'optimiser la performance des athlètes.

La nécessaire acclimatation au stress thermique (chaleur et humidité)

L'acclimatation à la chaleur est l'outil le plus important pour atténuer les effets du stress thermique, même si son efficacité est plus faible dans les environnements limitant l'évaporation de la sueur. Les adaptations à la chaleur sont généralement obtenues par le biais de cinq grandes voies d'induction (Daanen *et al.* 2018) :

- exercice autogéré ;
- exercice à allure constante ;
- hyperthermie contrôlée (maintien de la température centrale) ;
- intensité contrôlée (maintien/ajustement de la contrainte cardiovasculaire/fréquence cardiaque) ;
- échauffement passif.

L'hyperthermie contrôlée ou l'intensité contrôlée seraient à privilégier à l'utilisation d'exercices à allure constante car elles permettent une évolution de l'intensité au fur et à mesure que l'athlète s'adapte pour ►



maintenir le stimulus d'acclimatation. Par souci d'efficacité et de sécurité, il peut être utile d'enregistrer la température centrale (par l'ingestion d'un thermomètre miniaturisé ou l'utilisation d'une sonde rectale ou œsophagienne) ainsi que la fréquence cardiaque. Dans le cas de l'hyperthermie contrôlée, une température cible d'environ 38,5 °C est communément utilisée (Gibson *et al.* 2015) ; dans le cas de l'intensité contrôlée, une fréquence cardiaque cible correspondant à environ 60-65 % de la VO_{2max} est généralement retenue (Périard *et al.* 2015).

Le nombre de jours requis pour atteindre une acclimatation optimale varie, mais la plupart des adaptations apparaissent au cours de la première semaine d'exposition à la chaleur, avec 10 à 14 jours pour une acclimatation (quasi-)complète (Périard *et al.* 2015 ; Tyler *et al.* 2016). S'il n'est pas possible de s'acclimater pendant deux semaines, plusieurs études ont mis en lumière la possibilité de proposer aux athlètes des programmes courts efficaces d'environ une semaine (Garrett *et al.* 2012 ; Neal *et al.* 2016 ; Racinais *et al.* 2015). Au-delà de la durée, il est recommandé de s'entraîner dans un environnement similaire (de préférence naturel) à celui dans lequel la

compétition se déroulera. S'il n'est pas possible de s'entraîner en condition naturelle, la plupart des adaptations peuvent être obtenues au moyen d'outils simulant la chaleur tels qu'une chambre environnementale ou, à défaut, en utilisant des radiateurs. L'entraînement à la chaleur doit durer 60-90 min (Racinais *et al.* 2015). S'il n'est pas possible de se familiariser à la chaleur, recourir à un échauffement passif *via* l'utilisation d'immersion en eau chaude ou sauna pour 15-40 min avant ou après un entraînement (Zurawlew *et al.* 2016) est une option. Cela est moins spécifique qu'une acclimatation en condition naturelle mais permet, toutefois, d'obtenir la plupart des adaptations et de les maintenir durant la période d'affûtage lorsque la charge d'entraînement est réduite. Dans ce contexte, les méthodes à contraintes iso-thermiques peuvent également permettre de travailler avec la charge d'entraînement minimale requise. Dans tous les cas, les adaptations à la chaleur facilement constatables sont la diminution de la fréquence cardiaque et de la température centrale et l'augmentation de la transpiration et du confort thermique durant un exercice à une intensité donnée (Périard *et al.* 2015). Ces adaptations sont obtenues en augmentant ►

“... un échauffement passif *via* l'utilisation d'immersion en eau chaude ou sauna...”

les températures centrales et cutanées (et donc le débit sanguin cutané) ainsi que la sudation lors des séances d'acclimatation (Racinais *et al.* 2015).

“... conserver les effets d'une acclimatation sans induire de fatigue supplémentaire.”



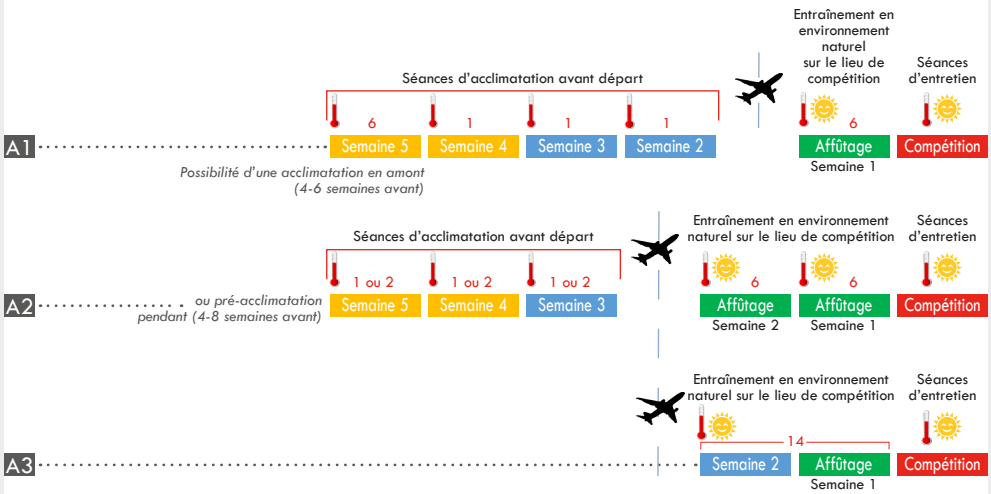
©FFR

Des bénéfices sur 7 jours a minima

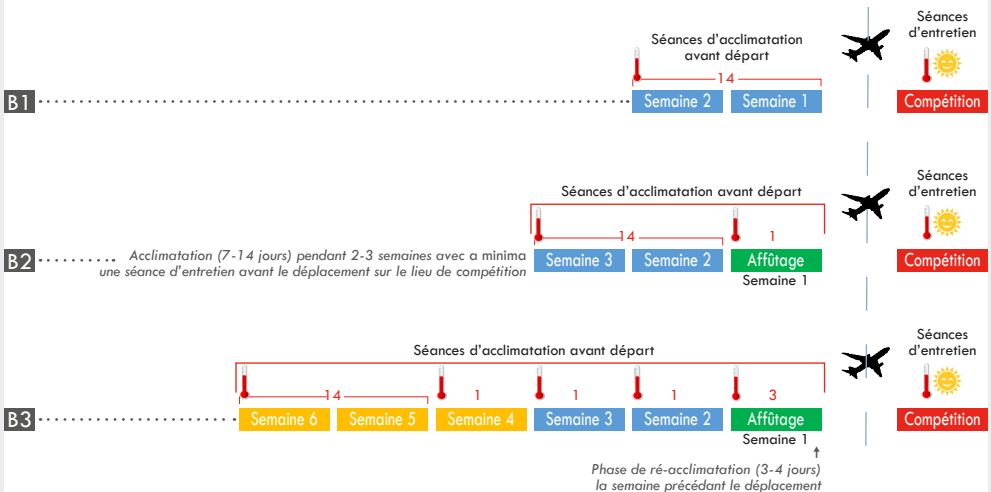
Puisque les athlètes de haut niveau (en particulier dans les disciplines d'endurance) sont partiellement acclimatés à la chaleur et n'ont pas toujours la disponibilité pour s'acclimater correctement, la conduite d'une phase d'acclimatation 4-6 semaines en amont d'une compétition peut augmenter la vitesse des adaptations

se produisant lors d'une prochaine phase de ré-acclimatation (2-4 jours) précompétitive (Daanen *et al.* 2018 ; Périard *et al.* 2015). Si les effets de l'acclimatation peuvent être maintenus pendant au moins 7 jours (Neal *et al.* 2016), ils déclinent de 25 % par jour sans exposition à la chaleur (Daanen *et al.* 2018). Dès lors, après leur phase d'affûtage (1-2 semaines), les athlètes de haut niveau pourraient perdre 17,5 à 35 % des adaptations à la chaleur (Saunders *et al.* 2019). Or, une réexposition courte et régulière (2-4 séances) à la chaleur suffirait pour ré-induire l'acclimatation à la chaleur (Weller *et al.* 2007 ; Périard *et al.* 2015). La réalisation de séances « légères » en condition chaude au plus près de la compétition (en maintenant un entraînement régulier en condition tempérée) permettrait de conserver les effets d'une acclimatation sans induire de fatigue supplémentaire (Saunders *et al.* 2019). Cependant, de possibles interférences avec l'objectif principal d'une phase d'affûtage (diminuer la charge d'entraînement) suggère que l'utilisation de l'exposition passive à la chaleur (immersion en eau chaude ou sauna), à la suite d'un entraînement en condition tempérée, pourrait être indiquée (Stanley *et al.* 2015 ; Zurawlew *et al.* 2016). La figure 2 résume différentes approches possibles en fonction du temps disponible, des ressources et du moment d'arrivée sur site pour préparer une compétition en environnement chaud. ▶

A Athlètes arrivant tôt (1-2 semaines) sur le lieu de compétition



B Athlètes arrivant tard (1-3 jours) sur le lieu de compétition



En fonction des contraintes de temps, matériel, etc., l'approche sera optimisée avec la combinaison de méthodes d'acclimation.

Figure 2 – Différentes stratégies d'acclimation à la chaleur avant une compétition majeure en fonction du temps disponible, des ressources et du moment d'arrivée (adapté de Saunders *et al.* 2019 ; Racinais *et al.* 2019).

L'incertitude paralympique

Chez les athlètes paralympiques, les connaissances sur l'acclimatation à la chaleur sont limitées et le large éventail de réactions individuelles (température cutanée, transpiration) à l'exercice en condition chaude (Goosey-Tolfrey *et al.* 2008) complique les recommandations relatives à l'acclimatation à la chaleur pour cette population. Dans une étude publiée en 2013, Castle et ses collaborateurs ont rapporté que 7 jours d'acclimatation à la chaleur (20 min d'exercice sur ergomètre à bras suivi d'exposition passive ou simulation de tir à 33 °C, 65 % d'humidité relative) permettait de constater des adaptations (augmentation du volume plasmatique et réduction de la température centrale au repos et à l'exercice, de perception d'effort et de la contrainte thermique) chez des tireurs paralympiques (un tétraplégique [C4/5], deux paraplégiques [T9/10], un athlète atteint de *spina bifida* et un athlète poliomyélite) similaires à celles observées chez des athlètes valides. À l'inverse, en 2016, Trbovich et ses collaborateurs n'ont pas observé d'adaptations bénéfiques chez des athlètes tétraplégique (C5-C7) ou paraplégique (T7-L1) suite à un programme équivalent (30 min à 50 % de la PMA suivie de 30 min d'exposition passive à 35 °C et 40 % d'humidité relative pendant 7 jours). Dans cette étude, la potentielle réduction de la contrainte thermique, sans

modification de la température centrale, est à considérer chez des individus dont l'évaluation de leur thermorégulation peut être altérée. Une approche individuelle réfléchie incluant une assistance/surveillance médicale appropriée doit être adoptée en ce qui concerne les défis environnementaux chez les athlètes paralympiques, y compris ceux pratiquant en intérieur.

Aux aurores contre la pollution de l'air ?

Les sites de compétitions des JOP de Tokyo 2020 se situent en plein cœur d'aires urbaines et industrialisées qui créent de véritables « îlots de chaleur » dus à différents facteurs (matériaux imperméables, climatisation, véhicules...) [Yoshino, 1975] qui vont exacerber les effets délétères sur la performance sportive. À ceci, s'ajoute la pollution issue des gaz (ozone, monoxyde de carbone, dioxyde de soufre, oxydes d'azote) et les (micro-) ►



particules en suspension dans l'air ambiant (Brasseur, 2009). On se rappelle les athlètes portant des masques durant les JO de Pékin en 2008 afin de se protéger des symptômes couramment rapportés dans ce type d'environnement comme la toux, l'irritation de la gorge, de la peau ou des yeux et l'inconfort thoracique. D'autres effets néfastes pour la santé peuvent aussi apparaître chez les athlètes : détérioration de la fonction pulmonaire (Strak *et al.* 2010), augmentation des niveaux de marqueurs inflammatoires et altération de la fonction immunitaire dans le système pulmonaire (Strak *et al.* 2010 ; Chimenti *et al.* 2009), infarctus du myocarde, accident vasculaire cérébral, athérosclérose, bronchite et asthme (Ostro, 2004).

Au cours de l'exercice, l'augmentation de la ventilation et de la fréquence respiratoire avec une prédominance buccale résulte en une inhalation plus importante d'éléments polluants (Londahl *et al.* 2007), avec de possibles effets sur les facteurs cognitifs (Giles et Koehle, 2014). Même si une bonne condition physique est supposée atténuer les effets délétères de la pollution (Yu *et al.* 2012), il est recommandé de consulter les indices de qualité de l'air, de pratiquer loin des embouteillages, de préférence le matin car l'élévation de la température ambiante augmente l'inflammation pulmonaire provoquée par la pollution atmosphérique et réduit la capacité d'exercice (Giles

et Koehle, 2014). Ce dernier point participera à l'acclimatation à la chaleur puisqu'il semblerait que la performance d'athlètes vivant en condition tempérée soit améliorée lorsqu'un exercice est réalisé le matin (6h45) plutôt qu'en soirée (18h45) en environnement chaud et humide (Hobson *et al.* 2009).

“ Les athlètes doivent impérativement performer en étant bien hydratés et correctement alimentés. ”

Gare à la déshydratation

En condition chaude et humide, l'hydratation est un facteur critique pour maximiser la performance à l'entraînement ou en compétition. Les athlètes doivent impérativement performer en étant bien hydratés et correctement alimentés (Racinais *et al.* 2015). La dissipation de la chaleur passe notamment par la sudation. Cependant, une transpiration excessive peut conduire à une déshydratation progressive si les pertes hydriques ne sont pas réapprovisionnées (ACSM, 2007 ; Maughan et Shirrefs, 2010). Étant donné la difficulté à s'hydrater durant les compétitions, il est ▶

primordial de débiter l'épreuve bien hydraté. L'objectif durant la compétition (ou l'entraînement) est simplement de minimiser les pertes hydriques en-dessous de 2-3 % du poids de corps. Après avoir testé les besoins individuels, ceux qui transpirent le plus pourront être supplémentés en sodium (3 g de sel dans 0,5 L de solution d'hydrate de carbone et électrolytes). Il n'est, par contre, pas utile de s'hydrater en excès (> 1,5 L/h) car l'excès de fluide ne sera pas absorbé et peut aussi s'avérer dangereux en déclenchant une hyponatrémie (c.-à-d. une diminution de la concentration sanguine en sodium). Si la surhydratation peut être un problème pour des coureurs amateurs faisant un marathon en plus de 4 h en buvant beaucoup tout le long, elle n'est généralement pas un problème chez les athlètes élités. Dans tous les cas, effectuer une pesée avant et après un entraînement ou une compétition et/ou observer la couleur de l'urine au réveil (première miction) [Fig. 3] peut aider à surveiller l'état d'hydratation des athlètes et évaluer leurs besoins.

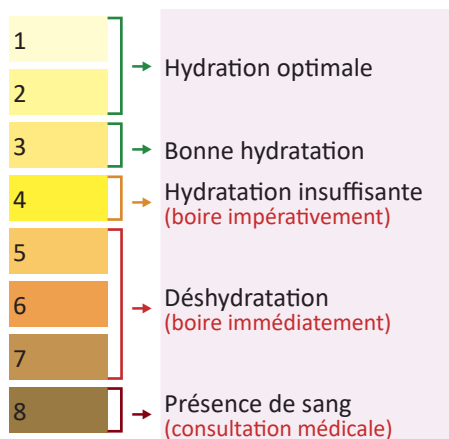


Figure 3 – Charte des couleurs de l'urine au réveil (première miction). Cet outil doit être utilisé comme un indicateur de l'état d'hydratation. La couleur des urines est susceptible d'être influencée par l'alimentation ou des traitements médicaux. (Source : Armstrong *et al.* 1994).

Contrecarrer l'augmentation de l'utilisation du glycogène musculaire

En condition chaude, l'oxydation des glucides est augmentée au cours d'un exercice (Febbraio, 2001), en raison d'une utilisation plus importante du glycogène musculaire (Jentjens *et al.* 2002). Il est donc important de veiller au réapprovisionnement des stocks de glycogène par un apport nutritionnel journalier, tel que la prise de glucides avant épreuve, et l'ingestion de boissons/gels énergétiques (30-60 g/h de glucides pour des efforts > 1 h et ▶

“... il est nécessaire de minimiser les expositions superflues à la chaleur.”

jusqu'à 90 g/h pour des épreuves > 2,5 h) pendant l'effort en condition chaude (Burke *et al.* 2005). Il semblerait que l'acclimatation à la chaleur soit également associée à une réduction de l'utilisation du glycogène musculaire, du quotient respiratoire ainsi que de l'oxydation des glucides au cours d'un exercice en condition chaude (Kirwan *et al.* 1987). Cependant, de nouvelles études sont nécessaires pour mieux comprendre les bénéfices de l'acclimatation à la chaleur sur le métabolisme des glucides et l'utilisation des réserves de glycogène (Goto *et al.* 2010) chez les sportifs bien entraînés. De même, la restriction hydrique ou nutritionnelle (Impey *et al.* 2018) reste une voie à explorer pour permettre des adaptations spécifiques potentiellement bénéfiques à la performance physique des athlètes de haut niveau.

Diverses stratégies de refroidissement

Avant le début d'une épreuve en condition chaude, il est nécessaire de minimiser les expositions superflues à la chaleur. L'échauffement doit donc être réalisé en salle ou à l'ombre et peut être associé avec des méthodes de refroidissement pour minimiser l'augmentation de la température centrale pendant l'échauffement. Ces stratégies de refroidissement incluent :



© Icon Sport

- refroidissement externe (immersion en eau froide, vêtements refroidissants, serviettes froides, ventilation) ;
- refroidissement interne (ingestion de boissons froides ou glace pillée) ;
- méthodes mixtes (combinaison ou succession de refroidissement externe et interne) [Tyler *et al.* 2016].

Elles peuvent être utilisées avant ou pendant une compétition, en fonction du sport, de la réglementation..., mais devront être testées et individualisées pour optimiser leurs effets bénéfiques. À ceci s'ajoutent le port de vêtements respirant de couleur claire si possible traités contre les ultra-violets, ►

de lunettes, de chapeaux, l'application de crème solaire (à base d'eau pour éviter d'altérer la transpiration) et d'éviter les périodes les plus chaudes (entre 10 h et 16 h) pour s'entraîner (Brocherie *et al.* 2015). Les recommandations pour réduire les risques d'hyperthermie chez les athlètes paralympiques sont, en revanche, rares (Griggs *et al.* 2015 ; Price, 2016), quand pour les blessés médullaires, l'utilisation de vêtements refroidissants et brumisateurs seraient bénéfiques (Griggs *et al.* 2015).

Anticiper votre plan chaleur



Portrait de B. Franklin par J.-S. Duplessis.

Homme de lettres et de sciences, Benjamin Franklin aurait dit :

« *En omettant de vous préparer, vous vous préparez à l'échec.* »

Pour éviter cet écueil, voici quelques points à respecter pour mettre

toutes les chances de son côté pour être performant le jour J.

ACCLIMATATION

- Se préparer au pire scénario plutôt que d'espérer le meilleur.
- Planifier son acclimatation plutôt que d'attendre la dernière minute. Éventuellement modéliser le déclin des adaptations en amont de la compétition.
- Préférer une acclimatation à long terme plutôt qu'à court/moyen terme.
- Si possible, prévoir une ré-acclimatation.
- Opter pour une acclimatation active plutôt que passive.

- S'acclimater en environnement naturel de préférence, la combinaison environnement naturel/simulé étant optimale en fonction des moyens.
- S'exposer 60-90 min/jour et choisir un exercice spécifique et en condition similaire à celle de la compétition plutôt qu'un exercice et une condition standard.
- Choisir la méthode en intensité contrôlée (ou par hyperthermie contrôlée) plutôt qu'une contrainte fixe (allure). Dans tous les cas, faire des essais en amont et individualiser en fonction.
- Toujours mesurer le poids, la fréquence cardiaque et la température centrale.
- S'assurer de l'état d'hydratation et de l'approvisionnement en électrolyte.

À L'APPROCHE DU JOUR J

- Peser le pour et le contre de l'utilisation de la climatisation (qualité du sommeil vs. risques infectieux).
- Suivre la météorologie du site de compétition.
- Porter des vêtements appropriés réduisant les radiations solaires (couleur claire) et favorisant l'évaporation et la convection.
- Appliquer une protection solaire.
- Adapter l'échauffement en fonction des conditions météorologiques, du sport pratiqué...
- Utiliser des méthodes de refroidissement adaptées à chaque athlète (individualisation).

“ S'exposer
60-90 min/jour et choisir
un exercice spécifique et en
condition similaire à celle
de la compétition... ”

Conclusion

La performance en condition chaude et humide telle que prévue pour les prochains JOP de Tokyo 2020 peut être principalement améliorée en augmentant ou en maintenant la dissipation thermique, et secondairement en réduisant la température centrale initiale. Les interventions optimales pour un athlète de haut niveau doivent être déterminées au cas par cas en tenant compte du type d'intervention, de son efficacité, des contraintes pratiques et logistiques et des questions de sécurité. ■

Bibliographie

AMERICAN COLLEGE OF SPORTS MEDICINE, SAWKAMN, BURKE LM, EICHNERER, MAUGHAN RJ, MONTAIN SJ et STACHENFELD NS, « American College of Sports Medicine position stand. Exercise and fluid replacement », *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2007, 39(2), p. 377-390, doi: 10.1249/mss.0b013e31802ca597.

ARMSTRONG LE, MARESH CM, CASTELLANI JW, BERGERON MF, KENEFICK RW, LAGASSE KE et RIEBE D, « Urinary indices of hydration status », *Int. J. Sport Nutr*, 1994, 4(3), p. 265-79.

BHAMBHANI Y, « Physiology of wheelchair racing in athletes with spinal cord injury », *Sports Med*. 2002, 32, p. 23-51, doi: 10.2165/00007256-200232010-00002.

BRASSEUR G, « Implications of climate change for air quality », *WMO Bull*, 2009, 58(1), p. 10-15.

BROCHERIE F, GIRARD O et MILLET G, « Emerging environmental and weather challenges in outdoor sports », *Climate*, 2015, 3(3), p. 492-521, doi: 10.3390/cli3030492.

BURKE LM, WOOD C, PYNE DB, TELFORD DR et SAUNDERS PU, « Effect of carbohydrate intake on half-marathon performance of well-trained runners », *Int J Sport Nutr Exerc Metab*, 2005, 15(6), p. 573-589, doi: 10.1123/ijsnem.15.6.573.

CASTLE PC, KULARATNE BP, BREWER J, MAUGER AR, AUSTEN RA, TUTTLE JA, SCULTHORPE N, MACKENZIE RW, MAXWELL NS et WEBBORN AD, « Partial heat acclimation of athletes with spinal cord lesion », *Eur J Appl Physiol*, 2013, 113, p. 109-111, doi: 10.1007/s00421-012-2417-6.

CHIMENTI L, MORICI G, PATERNO A, BONANNO A, VULTAGGIO M, BELLIA V et BONSIGNORE MR, « Environmental conditions, air pollutants, and airway cells in runners: A longitudinal field study », *J. Sports Sci*, 2009, 27, p. 925-935.

DAANEN HAM, RACINAIS S et PÉRIARD JD, « Heat acclimation decay and re-induction: a systematic review and meta-analysis », *Sports Med*, 2018, 48(2), p. 409-430, doi: 10.1007/s40279-017-0808-x.

FEBBRAIO MA, « Alterations in energy metabolism during exercise and heat stress », *Sports Med*, 2001, 31(1), p. 47-59, doi: 10.2165/00007256-200131010-00004.

GARRETT AT, CREASY R, REHRER NJ, PATTERSON MJ et COTTER JD, « Effectiveness of short-term heat acclimation for highly trained athletes », *Eur J Appl Physiol*, 2012, 112(5), p. 1827-1837, doi: 10.1007/s00421-011-2153-3.

GIBSON OR, MEEJA, TUTTLEJA, TAYLOR L, WATT PW, MAXWELL NS, « Isothermic and fixed intensity heat acclimation methods induce similar heat adaptation following short and long-term timescales », *Journal of Thermal Biology*, 2015, 49-50, p. 55-65, doi: 10.1016/j.jtherbio.2015.02.005.

GILES LV et KOEHLE MS, « The health effects of exercising in air pollution », *Sports Med*, 2014, 44, p. 223-249, doi: 10.1007/s40279-013-0108-z.

GIRARD O, BROCHERIE F et BISHOP DJ, « Sprint performance under heat stress: a review », *Scand J Med Sci Sports*, 2015, 25 (1), p. 79-89, doi: 10.1111/sms.12437.

GOOSEY-TOLFREY VL, DIAPER NJ, CROSLAND J et TOLFREY K, « Fluid intake during wheelchair exercise in the heat: Effects of localized cooling garments », *Int. J. Sports Physiol. Perf*, 2008, 3(2), p. 145-156, doi: 10.1123/ijsp.3.2.145.

GOTO M, OKAZAKI K, KAMIJO Y, IKEGAWA S, MASUKI S, MIYAGAWA K et NOSE H, « Protein and carbohydrate supplementation during 5-day aerobic training enhanced plasma volume expansion and thermoregulatory adaptation in young men », *J Appl Physiol*, 2010, 109(4), p. 1247-1255, doi: 10.1152/japophysiol.00577.2010.

GUY JH, DEAKIN GB, EDWARDS AM, MILLER CM et PYNE DB, « Adaptation to hot environmental conditions: an exploration of the performance basis, procedures and future directions to optimise opportunities for elite athletes », *Sports Med*, 2015, 45, p. 303-311, doi: 10.1007/s40279-014-0277-4.

GRIGGS KE, PRICE MJ et GOOSEY-TOLFREY VL, « Cooling athletes with a spinal cord injury: physiological responses and future directions », *Sports Med*, 2015, 45(1), p. 9-21, doi: 10.1007/s40279-014-0241-3.

HOBSON RM, CLAPPEL, WATSON P et MAUGHAN RJ, « Exercise capacity in the heat is greater in the morning than in the evening in man », *Med. Sci. Sports Exerc*, 2009, 41, p. 174-180, doi: 10.1249/MSS.0b013e3181844e63.

IMPEY SG, HEARRIS MA, HAMMOND KM, BARTLETT JD, LOUIS J, CLOSE GL et MORTON JP, « Fuel for the Work Required: A Theoretical Framework for Carbohydrate Periodization and the Glycogen Threshold Hypothesis », *Sports Med*, 2018, 48(5), p. 1031-1048, doi: 10.1007/s40279-018-0867-7.

JENTIENS RL, WAGENMAKERS A et JEUKENDRUP AE, « Heat stress increases muscle glycogen use but reduces the oxidation of ingested carbohydrates during exercise », *J Appl Physiol*, 2002, 92(4), p. 1562-1572, doi: 10.1152/japophysiol.00482.2001.

KERSLAKE DM, « Factors concerned in the regulation of sweat production in man », *J Physiol*, 1955, 127(2), p. 280-296, doi: 10.1113/jphysiol.1955.sp005257.

KIRWAN JP, COSTILL DL, KUIPERS H, BURRELL MJ, FINK WJ, KOVALESKI JE et FIELDING RA, « Substrate utilization in leg muscle of men after heat acclimation », *J Appl Physiol*, 1987, 63(1), p. 31-35.

LÖNDAHL J, MASSLING A, PAGELS J, SWIETLICKI E, VACLAVIK E et LOFT S, « Size-resolved respiratory-tract deposition of fine and ultrafine hydrophobic and hygroscopic aerosol particles during rest and exercise », *Inhal. Toxicol*, 2007, 19(2), p. 109-116, doi: 10.1080/08958370601051677.

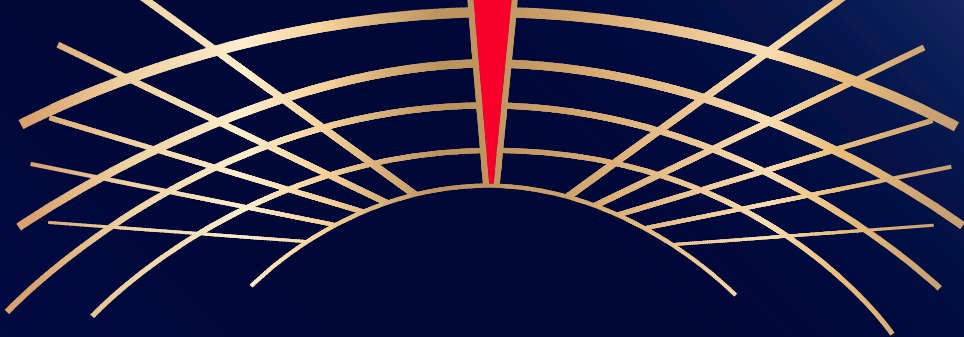
MAUGHAN RJ et SHIRREFFS SM, « Dehydration and rehydration in competitive sport », *Scand J Med Sci Sports*, 2010, 20(3), p. 40-47, doi: 10.1111/j.1600-0838.2010.01207.x.

NEAL RA, MASSEY HC, TIPTON MJ, YOUNG JS et CORBETT J, « Effect of permissive dehydration on induction and decay of heat acclimation, and temperate exercise performance », *Frontiers in Physiology*, 2016, 7, p. 564, doi: 10.3389/fphys.2016.00564.

NIELSEN B, « Olympics in Atlanta: a fight against physics », *Med Sci Sports Exerc*, 1996, 28(6), p. 665-668.

OSTRO B, « Outdoor air pollution: Assessing the environmental burden of disease at national and local levels », *Environmental Burden of Disease Series*, No. 5; World Health Organization, Geneva, Swiss, 2004.

- PÉRIARD JD, RACINAIS S et SAWKA MN, « Adaptations and mechanisms of human heat acclimation: Applications for competitive athletes and sports », *Scand J Med Sci Sports*, 2015, 25(1), p. 20-38, doi: 10.1111/sms.12408.
- PRICE MJ, « Preparation of Paralympic athletes, Environmental concerns and heat acclimation », *Frontiers in Physiol*, 2016, 6, p. 415, doi: 10.3389/fphys.2015.00415.
- RACINAIS S, PÉRIARD JD, ALONSO JM, ADAMI PE et BERMON S, « Beat the heat. IAAF world athletics championships Doha 2019 And Tokyo 2020 », IAAF, *Health and Science*, 2019.
- RACINAIS S, PÉRIARD JD, KARLSEN A et NYBO L, « Effect of heat and heat acclimatization on cycling time trial performance and pacing », *Med Sci Sports Exerc*, 2015, 47(3), p. 601-606, doi: 10.1249/MSS.0000000000000428.
- RACINAIS S, COCKING S et PÉRIARD JD, « Sports and environmental temperature: From warming-up to heating-up », *Temperature*, 2017, 4(3), p. 227-257, doi: 10.1080/23328940.2017.1356427.
- ROBERTS M et WENGER CB, « Control of skin circulation during exercise and heat stress », *Med Sci Sports*, 1979, 11(1), p. 36-41.
- SALTIN B, GAGGE AP et STOLWIJK JA, « Muscle temperature during submaximal exercise in man », *J Appl Physiol*, 1968, 25(6), p. 679-688, doi: 10.1152/jappl.1968.25.6.679.
- SAUNDERS PU, GARVICAN-LEWIS LA, CHAPMAN RF et PÉRIARD JD, « Special Environments: Altitude and Heat », *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 2019, 29(2), p. 210-219, doi: 10.1123/ijsnem.2018-0256.
- SAWKA MN, LEON LR, MONTAIN SJ et SONNA LA, « Integrated physiological mechanisms of exercise performance, adaptation, and maladaptation to heat stress », *Compr Physiol*, 2011, 1(4), p. 1883-1928, doi: 10.1002/cphy.c100082.
- STANLEY J, HALLIDAY A, D'AURIA S, BUCHHEIT M et LEICHT AS, « Effect of sauna-based heat acclimation on plasma volume and heart rate variability », *Eur J Appl Physiol*, 2015, 115(4), p. 785-794, doi: 10.1007/s00421-014-3060-1.
- STRAK M, BOOGAARD H, MELIEFSTE K, OLDENWENING M, ZUURBIER H, BRUNEKREEF B et HOEK G, « Respiratory health effects of ultra-fine and fine particle exposure in cyclists », *Occup. Environ. Med*, 2010, 67, p. 118-124, doi: 10.1136/oem.2009.046847.
- SZUBSKI C, « Sweltering Heat at the 2020 Olympics in Tokyo », *Sportify Cities Report*, 2016. Available at: <https://www.sportifycities.com/tokyo-2020-heat-factor/>.
- TYLER CJ, REEVE T, HODGES GJ et CHEUNG SS, « The effects of heat adaptation on physiology, perception and exercise performance in the heat: A meta-analysis », *Sports Med*, 2016, 46(11), p. 1699-1724, doi: 10.1007/s40279-016-0538-5.
- TRBOVICH MB, KIRATLIJB et PRICE MJ, « The effects of a heat acclimation protocol in persons with spinal cord injury », *J. Therm. Biol*, 2016, 62(A), p. 56-62, doi: 10.1016/j.jtherbio.2016.10.006.
- WELLER AS, LINNANE DM, JONKMAN AG et DAANEN HA, « Quantification of the decay and re-induction of heat acclimation in dry-heat following 12 and 26 days without exposure to heat stress », *Eur J Appl Physiol*, 2007, 102(1), p. 57-66, doi: 10.1007/s00421-007-0563-z.
- YOSHINO M, *Climate in a Small Area*, Tokyo, Tokyo University Press, 1975.
- YU YB, LIAO YW, SU KH, CHANG TM, SHYUE SK, KOU YR et LEE TS, « Prior exercise training alleviates the lung inflammation induced by subsequent exposure to environmental cigarette smoke », *Acta Physiol*, 2012, 205, p. 532-540, doi: 10.1111/j.1748-1716.2012.02433.x.
- ZURAWLEW MJ, WALSH NP, FORTES MB et POTTER C, « Post-exercise hot water immersion induces heat acclimation and improves endurance exercise performance in the heat », *Scand J Med Sci Sports*, 2016, 26(7), p. 745-754, doi: 10.1111/sms.12638.



**INSTITUT NATIONAL DU SPORT,
DE L'EXPERTISE ET DE LA PERFORMANCE**

11, avenue du tremblay - 75012 Paris- France

Tél. 01 41 74 41 00

www.insep.fr

