



**HAL**  
open science

# FONCTIONNEMENT COGNITIF EN CLIMAT TROPICAL

Nicolas Robin, Guillaume R Coudevylle

► **To cite this version:**

Nicolas Robin, Guillaume R Coudevylle. FONCTIONNEMENT COGNITIF EN CLIMAT TROPICAL. Bulletin de psychologie, 2022, 575, pp.27-41. 10.3917/bupsy.575.0027 . hal-03582859

**HAL Id: hal-03582859**

**<https://hal.science/hal-03582859>**

Submitted on 2 Mar 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Fonctionnement cognitif en climat tropical

Robin Nicolas <sup>a</sup>

Coudevylle Guillaume R. <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Université des Antilles, Faculté des sciences du sport, Pointe-à-Pitre, France.

Correspondance : Nicolas Robin, Laboratoire « Adaptation au climat tropical, exercice et santé » (UPRES EA 3596), Campus Fouillole, BP 592, 97159 Pointe-à-Pitre Cedex, France.

Courriel : robin.nicolas@hotmail.fr

Texte reçu le 16 mars 2021 et accepté le 21 juillet 2021

**Résumé :** Les réponses physiologiques et psychologiques humaines en environnement chaud sont assez bien documentées. Cependant dès que l'on s'intéresse au climat tropical (CT) on observe que la plupart des travaux portent sur l'activité physique et peu d'entre eux s'intéressent au fonctionnement cognitif. Cet article fait une revue des principales études portant sur les tâches cognitives réalisées en CT en se fondant sur les résultats obtenus en environnement chaud et peu humide. Les différents facteurs qui peuvent influencer les performances cognitives, en CT ou en condition de stress thermique, seront développés, puis un point sera fait sur les récentes techniques utilisées afin de tenter de limiter les effets délétères du stress climatique. Enfin, un regard sera porté sur les principales théories, telle que la *Global Workspace Theory*, utilisées pour interpréter les données de la littérature avant de conclure sur des recommandations et pistes de recherches.

## Cognitive Function in Tropical Climate

**Abstract:** The physiological and psychological responses to environmental heat stress have been well established. However, in the tropical climate, most studies deal with exercise and its impact on cognition is unclear. This article evokes studies using cognitive tasks realized in tropical climate. Various factors can influence cognition in hot and/or humid environments such as subjective states, humidity, dehydration or fatigue. These factors can have an impact by using part of the neural resources that are available in limited quantities. The resources, which are allocated to different tasks or activities, may be insufficient and lead to deterioration in performance in cognitive tasks performed in a tropical environment. A look is made at the main theories, such as the “Global Workspace Theory”, used to interpret the data in the literature. Likewise, theoretical insight is shed on recent applied and innovative physiological cooling techniques and psychological strategies used in an attempt to limit the deleterious effects of the thermal environment.

## INTRODUCTION

L'influence des conditions environnementales, froides ou chaudes, sur les tâches cognitives a fait l'objet de nombreux travaux de recherche (pour revues voir : Cheung, Sleivert, 2004 ; Gaoua, 2010 ; Hancock, Vasmatazidis, 1998 ; 2003 ; Pilcher, Nadler, Bulsch, 2002). Comme l'ont souligné ces derniers, l'inconsistance des résultats s'explique principalement par la différence de protocoles expérimentaux utilisés, mais aussi par l'influence de différents facteurs confondants potentiels tels que la durée ou la complexité des

tâches utilisées, la durée d'exposition à la chaleur, l'acclimatation des participants ainsi que les conditions environnementales de température ou d'hygrométrie (Hocking, Silberstein, Lau, Stogh, Roberts, 2001). Au travers de l'éclairage apporté par différentes revues de littérature et études scientifiques portant principalement sur les effets du stress thermique, nous allons aborder les principaux facteurs qui pourraient influencer les performances cognitives en climat tropical (CT). En effet, bien que touchant des millions d'élèves, sportifs et travailleurs, l'influence de ce climat sur la cognition est encore peu connue. Une meilleure compréhension de l'influence de ce climat sur les performances dans différentes tâches cognitives semble nécessaire afin de proposer, ensuite, des stratégies ou techniques pour lutter contre les effets délétères d'un CT que nous allons à présent définir.

### **Caractéristiques du climat tropical**

Selon la Classification des climats de Köppen, le CT est caractérisé par des températures relativement élevées dépassant 18 °C au cours de l'année, ainsi que des précipitations qui dépassent l'évapotranspiration au moins 270 jours par an (Salati, Lovejoy, Vose, 1983). Selon Robin, Coudeville, Hue et Sinnapah (2017), la température au cours de la journée peut fréquemment atteindre 31 °C ± 2 °C avec une humidité relative (rH) de 75 % (± 10 % rH). C'est la raison pour laquelle le CT devrait être considéré comme un facteur de stress environnemental. Bien que de nombreux bâtiments publics, administrations ou entreprises aient recours à la climatisation des locaux, dont les températures avoisinent généralement les 24 °C ± 1 °C, avec une hygrométrie d'environ 40 % ± 5 % rH, il s'avère que la majorité des étudiants, sportifs ou travailleurs demeurent en CT une majeure partie de leur temps. Ainsi, la comparaison d'un environnement climatisé avec un environnement en CT révèle, à la fois, une différence de température de près de 7 °C, mais aussi une différence d'hygrométrie de près de 40 %, facteur que nous allons aborder dans la première partie de cette revue.

L'hygrométrie ou humidité relative (rH), est définie comme la quantité de vapeur d'eau contenue dans un volume d'air donné par rapport au maximum qu'il pourrait contenir à une pression et une température données. Le degré d'hygrométrie varie de 0 à 100 %. L'air est

considéré comme sec quand l'humidité relative est inférieure à 35 %, il est moyennement humide entre 35 et 65 %, et il est humide à plus de 65 % rH comme généralement mesuré en CT. Bien que Fine, Cohen et Crist (1960) n'aient pas observé d'effet significatif de l'hygrométrie sur la performance dans des tâches simples de résolution d'anagrammes et de discrimination auditives, d'autres auteurs, comme Deligières (1994), ont noté que l'hygrométrie, affectant directement les capacités de thermorégulation de l'organisme, est un facteur susceptible d'influencer les performances cognitives. En accord avec l'idée précédente, Pepler (1958) utilisant une tâche de poursuite réalisée dans des conditions d'hygrométrie élevée (80 % rH) ou basse (20 % rH), à différentes températures, a mis en évidence une baisse significative et précoce de performance au-delà de 22 °C à 80 % d'hygrométrie alors qu'une baisse similaire de performance n'était obtenue qu'à partir de 26 °C à 20 % d'hygrométrie. Un taux élevé d'hygrométrie semble donc un facteur limitant de la performance dans des tâches cognitives (Robin et coll., 2019). De même, Vasmatazidis, Schlegel et Hancock (2002) ont observé, en utilisant un paradigme de double tâche (*time-sharing*), qu'à 34 °C les performances étaient supérieures lorsque l'hygrométrie était faible (30 % rH) que lorsqu'elle était plus élevée (70 % rH).

L'influence de l'hygrométrie, en CT spécifiquement, a cependant fait l'objet de peu d'études, car difficilement manipulable, hormis au moyen de chambres climatiques. Par exemple, Kosonen et Tan (2004) se sont intéressés à l'effet de ce facteur sur la productivité des personnels de bureaux. Les auteurs ont montré qu'une augmentation de l'hygrométrie (de 35 % à 75 % rH) entraînait une baisse significative de la productivité dans des tâches de réflexion et de dactylographie réalisées à 25 °C (celle-ci passant respectivement de 0,7 à 4,8 %) et que cette baisse était d'autant plus importante que la température augmentait. En effet, à 27 °C et 35 % rH la baisse de productivité est de 12,1 % et atteint les 20 % lorsque l'hygrométrie passe à 75 % rH. Il semble donc qu'une mesure de l'hygrométrie soit recommandée dans toute expérimentation portant sur la performance dans des tâches cognitives. Des recherches supplémentaires et approfondies sont nécessaires afin d'évaluer précisément l'influence de l'hygrométrie sur les performances dans différentes tâches cognitives.

Enfin, Delignières (1994) a évoqué l'importance de prendre en compte, en plus de l'hygrométrie et de la température, le mouvement de l'air, car l'ensemble de ces éléments peut moduler le niveau de confort thermique, notamment en CT. En effet, un environnement sera considéré comme d'autant plus inconfortable, pour une température ambiante donnée, que l'hygrométrie sera élevée et qu'il y aura peu ou une absence de mouvement de l'air, comme c'est souvent le cas dans les expérimentations faites en laboratoire ou en chambre climatique. C'est pourquoi, des auteurs comme Houghton et Yaglogou (1923) ou, plus récemment, de Dear et coll. (2013) ont proposé de synthétiser ces trois facteurs en un index nommé la température effective, qui consiste généralement en un graphique permettant de réaliser des comparaisons ou équivalences entre différentes conditions environnementales. Une version actualisée de cet index, incluant la chaleur radiante : le *Wet-Bulb Globe Temperature Index* (WBGT) est de nos jours l'indice le plus fréquemment utilisé (pour revue voir Epstein, Moran, 2006). Nous allons à présent évoquer les réponses physiologiques, l'activité cérébrale et la fatigue, qui sont à la fois affectées par le CT et peuvent, à leur tour, influencer la cognition.

### **Réponses physiologiques et cognition**

De nombreux facteurs exogènes peuvent influencer la performance humaine. Parmi ceux-ci, la chaleur et l'hygrométrie sont susceptibles d'être particulièrement invalidantes en imposant une contrainte au système cardio-vasculaire, qui doit maintenir une température corporelle cohérente. Selon Hocking et coll. (2001), des difficultés dans la dissipation d'une chaleur corporelle excessive entraînent une augmentation de la température centrale (profonde), des dysfonctionnements physiologiques et un épuisement dû à la chaleur qui, s'ils sont incontrôlés, peuvent aller jusqu'à entraîner la mort. Cependant, nous n'allons pas nous centrer sur les études portant sur des conditions climatiques extrêmes, mais plutôt sur les travaux portant sur des conditions de stress thermique et hygrométrique proches de celles mesurées en CT. Par exemple, dans l'étude de Hocking et coll. (2001), les participants étaient placés dans deux conditions thermiques : 25 °C ou 35 °C avec une hygrométrie de 65 % rH.

Aucune différence de température centrale n'a été mise en évidence entre ces deux conditions, celles-ci étant respectivement de 37,3 °C ( $\pm 0,2$ ) et de 37,4 °C ( $\pm 0,3$ ). Une augmentation de la température centrale, atteignant 38,7° ( $\pm 0,2$ ), n'a été observée que lorsque les sujets ont réalisé un exercice physique. La température centrale, au repos, ne peut donc pas prédire efficacement les baisses des performances cognitives en environnement chaud et, donc, en CT (Taylor, Watkins, Marshal, Dascombe, Foster, 2015).

D'autres auteurs comme Racinais, Gaoua et Grantham (2008) ont constaté que la vitesse de conduction nerveuse est plus importante en environnement chaud qu'en environnement neutre. De même, Bolton, Sawa et Carter (1981) ont montré une corrélation entre l'amplitude et la durée des potentiels d'action avec la température. Il est ainsi possible que ces « bénéfiques neurophysiologiques », en climat chaud, permettraient l'amélioration des performances dans des tâches de temps de réaction ou compenseraient et masqueraient des altérations qui surviendraient à d'autres niveaux (Gaoua, 2010 ; Racinais et coll., 2008).

Enfin, d'autres auteurs, comme Lan, Wargocki et Lian (2011), ont observé que les fréquences cardiaques et respiratoires étaient plus élevées à 30 °C qu'à 22 °C, probablement dues au fonctionnement homéostatique, mais n'influençaient pas les performances cognitives. En revanche, la mesure d'autres indices physiologiques comme la température cutanée, qui est plus sensible aux écarts, même faibles, de températures externes, semble intéressante. En effet, plusieurs études ont montré que les performances cognitives peuvent être influencées par des variations de température cutanée (Hancock, Vasmatzidis, 2003 ; Pilcher et coll., 2002). Par exemple, Gaoua, Racinais, Grantham et El Massioui (2011) ont montré qu'un refroidissement de la tête permettait de préserver les capacités de la mémoire de travail et ont proposé que les différences de température cutanée seraient une réponse physiologique suffisante pour entraîner des effets délétères dans les fonctions cognitives complexes. D'autres auteurs ont suggéré que les augmentations de température cutanées pourraient altérer l'état émotionnel des participants (Cabanac, 1971), or il a été montré qu'à 30 °C, la température cutanée est plus élevée qu'en climat neutre (Lan et coll., 2011), d'où l'influence potentielle de ce facteur sur les performances en CT. Comme les variations de température cutanées peuvent aussi avoir des répercussions au niveau des ondes cérébrales (Gaoua et coll.,

2011), en imposant une charge cognitive supplémentaire (Gaoua, 2012), nous allons à présent aborder les effets d'un CT sur l'activité cérébrale.

### **Activité cérébrale et cognition**

Des études ont montré que l'hyperthermie active, c'est-à-dire liée à un exercice physique (Nybo, Nielsen, 2001), et l'hyperthermie passive en environnement chaud (Dubois et coll., 1980), ont des conséquences sur l'activité électrique du cerveau entraînant des irrégularités au niveau des ondes cérébrales. Utilisant des tâches qui sollicitent une large variété de processus cognitifs incluant l'attention, la mémoire, l'apprentissage verbal, le traitement d'information et la concentration, Hocking et coll. (2001) ont notamment montré des changements au niveau de l'activité électrique du cortex occipito-pariétal en réponse au stress thermique. De plus, au moyen de la technique d'électro-encéphalo-graphie (EEG), Gaoua et coll. (2011) ont constaté, au niveau du lobe frontal, que des ressources cognitives étaient déjà utilisées en environnement chaud avant même l'engagement dans une tâche. D'autres études ont, de plus, montré que le cerveau utilise des ressources neuronales supplémentaires, par exemple dans le cortex frontal pour les tâches de mémoire de travail (Gaoua, Herrera, Périard, El Massioui, Racinais, 2018) ou dans les régions occipito-pariétales pour les tâches de vigilance (Silberstein et coll., 1990), afin de maintenir des performances cognitives équivalentes en cas de stress thermique.

D'autres auteurs comme Tanabe, Nishihara et Haneda (2007) ont suggéré qu'un flux sanguin cérébral supplémentaire est nécessaire pour maintenir un même niveau de performance cognitive dans un environnement chaud, en comparaison avec un environnement neutre. En effet, Wijayanto, Toramoto et Tochihara (2013) ont observé, à 28 °C, une augmentation de la concentration en oxyhémoglobine au niveau du cortex frontal qui correspond à la zone activée pour la réalisation de la tâche de mémoire à court terme, utilisée dans cette étude, sans aucune différence de performance en comparaison avec une condition contrôle. Récemment, Kim et coll. (2015) ont démontré qu'un apport supplémentaire en oxygène avait un effet positif sur la performance dans des tâches de mémoire à court terme et

de mémoire de travail. Selon Wijayanto, Toramoto, Maeda, Sonomi et Tochihara (2017), ce changement de concentration en oxyhémoglobine suggère le recrutement de ressources neuronales supplémentaires disponibles pour compenser les ressources utilisées par le stress thermique (Hocking et coll., 2001), ou peut mettre en évidence un effort des participants pour maintenir un niveau de performance équivalent à celui obtenu dans un environnement thermique neutre, et qui aurait comme conséquence d'engendrer une arrivée précoce de la fatigue.

### **Fatigue et cognition**

Les conditions environnementales, incluant l'hygrométrie et la température ambiante, influencent la fatigue (Hue, 2011). La fatigue apparaît être un phénomène complexe qui cause des changements d'humeur, de comportement et de traitement de l'information (Desmond, Hancock, 2001). La fatigue engendre également une baisse de l'attention, de la planification et d'adaptation à des changements de stratégie (Van der Linden, Eling, 2006). Robin, Sinnapah, Hue et Coudevylle (sous presse) ont mis en évidence que des sujets, acclimatés au climat tropical, révélaient une fatigue plus importante en CT que dans un environnement neutre. Qian et coll. (2015) ont aussi noté que le stress thermique induit par la chaleur peut potentiellement augmenter la fatigue. En effet, Lan et coll. (2011) ont observé que des individus travaillant à 30 °C signalaient moins désirer poursuivre des efforts et se sentaient plus fatigués, après avoir réalisé deux heures de tâches cognitives, que lorsqu'ils étaient dans un environnement à 22 °C. Il semble donc, d'une part, important de mesurer la fatigue, mais aussi de trouver des techniques afin de lutter contre l'apparition précoce de celle-ci en environnement chaud. Enfin, la réalisation d'une tâche complexe, de par l'attention relativement soutenue qu'elle peut nécessiter (Hockey, 1993), peut entraîner une fatigue précoce intervenant beaucoup plus rapidement que lors de la réalisation d'une tâche simple. Nous allons à présent nous intéresser à la déshydratation qui, comme la fatigue, peut augmenter en cas de stress thermique et peut être un facteur limitant de la performance cognitive en CT.

## Déshydratation et cognition

La déshydratation est un facteur important à prendre en compte ou contrôler quand on s'intéresse au fonctionnement cognitif en climat chaud (Cian et coll., 2000 ; Gaoua, 2010 ; Epstein, Keren, Moisseiev, Gasko, Yachin, 1980). En effet, plusieurs études ont montré qu'à partir de 2 % de perte de masse corporelle par déshydratation, bien qu'il n'y ait pas de baisse de performance pour des tâches cognitives simples, on observe une réduction de la précision des réponses et de la vitesse d'exécution de tâches complexes de mathématiques, de mémoire, d'attention ou de discrimination (Cian et coll., 2000 ; Epstein et coll., 1980 ; Tomporowski, Beasman, Ganio, Cureton, 2007). Au-delà de 3 % de perte du poids du corps, en plus de la sensation de fatigue qui augmente, Bradley et Higenbottan (2003) ont mis en évidence une réduction significative des fonctions exécutives et des ressources attentionnelles entraînant des baisses de performance dans des tâches d'attention soutenue, mais aussi dans des tâches plus simples de temps de réaction. De plus, comme souligné par Delignières (1994), il arrive que des individus, même s'ils disposent d'eau *ad libitum*, ne compensent pas spontanément leurs pertes hydriques ou, carrément, créent ce qu'Epstein et coll. (1980) appellent une « déshydratation volontaire ». Cependant, très récemment, Van den Heuvel, Haberley, Hoyle, Taylor et Croft (2017) ont observé que lorsque la température centrale augmente peu ou pas, comme c'est le cas en CT, des déshydratations corporelles de 3 % et 5 % n'entraînent pas de détérioration de performance dans des tâches impliquant la mémoire de travail et la perception visuelle. Des résultats contraires ont été mis en évidence dans des tâches de mémoire à court terme et de temps de réaction, dont les performances étaient altérées après une déshydratation passive de 2,8 % ou consécutive à un effort sur tapis roulant (Cian, Barraud, Malin, Raphel, 2001). Il a été montré qu'une déshydratation supérieure à 2 % de masse corporelle induit une perte de force musculaire, de puissance et d'endurance (Jimenez et coll., 2002 ; Sawka, 1992). En effet, une déshydratation engendre une diminution du volume plasmatique sanguin et il en résulte une diminution du volume d'éjection systolique et du débit cardiaque ce qui entraîne un stress cardio-vasculaire. Certains auteurs ont suggéré que la réduction de volume sanguin total entraîne une réduction du flux sanguin envoyé au cerveau pouvant causer une baisse de

certaines performances cognitives (Zuri, Cleary, Lopez, Jones, Moseley, 2004). D'autres ont proposé que l'augmentation de l'hormone du stress, le cortisol, rapportée au cours de la déshydratation, pourrait être responsable de troubles de la cognition et de la mémoire (Weiskopf et coll., 2000). Enfin, Baker, Conroy et Kenney (2007) ont montré, après un match de basket, que des joueurs déshydratés (de 1 à 4 %) avaient des baisses significatives de temps de réponse et de performance dans des tests d'attention et de vigilance. Il est donc recommandé de contrôler l'hydratation ou de prévenir toute déshydratation, supérieure à 2 %, des participants avant le début de la procédure expérimentale, puis de proposer une hydratation *ad libitum* (Baillot, Hue, 2015) et, enfin, de mesurer les pertes hydriques par une pesée des participants (pré/post) dans les protocoles mesurant la performance dans des tâches cognitives en CT. Comme indiqué par Cian et coll. (2001), les conséquences d'une déshydratation peuvent varier d'un individu à un autre, ce qui nous amène à traiter des différences individuelles dans la partie suivante.

### **Différences interindividuelles, expertise et cognition**

L'influence d'un climat chaud sur les performances cognitives peut être modulée par le degré d'expertise des participants (Brown, 1994 ; Hancock, 1982 ; 1986 ; Ramsey, 1995 ; Robin et coll., 2019). Par exemple, French et McPherson (1999) ont montré une détérioration supérieure des habiletés cognitives chez des novices en comparaison avec des experts. Selon Delignières (1994), les experts font appel à des procédures largement automatisées rendant leurs performances plus résistantes au stress thermique. En effet, selon Schneider et Schiffrin (1977) les processus automatisés conceptualisés comme étant indépendants des ressources ne seraient pas sensibles aux diminutions des ressources disponibles. Mackworth (1946) a en effet mis en évidence, dans une tâche de retranscription de message en morse, que le degré d'expertise permettait de diminuer l'ampleur et de repousser le seuil de dégradation de la performance dans cette tâche réalisée à 26 °C, 30 °C et 36 °C de température ambiante. Enfin, très récemment, Robin et coll. (2017) ont montré que les performances dans des tâches de rotation et d'imagerie mentale, réalisées en CT, étaient altérées chez des participants

« mauvais imageurs » alors qu'elles ne l'étaient pas chez des sujets « bons imageurs ». Il semblerait donc que l'expérience ou l'expertise dans une tâche et l'automatisation qui en résulte permettraient une diminution de la perturbation liée à un stress climatique.

Le genre est aussi un facteur interindividuel important à prendre en compte lorsque l'on réalise des études portant sur les effets d'un stress climatique (Gaoua, 2010 ; Karjalainen, 2007). Mehnert, Brode et Griefahn (2002) ont, par exemple, mis en évidence des différences au niveau de la thermorégulation en montrant que dans un même environnement les femmes transpiraient moins que les hommes. Nunneley (1978) a aussi observé des différences de fréquences cardiaques et de températures centrales et cutanées en fonction du sexe. Selon Gaoua (2012), ces différences doivent être prises en compte lorsque l'on s'intéresse au traitement cognitif dans différentes tâches réalisées en condition de stress thermique et notamment lors de l'interprétation des résultats de groupes mixtes. En effet, Robin et coll. (2017) ont mis en évidence, dans une tâche de rotation mentale, que les hommes obtenaient de meilleures performances que les femmes en climat neutre (24 °C et 30 % d'hygrométrie). De plus, les auteurs ont constaté que les performances des hommes s'étaient détériorées alors que celles des femmes étaient restées stables en CT. Ainsi, des auteurs comme Wyon, Andersen et Lundqvist (1972) et Lan, Lian, Liu et Liu, (2008), ont supposé que les femmes supporteraient mieux les effets négatifs du stress thermique et qu'elles seraient moins sensibles à l'hygrométrie que les hommes ce qui pourrait influencer leurs performances dans des tâches cognitives. Étant donné que certaines activités physiques peuvent nécessiter des activités cognitives plus ou moins complexes, nous allons évoquer ce point dans le paragraphe suivant.

### **Activité physique et cognition**

Selon Hue (2011), les conditions environnementales, incluant l'hygrométrie et la température ambiante, influencent la performance dans les activités physiques et sportives. En effet, l'exercice en climat chaud induit généralement une hyperthermie et il a été montré que les performances aérobies sont réduites en CT (Hue, 2011). Cette baisse de performance a été

notamment observée en course à pied (Maughan, 2010), cyclisme (Nybo, 2010) ou natation (Hue, Galy, 2012).

Lorsque l'on s'intéresse à l'influence de l'exercice physique sur la cognition, les résultats sont contrastés. Plusieurs études ont mis en évidence qu'un exercice intense ou modéré de moins d'une heure, en condition environnementale neutre, permettait une amélioration des performances cognitives dans des tâches simples (Chmura, Kryzstofiak, Ziemba, Nazar, Kaciuba-Uscilko, 1998 ; Salmela, Ndoye, 1986) et complexes (Collardeau, Brisswalter, Vercruyssen, Audiffren, Goubault, 2001). Grego et coll. (2004) ont en effet suggéré que le bénéfice d'une pratique physique, sur une activité mentale, était lié à l'élévation de l'éveil, du débit sanguin et du taux de certains neurotransmetteurs. D'autres auteurs ont utilisé un exercice physique afin de créer une hyperthermie (active) servant à tester l'effet de l'exposition à chaleur sur les fonctions cognitives (Amos, Hansen, Lau, Michalski, 2000 ; Cian et coll., 2001 ; Hocking et coll., 2001). Par exemple, il a été montré qu'un exercice sur tapis roulant réalisé à une intensité légère (40-45 % de VO<sub>2</sub>max) avait un effet bénéfique sur le traitement de l'information, la vigilance et les fonctions exécutives des participants (Parker et coll., 2013). Cependant, il est possible dans les études citées précédemment que les effets bénéfiques de l'exercice masquent/compensent les effets néfastes de la chaleur (Gaoua et coll., 2011). En effet, un exercice plus long ou intense peut avoir un effet délétère sur les performances dans des tâches cognitives (Brisswalter, Collardeau, Arcelin, 2002). Cette diminution de performance, après un exercice en condition de chaleur, a été confirmée par Bandelow et coll. (2010) ou Cian et coll. (2000), qui ont suggéré que cette baisse était causée principalement par la déshydratation des participants. Il est donc important de prévenir la survenue de la déshydratation dans des protocoles mesurant les performances cognitives pendant ou après un exercice physique. Enfin, la plupart des études citées ci-dessus ont eu recours à des participants qui n'étaient pas ou peu familiers des conditions de stress climatiques, ce qui nous amène à nous intéresser, à présent, à l'influence de l'acclimatation sur les performances cognitives.

## Acclimatation et cognition

Selon McPherson (1973), l'acclimatation correspond à une adaptation physiologique permettant une réduction du stress induit par un stress thermique. Selon Delignières (1994), l'acclimatation, à court terme résulte de la mise en place de processus compensateurs pour lutter contre la chaleur. Ainsi, une vasodilatation périphérique semble permettre les pertes de chaleur par convection et s'accompagne de tachycardie, d'hypotension et d'augmentation du débit cardiaque. Afin de favoriser l'adaptation au CT, McPherson (1973) suggère une tenue légère, une hydratation suffisante, des repas légers et une supplémentation en sel pour compenser les pertes dues à la transpiration. D'autres auteurs ont recommandé, notamment aux athlètes, de réaliser des exercices physiques à une intensité supérieure à 50 % de VO<sub>2</sub> max pendant 10 à 14 jours pour optimiser l'adaptation à la chaleur (Armstrong, Maresh, 1991). Ces derniers ont observé une diminution de la fréquence cardiaque (de près de 20 battements par minute) et une augmentation du volume sanguin plasmatique dès les six premiers jours puis une augmentation de la sudation après une dizaine de jours en CT. Wyndham, Robers, Senay et Mitchell (1976) ont également constaté une diminution des températures profondes et cutanées, et Saat, Sirisinghe, Singh et Tochiara (2005) ont mis en évidence une baisse significative de la température rectale passant de 38,8 °C à 38,3 °C après 40 minutes d'exercice aérobie en CT.

Pour ce qui touche aux tâches cognitives, Radakovic et coll. (2007) ont mis en évidence que dix jours d'acclimatation active à la chaleur, avec une heure de marche par jour, prévenait d'une détérioration de la performance dans une tâche complexe de temps de réaction réalisée en condition de chaleur. Cependant, les participants, qui ont réalisé une acclimatation passive (c'est-à-dire sans activité physique) de même durée ont obtenu des performances similaires. Dans une autre expérience, Pepler (1958) utilisant une tâche de vigilance, a observé une résistance aux dégradations de performances en condition de stress thermique, au bout de trois jours d'acclimatation passive.

Cependant, alors qu'une acclimatation de courte durée, c'est-à-dire de moins d'une dizaine de jours, semble entraîner des adaptations physiologiques et permettre de limiter les baisses

de performances en CT (Radakovic et coll., 2007), d'autres auteurs se sont intéressés à l'« *acclimatization* » que l'on peut considérer comme une adaptation à long terme portant sur plusieurs années. Au repos, Nguyen et Tokura (2002) ont mis en évidence une température rectale supérieure chez des Vietnamiens, nés en CT, en comparaison avec des Japonais provenant d'un milieu tempéré. Les auteurs ont suggéré que les températures centrales des personnes qui vivent en CT, et qui sont très régulièrement exposées à des températures ambiantes chaudes, sont plus élevées. Il a été suggéré que cette augmentation de température centrale serait « écologiquement » bénéfique, car elle permettrait de réduire la transpiration et, de ce fait, limiter la consommation d'eau. Ainsi, comme indiqué par Wijayanto et coll. (2017), les personnes nées en CT ont un meilleur fonctionnement physiologique leur permettant de mieux tolérer l'exposition à la chaleur, de mieux résister aux baisses de performances causées par le stress thermique et de fournir un effort cognitif moindre pour une performance similaire. Les auteurs ont ainsi montré que des participants natifs de milieux chauds et humides gardaient une performance de mathématiques stable, en condition chaude, alors que les performances des personnes nées en milieu tempéré se dégradaient (en comparaison avec la même tâche réalisée en climat neutre). Dans un dernier exemple, Pepler (1958) a rapporté que des jeunes européens, vivant en milieu tropical depuis plus de six mois jusqu'à deux ans, montraient une détérioration de leur performance dans un environnement chaud. Il semblerait que le fait de vivre en CT pendant deux ans ne suffit pas, c'est pourquoi Kuno (1956) a proposé qu'une « *acclimatization* » d'au moins six ans serait nécessaire pour obtenir une adaptation au CT équivalente à celle des natifs. Bien que des études supplémentaires soient nécessaires pour confirmer ces résultats, au regard notamment de l'utilisation de différents types de tâches cognitives, il semble important que soient précisés, dans les études futures, la durée d'acclimatation ainsi que le degré d'« *acclimatization* », c'est-à-dire le nombre d'années de résidence en CT des participants. Comme nous venons de le voir, l'exposition à plus ou moins long terme à un CT engendre des adaptations physiologiques et psychologiques dépendant notamment de la durée d'exposition dont nous allons aborder l'influence à court terme.

### **Durée d'exposition, durée de tâche et cognition**

Selon Hancock et Vasmatazidis (2003), la durée d'exposition à un environnement stressant peut influencer les performances cognitives. En effet, Grether (1973) a montré que les temps de réaction étaient meilleurs au cours des 18 premières minutes d'exposition à un environnement chaud. Ce bénéfice serait dû à une augmentation de la conduction nerveuse (De Jesus, Hausmanowa-Petrusewicz, Barchi, 1973) ainsi qu'à l'augmentation de la température musculaire (Saltin, Gagge, Stolwijk, 1968). De plus, Ramsey, Kwon (1992) ont montré que pour des durées d'exposition à des températures allant de 30 à 33 °C, ne dépassant pas 30 minutes, la performance dans des tâches cognitives simples s'améliorait alors qu'elle était détériorée dans des tâches complexes. Ces résultats ont été confirmés par la méta-analyse de Pilcher et coll. (2002) qui a révélé que plus la durée d'exposition « pré-tâche » à un stress thermique est longue, plus la performance est détériorée. En effet, une durée d'exposition longue entraîne une baisse moyenne de 18,15 % de la performance alors qu'une absence ou une courte durée d'exposition « pré-tâche » entraîne une légère baisse de performance de 4,02 %.

La méta-analyse de Pilcher et coll. (2002) a aussi mis en évidence que la durée des sessions pouvait aussi influencer les performances cognitives. En effet, des sessions expérimentales courtes ont des effets beaucoup plus négatifs sur la performance (baisse de 15,91 %) que des sessions longues qui entraînent une baisse moyenne de performance de seulement 5,84 %. Ces résultats sont contradictoires avec les travaux de Hockey (1993), ou de Meijman (1997) qui ont montré que maintenir de façon prolongée des ressources attentionnelles favorisait l'apparition de la fatigue, et ce, même dans un environnement climatique neutre. Cela semble d'autant plus être le cas que le participant se trouvera en contexte de stress climatique. En effet, Hancock (1986) a montré que l'attention soutenue est négativement affectée en climat chaud dès 40 minutes passées dans la tâche, alors qu'elle ne l'est pas au bout de 20 minutes. D'autres auteurs ont obtenu des résultats divergents avec une même tâche réalisée dans des conditions de températures différentes. Par exemple, Mortagy (1971), utilisant une tâche de vigilance réalisée à 23 °C, 28 °C et 32 °C de température ambiante, a montré que la durée de la tâche (20, 40 et 60 minutes) n'avait aucune incidence à

23 °C et 28 °C alors qu'à 32 °C, la dégradation de la performance était proportionnelle à la durée. Ainsi, comme suggéré par Delignières (1994), ce ne serait pas la température ambiante en soi qui affecterait la performance, mais la combinaison de température et durée d'exposition. Enfin, il est important de prendre en compte le type de tâche à réaliser dont nous allons détailler les conséquences dans le chapitre suivant.

### **Type de tâche et cognition**

Les différentes revues de littérature s'accordent sur le fait que l'influence du stress thermique sur les fonctions cognitives dépend du type et de la complexité des tâches réalisées (Cheung, Sleivert, 2004 ; Gaoua, 2010 ; Hancock, Vasmatazidis, 1998 ; 2003 ; Pilcher et coll., 2002). En effet, des études ont mis en évidence une diminution des performances dans des habiletés complexes de vigilance, de double tâche (Ramsey, Kwon, 1992) ou d'attention soutenue (Coudeville, Popa-Roch, Sinnapah, Hue, Robin, 2018) pour des températures ambiantes comprises entre 30 et 33 °C. En revanche, les tâches plus simples et qui nécessitent moins d'attention pour leur réalisation semblent être peu ou pas affectées par la chaleur (Gaoua, 2010 ; Hancock, Vasmatazidis, 2003 ; Robin et coll., 2019), voire même améliorées comme pour certaines tâches de temps de réaction (Grether, 1973).

Selon Johnson et Kobrick (1998), en condition chaude et humide (c'est-à-dire CT), la fonction cognitive la plus vulnérable est probablement le maintien de la vigilance. Les tâches de vigilance demandent aux participants de rester attentif face à un dispositif et de répondre à l'apparition de signaux apparaissant de façon aléatoire et peu fréquente (Delignières, 1994). La plupart des études basées sur ce type de tâche ont révélé une dégradation significative de la vigilance quand la température dépasse les 30 °C (Hancock, 1986 ; Mortagy, 1971). De même, selon Wijayanto et coll. (2017), l'exposition à un CT peut avoir des effets négatifs sur les performances dans des tâches de mathématiques sollicitant l'attention et la mémoire de travail, mais aussi sur tout type de tâches complexes consommatrices de ressources cognitives (Gaoua, 2010). Ainsi, nous pouvons citer l'expérience d'Epstein et coll. (1980) dans laquelle était utilisée une tâche de précision perceptivo-motrice qui consistait à tirer, en direction de

trois cibles de tailles différentes, dans trois conditions de températures ambiantes différentes (21 °C, 30 °C et 35 °C). Les auteurs ont observé, d'une part, que les participants étaient plus rapides, mais moins précis à 30 °C qu'à 21 °C et, d'autre part, que les performances de précision et de rapidité étaient moins bonnes à 35 °C que dans les autres conditions de température. Pour finir, dans le but de faciliter l'interprétation des résultats des différentes études citées dans cette revue, ainsi que la compréhension des effets du CT sur les performances cognitives, nous allons évoquer les principaux modèles et théories évoqués dans la littérature.

### **Modèles théoriques des liens entre stress thermique et cognition**

Selon Cabanac (1971), lorsqu'on s'intéresse à l'influence d'un environnement particulier, il est important de prendre en compte l'effet allesthésique selon lequel la température du milieu dans lequel on se trouve peut entraîner un sentiment de déplaisir ou de plaisir éloignant ou rapprochant la température du corps humain de son état d'homéostasie. Comme suggéré par Gaoua (2012), les variations de température cutanées en climat chaud peuvent engendrer des sentiments déplaisants qui constitueraient une charge cognitive additionnelle et qui limiteraient les ressources disponibles pour la réalisation d'une tâche cognitive.

En accord avec cette proposition, Baars (1993) a développé la *Global Workspace Theory* qui propose l'existence d'une capacité cognitive limitée et rejoint la notion de « réservoir » de ressources attentionnelles, développée par Kahneman (1973). Des processus conscients comme l'orientation dans l'espace, le maintien de la température corporelle, mais aussi les traitements cognitifs des tâches à réaliser ainsi que les stimulations externes variées sont en compétition pour accéder à cet espace de travail et se partager les ressources disponibles. Par exemple, des conditions climatiques stressantes avec des températures et hygrométries élevées, comme celles que l'on retrouve en CT, ou des changements de températures rapides peuvent être considérés comme susceptibles d'entraîner des charges cognitives supplémentaires ou un effort de contrôle (Kahneman, 1973). Dans le cas de la réalisation de tâches simples, une demande de ressources cognitives supplémentaires n'aura pas de

conséquence sur la performance. Par contre, pour des tâches complexes, étant donné que les capacités attentionnelles et l'espace de travail sont limités (Baars, 1993), une détérioration de performance sera généralement observée en raison de ressources disponibles insuffisantes (Robin et coll., 2017, 2019).

La théorie de Sanders (1983) propose que maintenir un niveau de performance dans des conditions exigeantes nécessite un effort mental. Cet effort permet une gestion active des opérations concurrentes en jouant sur la distribution des ressources énergétiques en fonction de l'évolution des demandes. Généralement, la performance reste stable et résiste aux distractions. Cependant, la gestion de distractions externes, comme dans le cas de conditions climatiques particulièrement stressantes, nécessite un traitement et donc représente un coût énergétique supplémentaire qui peut entraîner une baisse de performance dans une tâche cognitive (Hockey, 1997). Ainsi pour Delignières (1994), il y aurait une compétition entre le stress thermique et la tâche pour l'investissement d'un même *pool* de ressources, mais également l'intervention de facteurs motivationnels pouvant influencer les performances. En effet, Fine et Kobrick (1978) ont mis en évidence que des participants motivés étaient capables de réaliser, pendant deux heures, une tâche de vigilance sans dégradation de leur performance en investissant plus d'effort dans la tâche. De plus, une récente revue de littérature de Coudevylle et coll. (2021) a suggéré que la motivation serait un des facteurs clés de la performance, pour des activités physiques de longues durées, réalisées en CT.

Enfin, Hancock et Warn (1989) ont proposé le modèle d'adaptabilité maximale dans lequel les stressseurs sont placés sur un continuum allant des hypostresseurs (par exemple, l'ennui) aux hyperstressseurs (par exemple, hyperthermie). Au milieu de ces deux extrêmes, on retrouve la « zone normative » où le niveau de performance est quasiment optimal, car les ajustements cérébraux liés aux demandes de la tâche cognitive sont facilement mis en place (Hancock, Vasmatazidis, 2003). Dans cette zone, une adaptation à de faibles niveaux de stress est facilement réalisée, ne dérange pas le fonctionnement cérébral et n'entraîne pas de changement au niveau du comportement ou des performances cognitives (Hancock, Warn, 1989). Selon Hancock et Vasmatazidis (2003), dès que les températures centrales, cutanées, ambiantes, le temps d'exposition dans un environnement stressant ou la complexité de la

tâche augmentent, le niveau d'éveil et les ressources cognitives augmentent efficacement pour que la performance cognitive soit maintenue ou améliorée grâce à un état optimal d'éveil (Liu et coll., 2013). Avec ces changements, il y a une zone d'adaptabilité maximale dans laquelle la performance n'est pas affectée (Hancock, Warm, 1989). Cependant, l'élévation du stress fait aller au-delà de cette zone et épuise les ressources neurales, ce qui entraîne un déclin progressif des performances cognitives (Hancock, Vasmatazidis, 2003). Selon ces derniers, l'intérêt de ce modèle réside dans le fait qu'il dispose, à la fois, de zones d'adaptabilité physiologiques et psychologiques. La zone d'adaptabilité physiologique débute quand les réponses physiologiques vont au-delà de l'homéostasie avec les risques de malaises, voire de mort, causés par la chaleur. La zone d'adaptabilité psychologique, quant à elle, est plus vulnérable et débute avant les changements physiologiques. Face à un environnement stressant, une personne peut efficacement allouer plus de ressources attentionnelles à la tâche au moyen de stratégies psychologiques, afin de maintenir une performance donnée (Chase et coll., 2003 ; Hancock, Warm, 1989). Pour ces auteurs, face à un niveau de stress très élevé, les ressources neuronales disponibles seront moindres et entraîneront une diminution progressive des performances cognitives. Il semble donc nécessaire d'avoir recours ou de développer des techniques ou stratégies afin de lutter contre les effets délétères du CT (Coudeville, Sinnaph, Robin, Collado, Hue, 2019).

### **Techniques pour faire face au stress thermique et cognition**

Afin de lutter contre les effets négatifs de la chaleur sur les performances cognitives, plusieurs techniques ont été testées avec des résultats contrastés. Par exemple, Simmons, Mundel et Jones (2008) ont utilisé une cagoule réfrigérée afin de refroidir la température de la tête, mais, à défaut d'une amélioration de la performance, ils ont obtenu une amélioration du confort thermique. D'autres auteurs ont testé des bandes de froid placées sur le front, et ont montré qu'un refroidissement de la tête avait des effets bénéfiques sur la mémoire à court terme, dans une tâche impliquant le cortex frontal, dans un environnement très chaud (50 °C et 50 % rH) (Gaoua et coll., 2011). Plus récemment, Ando et coll. (2015), ont eu recours à une

technique de refroidissement du cou, au moyen d'une serviette humide et d'un ventilateur, au cours d'un exercice sur cycloergomètre réalisé à 35 °C et 70 % rH. Cependant, les auteurs n'ont pas observé d'amélioration de la performance dans des tâches cognitives sollicitant la mémoire de travail et les fonctions exécutives. Ces auteurs ont conclu que les changements physiologiques et psychologiques induits par un bref refroidissement du cou n'étaient pas suffisants pour atténuer les effets délétères d'un CT. En revanche, Schiavon, Yang, Donner, Chang et Nazaroff (2017) ont mis en évidence qu'avec un système de ventilation autocontrôlé, des personnes acclimatées au CT pouvaient limiter leurs baisses de performances dans des tâches cognitives variées réalisées à 29 °C et 60 % rH.

Enfin, d'autres auteurs ont suggéré le recours à des techniques psychologiques afin d'augmenter les performances physiques et cognitives en condition de stress thermique (pour revue voir Coudeville et coll., 2019). Par exemple, Barwood, Thelwell et Tipton (2008) ont fait l'hypothèse qu'un entraînement psychologique incluant des stratégies automotivacionnelles, de fixation des buts, d'imagerie mentale et de régulation de l'éveil pouvait compléter la pratique physique et améliorer l'exécution motrice et la performance dans un environnement chaud (30 °C et 40 % rH). Une amélioration de la distance parcourue, en 90 minutes, de près de 8 % (soit 1,15 km) a été observée dans le groupe expérimental ayant eu recours à ces stratégies psychologiques alors que la performance du groupe sans préparation psychologique est restée stable. Enfin, très récemment Wallace et coll. (2017) ont testé l'efficacité de deux semaines d'entraînement à une technique de stratégie automotivacionnelle (adaptée à la tolérance à la chaleur), sur les capacités d'endurance et sur les fonctions cognitives (fonctions exécutives, temps de réaction et mémoire de travail) en condition chaude (35 °C ; 50 % rH). Les auteurs ont montré qu'une stratégie automotivacionnelle permettait de modifier le contrôle psychophysiologique lors d'un exercice physique et jouait un rôle dans l'amélioration des capacités d'endurance et des fonctions exécutives en condition de stress thermique. Enfin, Coudeville et collaborateurs (2019) ont récemment suggéré l'utilisation de techniques de préparation mentale (imagerie, pleine conscience) pour gérer le stress thermique ou pour créer une sensation de froid (hypnose, autosuggestion). Au regard de la littérature, nous pouvons émettre l'hypothèse

qu'une combinaison de stratégies psychologiques et de techniques physiques de refroidissement individualisées pourrait permettre de lutter encore plus efficacement contre les effets négatifs d'un environnement stressant comme le CT sur la cognition ou l'activité de travail que nous allons évoquer dans un dernier paragraphe.

### **Activité de travail en condition chaude**

Peu d'études ont spécifiquement mesuré l'activité de travail, au niveau cognitif, en situation écologique et, plus particulièrement, dans des environnements chauds et humides. Lan et coll. (2011) ont mis en évidence une diminution de l'envie de poursuivre une activité ainsi qu'une baisse des performances chez des personnes réalisant des activités que l'on retrouve au travail (comme, par exemple, calcul, grammaire, addition, temps de réaction) en condition chaude (30 °C) en comparaison avec une condition neutre (22 °C). Par contre, les auteurs ont également observé une absence de détérioration de la performance pour des tâches simples de lecture et d'écriture notamment. De même, dans une étude réalisée avec des opérateurs en télécommunication, Mackworth (1946) a montré que dans une tâche de retranscription de message (en morse), des participants « compétents » ou « très bons » faisaient plus d'erreurs à 31 °C qu'à 26 °C, alors que la performance de « ceux extrêmement habiles » n'était pas affectée, indiquant que l'automatisation des tâches permettrait de résister aux effets négatifs d'un stress thermique. Des travaux de recherche supplémentaires semblent donc nécessaires afin de mieux appréhender les effets du CT sur les activités de travail réalisées en condition écologique et pour, notamment, apporter des recommandations utiles aux usagers. Par exemple, dans des bureaux de Singapour (situés en condition de CT), Schiavon et coll. (2017) ont montré que le fait de bénéficier de ventilateurs individuels (en plus d'un système de climatisation central dont la température était augmentée d'un degré) pouvait compenser les effets négatifs, au niveau des performances cognitives, mais également au niveau du confort thermique, d'un environnement chaud et humide. Cette stratégie, en plus de permettre une réduction de la consommation d'énergie, entre dans une logique écoresponsable sans nuire à la qualité du travail et au bien-être des travailleurs.

## CONCLUSION

Peu de travaux ont porté spécifiquement sur l'influence du CT sur les performances cognitives. Les modifications physiologiques comme les fréquences cardiaques et respiratoires, ou la température centrale étant modérées (Hocking et coll., 2001), et l'influence de la déshydratation controversée (van den Heuvel et coll., 2017), il est nécessaire de poursuivre les recherches en étudiant, par exemple, les conséquences du haut pourcentage d'hygrométrie sur l'activité cérébrale au repos, puis lors de la réalisation de différentes tâches cognitives. Il nous paraît tout aussi important de mesurer l'influence d'un changement soudain de température et d'hygrométrie qui est fréquemment observé lors du passage d'un lieu climatisé (frais et sec) à un autre en climat tropical (chaud et humide), ou inversement, ainsi que le temps d'adaptation face à ce changement d'environnement. Il est aussi recommandé de préciser la durée d'acclimatation (en nombre de jours) ainsi que l'éventuel degré d'*acclimatization* des participants c'est-à-dire depuis combien d'années ils vivent en CT, dans les méthodes des études expérimentales mesurant les performances dans des tâches cognitives réalisées en CT. De plus, l'influence d'une activité physique, avant ou pendant la réalisation de différentes tâches cognitives, en climat tropical, est encore peu connue et devrait être approfondie, étant donné les implications que cela pourrait avoir sur, notamment, l'apprentissage et l'organisation du temps scolaire dans les établissements scolaires. Enfin, des études supplémentaires sont nécessaires afin de trouver la ou les combinaisons de stratégies psychologiques et de techniques physiques de refroidissement mises en place avant ou pendant la réalisation de tâches cognitives, afin de lutter contre le stress thermique et hygrométrique causé par le TC. Les résultats de ces études permettraient notamment aux élèves, étudiants, travailleurs et sportifs d'utiliser des stratégies permettant lutter contre l'apparition précoce de la fatigue et, ainsi, maintenir un niveau de performance, dans des tâches cognitives, proche de celui obtenu en climat neutre.

## REFERENCES

Ando (Soichi), Komiyama (Takaaki), Sudo (Mizuki), Kiyonaga (Akira), Tanaka (Hiroaki), Higaki (Yasuki).– The effects of temporal neck cooling on cognitive function during strenuous exercise in a hot environment: A pilot study, *BMC Research Notes*, 8, 2015, p. 202-210.

Amos (Denys), Hansen (Ross), Lau (Wai-Man), Michalski (Jarek).– Physiological and cognitive performance of soldiers conducting routine patrol and reconnaissance in the tropics, *Military Medicine*, 165, 2000, p. 961-966.

Armstrong (Lawrence), Maresh (Carl).– The induction and decay of heat acclimatization in trained athletes, *Sports Medicine*, 12, 1991, p. 302-312.

Baars (Bernard).– How does a serial, integrated and very limited stream of consciousness emerge from a nervous system that is mostly unconscious, distributed, parallel and of enormous capacity?, *Ciba Found Symposium*, 174, 1993, p. 282-290.

Baillet (Michelle), Hue (Olivier).– Hydration and thermoregulation during a half-ironman performed in tropical climate, *Journal of Sports Science and Medicine*, 14, 2015, p. 263-268.

Baker (Lindsay), Conroy (David), Kenney (Larry).– Dehydration impairs vigilance related attention in male basketball players, *Medicine and Science in Sports et Exercise*, 39, 6, 2007, p. 976-983.

Bandelow (Stephan), Maughan (Ronald), Shirreffs (Susan), Ozgüven (Kerem), Kurdak (Sadi), Ersöz (Gözde), Dvorak (John).– The effects of exercise, heat, cooling and rehydration strategies on cognitive function in football players, *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 20, 2010, p. 148-160.

Barwood (Martin), Thelwell (Richard), Tipton (Michael).– Psychological skills training improves exercise performance in the heat, *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 40, 2, 2008, p. 387-396.

Benbow (Camilla).– Sex differences in mathematical reasoning ability in intellectually talented preadolescents: Their nature, effects, and possible causes, *Behavioral Brain Sciences*, 11, 1988, p. 169-232.

Bolton (Charles), Sawa (G), Carter (Kristine).– The effects of temperature on human compound action potentials, *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 44, 1981, p. 407-413.

Bradley (Kate), Higenbottam (Colin).– *Cognitive performance: Effect of drug-induced dehydration*, Presented at “Maintaining Hydration: Issues, Guidelines, and Delivery”, Boston, USA, 2003.

Brisswalter (Jeanick), Collardeau (Maya), René (Arcelin).– Effects of acute physical exercise on characteristics on cognitive performance, *Sports Medicine*, 32, 2002, p. 555-566.

Brown (Ivan).– Driver fatigue, *Human Factors*, 36, 1994, p. 298-314.

Cabanac (Michel).– Physiological role of pleasure, *Science*, 173, 1971, p. 1103-1107.

Chase (Bradley), Karwowski (Waldemar), Benedict (Michael), Quesada (Peter), Irwin-Chase (Holly).– A study of computer-based task performance under thermal stress, *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 9, 2003, p. 5-15.

Cheung (Stephen), Sleivert (Gordon).– Multiple triggers for hyperthermic fatigue and exhaustion, *Exercise Sport Science Reviews*, 32, 2004, p. 100-106.

Cian (Corinne), Barraud (Pierre), Melin (Bruno), Raphel, (Christian).– Effects of fluid ingestion on cognitive function after heat stress or exercise-induced dehydration, *International Journal of Psychophysiology*, 42, 2001, p. 243-251.

Cian (Corinne), Koulmann (Nathalie), Barraud (Pierre), Raphel (Christian), Jimenez (Chantal), Melin (Bruno).– Influence of variation in body hydration on cognitive function: Effect of hyperhydration, heat stress and exercise-induced dehydration, *Journal of Psychophysiology*, 14, 2000, p. 29-36.

Coudeville (Guillaume), Popa-Roch (Maria), Sinnapah (Stéphane), Hue (Olivier), Robin (Nicolas).– Impact of tropical climate on selective attention and affect, *Journal of Human Performance in Extreme Environments*, 14, 2018, p. 7-25.

Coudeville (Guillaume), Sinnapah (Stéphane), Robin (Nicolas), Collado (Aurélien), Hue (Olivier).– Conventional and alternative strategies to cope with the tropical climate of Tokyo

2020: Impacts on psychological factors of performance, *Frontiers in Psychology*, 10, 2019, p. 1279.

Coudeville (Guillaume), Sinnapah (Stéphane), Collado (Aurélie), Fenouillet (Fabien), Hue (Olivier), Parrat (Mathieu), Robin (Nicolas).– If motivation was a key factor in aerobic performance in tropical climate, *Frontiers in Psychology*, 11, 2021, 619198, <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.619198>

Chmura (Jan), Krysztofiak (Hubert), Ziemba (A), Nazar (Krystyna), Kaciuba-Uscilko (Hanna).– Psychomotor performance during prolonged exercise above and below the blood lactate threshold, *European Journal of Applied Physiology Occupational Physiology*, 77, 1998, p. 77-80.

Collardeau (Maya), Brisswalter (Jeanik), Vercruyssen (Fabrice), Audiffren (Michel), Goubault (Claude).– Single and choice reaction time during prolonged exercise in trained subjects: Influence of carbohydrate availability, *European Journal of Applied Physiology*, 86, 2001, p. 150-156.

Craft (Rebecca).– Sex differences in opioid analgesia: “from mouse to man”, *Clinical Journal of Pain*, 19, 2003, p. 175-186.

De Jesus (Pacífico), Hausmanowa-Petrusewicz (Irena), Barchi (Robert).– The effects of cold on nerve conduction of human slow and fast nerve fibers, *Neurology*, 23, 1973, . p. 1182-1189.

de Dear (Richard), Akimoto (Tat), Arens (Edward), Brager (Gail), Candido (Cristhina), Cheong (Kah), Li (Baizhan), Nishihara (Naoe), Sekhar (S), Tanabe (Shin), Toftum (Jorn), Zhang (Hui), Zhu (Yingxin).– Progress in thermal comfort research over the last twenty years, *Indoor Air*, 23, 2013, p. 442-461, <https://doi.org/10.1111/ina.12046>

Delignières (Didier).– Influence de la chaleur humide sur le traitement de l’information et la performance, *Etude technique de l’INSEP*, 1994, p. 1-26.

Desmond (Peter), Hancock (Peter).– Active and passive fatigue states, dans Hancock (P. A.), Desmond (P. A.), *Human factors in transportation. Stress, Workload, and Fatigue* Mahwah, NJ, US, Lawrence Erlbaum Associates Publishers, 2001, p. 455-465.

Dubois (Michel), Sato (Susumo), Lees (David), Bull (Joan), Smith (Rosalie), White (Billy), Moore (Henry), Macnamara (Thomas).– Electroencephalographic changes during whole body hyperthermia in humans, *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 50, 1980, p. 486-495.

Epstein (Yoram), Keren (Gad), Moisseiev (Joseph), Gasko (O), Yachnin (Stanley).– Psychomotor deterioration during exposure to heat, *Aviation Space and Environmental Medicine*, 51, 1980, p. 607-610.

Epstein (Yoram), Moran (Daniel) .– Thermal comfort and the heat stress indices, *Industrial Health*, 44, 3, 2006, p. 388-398, DOI: 10.2486/indhealth.44.388

Fine (Bernard), Cohen (Alexander), Crist (Brian).– Effect of exposure to high humidity at high and moderate ambient temperature on anagram solution and auditory discrimination, *Psychological Reports*, 7, 1960, p. 171-181.

Fine (Bernard), Cohen (Alexander), Crist (Brian).– Effect of exposure to high humidity at high and moderate ambient temperature on anagram solution and auditory discrimination, *Psychological Reports*, 7, 1960, p. 171-181.

French (Karen), McPherson (Sue).– Adaptation in response selection processes used during sport competition with increasing age and expertise, *International Journal of Sport Psychology*, 30, 1999, p. 173-193.

Gaoua (Nadia).– Cognitive function in hot environments: A question of methodology, *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 20, 3, 2010, p. 60-70.

Gaoua (Nadia).– Étude de l'effet de l'exposition à un environnement chaud sur les fonctions cognitives chez l'homme, thèse de doctorat, Vincennes Saint-Denis, Paris 8, 2012.

Gaoua (Nadia), Herrera (Christopher), Périard (Julien), El Massioui (Farid), Racinais (Sébastien).– Effect of passive hyperthermia on working memory resources during simple and complex cognitive tasks, *Frontiers in Psychology*, 8, 2018, DOI: 10.3389/fpsyg.2017.02290.

Gaoua (Nadia), Racinais (Sébastien), Grantham (Justin), El Massioui (Farid).– Alterations in cognitive performance during passive hyperthermia are task dependent, *International Journal of Hyperthermia*, 27, 1, 2011, p. 1-9.

Grego (Fabien), Vallier (Jean-Marc), Collardeau (Maya), Bermon (Stéphane), Ferrari (Patricia), Candito (Mirande), Bayer (Pascale), Magnié (Marie-Noelle), Brisswater (Jeanik).– Effects of long duration exercise on cognitive function, blood glucose, and counter regulatory hormones in male cyclists, *Neuroscience Letter*, 364, 2004, p. 76-80.

Grether (Williams).– Human performance at elevated environmental temperatures, *Aerospace Medicine*, 44, 1973, p. 747-755.

Gur (Ruben), Turetsky (Bruce), Matsui (Mie), Yan (Michelle), Bilker (Warren), Hughett (Paul), Gur (Raquel).– Sex differences in brain gray and white matter in healthy young adults: Correlations with cognitive performance, *Journal of Neuroscience*, 19, 1999, p. 4065-4072.

Hancock (Peter).– Task categorization and the limits of human performance in extreme heat, *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 53, 1982, p. 778-784.

Hancock (Peter).– Sustained attention under thermal stress, *Psychological Bulletin*, 99, 1986, p. 263-281.

Hancock (Peter), Warm (Joel).– A dynamic model of stress and sustained attention, *Human Factors*, 31, 1989, p. 519-537.

Hancock (Peter), Vasmatazidis (Iannis).– Human occupational and performance limits under stress: the thermal environment as a prototypical example, *Ergonomics*, 41, 1998, p. 1169-1191.

Hancock (Peter), Vasmatazidis (Iannis).– Effects of heat stress on cognitive performance: The current state of knowledge, *International Journal of Hyperthermia*, 19, 2003, p. 355-372.

Hockey (Robert).– Cognitive-energetical control mechanisms in the management of work demands and psychological health, dans Baddeley (A. D.), Weiskrantz (L.), *Attention: Selection, awareness, and control: A tribute to Donald Broadbent*, New York, NY, US: Clarendon Press/Oxford University Press, 1993, p. 328-345.

Hockey (Robert).– Compensatory control in the regulation of human performance under stress and high workload: A cognitive-energetical framework, *Biological Psychology*, 45, 1997, p. 73-93.

Hocking (Chris), Silberstein (Richard), Lau (Wai), Stough (Con), Roberts (Warren).– Evaluation of cognitive performance in the heat by functional brain imaging and psychometric testing, *Comparative Biochemistry and Physiology - Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 128, 2001, p. 719-734.

Houghton (Frantz), Yaglogou (Constantine).– Determining lines of equal comfort, *Transactions of the American Society of Heating and Ventilating Engineers*, 29, 1923, p. 1239-1246.

Hue (Olivier).– The challenge of performing aerobic exercise in tropical environments: Applied knowledge and perspectives, *International Journal Sports and Physiology Performance*, 6, 2011, 443-454.

Hue (Olivier), Galy (Olivier).– The effect of a silicone swim cap on swimming performance in tropical conditions in pre-adolescents, *Journal of Sports Science and Medicine*, 11, 2012, p. 156-161.

Jimenez (Chantal), Koulmann (Nathalie), Mischler (Isabelle), Allevard (Anne-Marie), Launay (Jean-Claude), Savourey (Gustave), Melin (Bruno).– Plasma compartment filling after exercise or heat exposure, *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 34, 2002, p. 1624-1631.

Johnson (Robert), Kobrick (John).– *Military Effectiveness in the Heat: Cognitive and Psychomotor Performance*, The Technical Cooperation Program, Technical Report TTCP-HUM-TP-6-98-KCA-001. 1998, p. 1-44.

- Kahneman (Daniel).– *Attention and effort*, Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1973.
- Karjalainen (Sami).– Gender differences in thermal comfort and use of thermostats in everyday thermal environments, *Build Environment*, 42, 2007, p. 1594-1603.
- Kim (Hyung), Choi (Mi), Baek (Ji), Park (Sung), Lee (Jung), Jeong (Ui), Kim (Sung), Kim (Hyun), Choi (Young), Lim (Dae), Chung (Soon).– Effects of 92% oxygen administration on cognitive performance and physiological changes of intellectually and developmentally disabled people, *Journal of Physiological Anthropology*, 34, 2015, p. 2-5.
- Kosonen (Risto), Tan (Freddie).– Assessment of productivity loss in air-conditioned buildings using PMV index, *Energy and Buildings*, 36, 2004, p. 987-993.
- Kuno (Yas).– *Human perspiration*, Springfield, Ill., Charles C. Thomas publisher, 1956.
- Lan (Lan), Lian (Zhiwei), Liu (Weiwei), Liu (Yuanmou).– Investigation of gender difference in thermal comfort for Chinese people, *European Journal of Applied Physiology*, 102, 2008, p. 471-480.
- Lan (Li), Wargocki (Pawel), Lian (Zhiwei).– Quantitative measurement of productivity loss due to thermal discomfort, *Energy and Buildings*, 43, 2011, p. 1057-1062.
- Liu (Kai), Sun (Gang), Li (Bo), Jiang (Qingjun), Yang (Xio), Li (Min), Li (Li), Qian (Shaowen), Zhao (Lun), Zhou (Zhenyu); von Deneen (Kraen, M.), Liu (Yijun).– The impact of passive hyperthermia on human attention networks: An fMRI study, *Behavioral Brain Research*, 243, 2013, p. 220-30.
- Mackworth (N. H.).– Effects of heat on wireless telegraphy operators hearing and recording morse messages, *British Journal of Industrial Medicine*, 3, 1946, p. 143-158.
- Maughan (Ron).– Distance running in hot environments: A thermal challenge to the elite runner, *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 20, 2010, p. 95-102.
- McPherson (Roger).– Thermal stress and thermal comfort, *Ergonomics*, 16, 1973, p. 611-623.

Mehnert (Peter), Brode (Peter), Griefahn (Barbara).– Gender related difference in sweat loss and its impact on exposure limits to heat stress, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 29, 2002, p. 343-351.

Meijman (Theo).– Mental fatigue and the efficiency of information processing in relation to work times, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 20, 1997, p. 31-38.

Mortagy (Amr).– Effects of work-rest schedules on monitoring performance in the heat, Unpublished doctoral dissertation, Texas Tech University, Lubbock, 1971.

Nguyen (MyHang), Tokura (Hiromi).– Observations on normal body temperatures in Vietnamese and Japanese in Vietnam, *Journal of Physiological Anthropology*, 21, 2002, p. 59-65.

Nunneley (Sarah).– Physiological responses of women to thermal stress: A review, *Medicine and Science in Sports*, 10, 1978, p. 250-255.

Nybo (Lars).– Cycling in the heat: Performance perspectives and cerebral challenges, *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 20, 2010, p. 71-79.

Nybo (Lars), Nielsen (Bodil).– Perceived exertion is associated with an altered brain activity during exercise with progressive hyperthermia, *Journal of Applied Physiology*, 91, 2001, p. 2017-2023.

Parker (Sarah), Erin (Jennifer), Pryor (Riana), Khorana (Priya), Suyama (Joe), Guyette (Frank), Reis (Steven), Hostler (David).– The effect of prolonged light intensity exercise in the heat on executive function, *Wilderness Environmental Medicine*, 24, 2013, p. 203-210.

Pepler (Richard).– Warmth and performance: An investigation in the tropics, *Ergonomics*, 22, 1958, p. 63-88.

Pilcher (June), Nadler (Eric), Busch (Caroline).– Effects of hot and cold temperature exposure on performance: A meta-analytic review, *Ergonomics*, 45, 2002, p. 682-698.

Qian (Shaowen), Li (Min), Li (Guoying), Liu (Kai), Li (Bo), Jiang (Qingjun), Li (Li), Yang (Zen), Sun (Gang).– Environmental heat stress enhances mental fatigue during

sustained attention task performing: Evidence from an ASL perfusion study, *Behavioral Brain Research*, 280, 2015, p. 6-15.

Racinais (Sébastien), Gaoua (Nadia), Grantham (Justin).– Hyperthermia impairs short-term memory and peripheral motor drive transmission, *Journal of Physiology*, 586, 2008, p. 4751-4762.

Radakovic (Sonja), Maric (Jelena), Surbatovic (Maja), Radjen (Slavica), Stefanova (Elka), Stankovic (Nebojsa), Filipovic (Nikola).– Effects of acclimation on cognitive performance in soldiers during exertional heat stress, *Military Medicine*, 172, 2007, p. 133-136.

Ramsey (Jerry).– Task performance in heat: A review, *Ergonomics*, 38, 1995, p. 154-165.

Ramsey (Jerry), Kwon (Yeong).– Recommended alert limits for perceptual motor loss in hot environments, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 9, 1992, p. 245-257.

Robin (Nicolas), Coudevylle (Guillaume), Hue (Olivier), Sinnapah (Stéphane).– Effects of tropical climate on mental rotation: The role of imagery ability, *American Journal of Psychology*, 130, 2017, p. 455-465.

Robin (Nicolas), Coudevylle (Guillaume).– The influences of tropical climate, imagery ability, distance and load on walking time, *International Journal of Sport Psychology*, 3, 2017, p. 140-155.

Robin (Nicolas), Collado (Aurélie), Sinnapah (Stéphane), Rosnet (Elisbeth), Hue (Olivier), Coudevylle (Guillaume).– The influence of tropical climate on cognitive task performance and aiming accuracy in young international fencers, *Journal of Human Performance in Extreme Environments*, 15, 1, Article 4, 2019.

Robin (Nicolas), Sinnapah (Stéphane), Hue (Olivier), Coudevylle (Guillaume).– Tropical climate influences affects, sensation of fatigue and environmental perceptions, *PsyEcology*, in press.

Saat (Mohamed), Sirisinghe (Roland), Singh (Rabindarjeet), Tochihara (Yutuka).– Effects of short-term exercise in the heat on thermoregulation, blood parameters, sweat secretion and

sweat composition of tropic dwelling subjects, *Journal of Physiological Anthropology and Applied Human Science*, 24, 2005, p. 541-549.

Salati (Enzo), Lovejoy (Teri), Vose (Pablo).– Precipitation and water recycling in tropical rain forests with special reference to the Amazon basin, *Environmentalist*, 3, 1983, p. 67-72.

Salmela (John), Ndoye (Ousseynou).– Cognitive distortions during progressive exercise, *Perceptual Motor Skills*, 63, 1986, p. 1067-1072.

Saltin (Bengt), Gagge (Pharo), Stolwijk (John).– Muscle temperature during submaximal exercise in man, *Journal of Applied Physiology*, 25, 1968, p. 679-688.

Sanders (Andries).– Towards a model of stress and human performance, *Acta Psychologica*, 53, 1983, p. 64-97.

Sawka (Michael).– Physiological consequences of hypohydration: Exercise performance and thermoregulation, *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 24, 1992, p. 657-670.

Schiavon (Stefano), Yang (Bin), Donner (Yoni), Chang (Victor), Nazaroff (William).– Thermal comfort, perceived air quality, and cognitive performance when personally controlled air movement is used by tropically acclimatized persons, *Indoor Air*, 27, 2017, p. 690-702.

Schneider (Walter), Shiffrin (Richard).– Controlled and automatic human information processing: I. Detection, search, and attention, *Psychological Review*, 84, 1977, p. 1-66.

Silberstein (Richard), Schier (Mark), Pipingas (Andrew), Ciorciari (Joseph), Wood (Shaun), Simpson (David).– Steady-state visually evoked potential topography associated with a visual vigilance task, *Brain Topography*, 3, 1990, p. 337-347.

Simmons (Shona), Mundel (Toby), Jones (David).– The effects of passive heating and head cooling on perception of exercise in the heat, *European Journal of Applied Physiology*, 104, 2008, p. 281-288.

Tanabe (Shin-ichi), Nishihara (Naoe), Haneda (Masaoki).– Indoor temperature, productivity, and fatigue in office tasks, *HVAC&R Research*, 13, 2007, p. 623-633.

Taylor (Lee), Watkins (Samuel), Marshal (Hannah), Dascombe (Ben), Foster (Josh).– The impact of different environmental conditions on cognitive function: A focused review, *Frontiers in Physiology*, 6, 2015, p. 372.

Tomporowski (Phillip), Beasman (Kenneth), Ganio (Matthew), Cureton (Kirk).– Effects of dehydration and fluid ingestion on cognition, *International Journal in Sports Medicine*, 28, 2007, p. 891-896.

van den Heuvel (Anne), Haberley (Benjamin), Hoyle (David), Taylor (Nigel), Croft (Rodney).– The independent influences of heat strain and dehydration upon cognition, *The European Journal of Applied Physiology*, 117, 5, 2017, p. 1025-1037.

van der Linden (Dimitri), Eling (Paul).– Mental fatigue disturbs local processing more than global processing, *Psychological Research - Psychologische Forschung*, 70, 2006, p. 395-402.

Vasmatazidis (Ioannis), Schlegel (Robert), Hancock (Peter).– An investigation of heat stress effects on time-sharing performance, *Ergonomics*, 45, 2002, p. 218-239.

Wallace (Phillip), McKinlay (Brandon), Coletta, (Nico), Vlaar (Janae), Taber (Michael), Wilson (Philip), Cheung (Stephen).– Effects of motivational self-talk on endurance and cognitive performance in the heat, *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 49, 1, 2017, p. 191-199.

Weiskopf (Richard), Kramer (Joel), Viele (Maurene), Neumann (Mireille), Feiner (John), Watson (Jessica), Hopf (Harriet), Toy (Pearl).– Acute severe isovolemic anemia impairs cognitive function and memory in humans, *Anesthesiology*, 92, 2000, p. 1646-1652.

Wijayanto (Titis), Toramoto (Sayo), Tochihara (Yutaka).– Passive heat exposure induced by hot water leg immersion increased oxyhemoglobin in pre-frontal cortex to preserve oxygenation and did not contribute to impaired cognitive functioning, *International Journal of Biometeorology*, 57, 2013, p. 557-567.

Wijayanto (Titis), Toramoto (Sayo), Maeda (Yasuhiko), Son (Su), Umezaki (Sonomi), Tochihara (Yutaka).– Cognitive performance during passive heat exposure in Japanese males

and tropical Asian males from Southeast Asian living in Japan, *Journal of Physiological Anthropology*, 36, 2017, p. 2-11.

Wyndham (Cyril), Rogers (Greg), Senay (Leo), Mitchell (Duncan).– Acclimatization in a hot, humid environment: Cardiovascular adjustments, *Journal of Applied Physiology*, 40, 1976, p. 779-785.

Wyon (David), Andersen (Ib), Lundqvist (Gunnar).– Spontaneous magnitude estimation of thermal discomfort during changes in the ambient temperature, *Journal of Hygiene*, 70, 1972, p. 203-221.

Zuri (Ron), Cleary (Michelle), Lopez (Rebecca), Jones (Leon), Moseley (Bryan).– Cognitive performance may be impaired by exercise in hot, humid environment: A preliminary investigation, 3<sup>rd</sup> annual college of Education Research Conference, Miami, Florida, USA, Florida International University, 2004, p. 128-133.