



Université de Sherbrooke  
Faculté des sciences de l'activité physique  
Département de kinanthropologie

**Impacts de la déshydratation et de l'hypohydratation sur la physiologie, les perceptions subjectives et la performance humaine : est-il possible d'en réduire les effets en s'y exposant fréquemment ?**

Par Thomas Deshayes, M. Sc.

Laboratoire de recherche sur la performance, l'hydratation et la thermorégulation

Thèse présentée à la Faculté des sciences de l'activité physique en vue de l'obtention du grade de philosophiae doctor (Ph.D.)

Sherbrooke, novembre 2022



Cette thèse a été évaluée par un jury composé des personnes suivantes :

Directeur :

Dr. **Éric Goulet**, Ph.D.,  
Faculté des sciences de l'activité physique,  
Université de Sherbrooke

Codirectrice :

Dre. **Isabelle Dionne**, Ph.D.,  
Faculté des sciences de l'activité physique,  
Université de Sherbrooke

Évaluatrice interne :

Dre. **Pascale Morin**, Ph.D.,  
Faculté des sciences de l'activité physique,  
Université de Sherbrooke

Évaluateur externe :

Dr. **Julien Périard**, Ph.D.,  
Research Institute for Sport and Exercise,  
University of Canberra

Sherbrooke, novembre 2022

## RÉSUMÉ

La déshydratation, notamment  $\geq 2\%$  de la masse corporelle, est généralement associée à une altération des fonctions physiologiques, des perceptions subjectives ainsi que de la performance d'endurance et des fonctions cognitives. Plus précisément, il est fréquemment mentionné qu'ensemble, les impacts cardiovasculaires, thermiques, métaboliques ainsi que subjectifs induits par la déshydratation pourraient contribuer à augmenter la perception de l'effort, qui à son tour, agirait comme un médiateur de la performance d'endurance. Si plusieurs études ont observé une exacerbation de la perception de l'effort avec la déshydratation, les évidences sont contradictoires, et certaines études n'observent pas d'effet. De plus, des évidences suggèrent que certaines personnes tolèrent mieux la déshydratation, tandis que d'autres en sont plus largement affectés. À cet égard, une hypothèse a récemment été émise, selon laquelle l'exposition répétée à la déshydratation pourrait en atténuer certains effets, notamment sur les perceptions subjectives dont la perception de l'effort, et donc en réduire l'impact subséquent sur la performance d'endurance. En plus d'être un possible médiateur clé dans la relation entre la déshydratation induite par l'exercice et la performance d'endurance, la perception de l'effort pourrait également jouer un rôle central dans le processus d'habituation à la déshydratation. Toutefois, l'idée que l'humain puisse s'habituer à la déshydratation n'a été discutée que de manière superficielle et anecdotique. De nombreuses questions restent donc en suspens et se doivent d'être étudiées.

Le premier objectif de la présente thèse était de caractériser la magnitude de l'effet de la déshydratation sur la perception de l'effort à l'aide de la méthode méta-analytique. Dans un second temps, cette thèse visait à vérifier (1) l'impact de la déshydratation faible (2 %) et modérée (4 % de la masse corporelle) sur la réponse cardiovasculaire, thermique et subjective ainsi que sur la performance d'endurance et cognitive, lorsque non habitué à cette dernière et (2) si une exposition répétée à ces niveaux de déshydratation pouvait permettre d'en réduire les impacts néfastes sur les variables précédemment exposées.

Tout d'abord, une revue systématique avec méta-analyse a permis de caractériser la relation entre la déshydratation induite par l'exercice et la perception de l'effort. Il a été émis

l'hypothèse que la déshydratation serait associée à une plus grande perception de l'effort, et ce, proportionnellement au déficit hydrique induit. Cette méta-analyse a permis de démontrer que bien que ces variables soient liées, il est peu probable que les effets de la déshydratation sur la perception de l'effort soient significatifs d'un point de vue pratique lorsque la déshydratation est faible (c.-à-d. < à 3 % de la masse corporelle).

Par la suite, une étude utilisant un devis chassé-croisé randomisé a été menée auprès d'individus afin de (1) caractériser l'impact de la déshydratation faible et modérée sur les fonctions physiologiques, les réponses subjectives et la performance d'endurance et cognitive et (2) vérifier l'effet d'une exposition répétée à ces niveaux de déshydratation. Il a été émis l'hypothèse que les variables d'intérêts seraient significativement altérées par la déshydratation, d'autant plus lorsque modérée, mais qu'après une exposition répétée, elles seraient similaires, qu'une hydratation adéquate soit maintenue ou non pendant l'exercice. Les résultats obtenus soutiennent l'effet négatif de la déshydratation, d'autant plus lorsque modérée, sur les variables cardiovasculaires, thermiques et subjectives ainsi que sur la performance d'endurance. Plus spécifiquement, l'effet observé dans cette étude sur la perception de l'effort soutient les conclusions de notre méta-analyse, c.-à-d. que la déshydratation induite par l'exercice exacerbe la perception de l'effort lorsque > 3 % de la masse corporelle. En revanche, nos données ne démontrent pas d'effet négatif de la déshydratation sur la performance cognitive. Enfin, et surtout, nos résultats démontrent également que l'exposition répétée à la déshydratation faible et modérée ne permet pas d'en atténuer les effets négatifs sur les variables étudiées. Autrement dit, nos résultats suggèrent que les personnes qui s'exposent de manière répétée à des niveaux d'hypohydratation faibles et modérés ne doivent pas s'attendre à une atténuation des effets néfastes sur leurs performances.

Les travaux présentés dans cette thèse participent donc directement au développement du domaine de l'hydratation et de la performance humaine en contribuant de manière significative à l'enrichissement des connaissances quant (1) aux mécanismes impliqués dans l'impact de la déshydratation sur la performance humaine ainsi qu'aux (2) effets d'une exposition répétée à la déshydratation et la possibilité pour l'humain de s'y habituer.

## REMERCIEMENTS

Je tiens en premier lieu à remercier le Dr. Éric Goulet et la Dre. Isabelle Dionne pour leur accessibilité, leurs conseils ainsi que leur soutien inconditionnel tout au long de mon parcours. Merci d'avoir cru en moi et d'avoir contribué à mon cheminement scientifique et humain. J'aimerais témoigner plus spécifiquement ma très grande gratitude au Dr. Éric Goulet pour le partage de son expertise, de son temps et, surtout, de son esprit critique et sa très grande rigueur. Enfin, je suis reconnaissant des innombrables possibilités qu'il m'a offertes tout au long de mon parcours.

J'aimerais également remercier les membres du jury qui ont évalué cette thèse : Dre. Pascale Morin et Dr. Julien Périard. Je suis très reconnaissant du temps et de l'énergie que vous avez investis dans l'évaluation de ce travail. Vos conseils et commentaires ont contribué à l'amélioration significative de cette thèse. Je tiens aussi à remercier le Dr. Félix Berrigan et la Dre. Érica Perrier pour leurs nombreux commentaires constructifs et nos échanges qui ont grandement contribué à mes réflexions.

Cette aventure n'aurait pu être possible sans le soutien et l'aide précieuse de mes formidables collègues du Centre de recherche sur le vieillissement et du Laboratoire de recherche sur la performance, l'hydratation et la thermorégulation. Vous avez été, par votre aide et votre soutien mais aussi par vos idées et vos réflexions, des acteurs clés de mon cheminement et de cette thèse. David, Timothée, Catherine, Antoine, Pascale, Fethi, Maxime, Jeff et, tout particulièrement, M. Nicolas Daigle qui s'est avéré un maillon essentiel dans la collecte de données lors de sa maîtrise.

Je remercie ma conjointe, Jeanne, elle qui m'a soutenue pendant ce parcours et qui a surtout accepté mes absences pour mes nombreuses heures passées au laboratoire. Sa patience ainsi que ses grandes qualités d'écoute et de compréhension m'ont permis de m'épanouir dans cette belle aventure. Merci à ma famille et mes amis pour leur appui inconditionnel, et ce, malgré la distance et quelques heures de décalage. Enfin, je ne peux passer sous silence la

gratitude que je témoigne à ma belle-famille. Je vous serai toujours reconnaissant de m'avoir si bien accueilli.

Tout au long de mon doctorat j'ai été soutenu par une bourse de formation des Fonds de Recherche du Québec – Santé, ainsi que par une bourse de 3<sup>e</sup> cycle du Centre de Recherche sur le Vieillessement (Université de Sherbrooke). Ces dernières m'ont permises de me concentrer pleinement sur mes études et mes recherches. Enfin, il est à souligner que la réalisation de certains travaux présentés dans cette thèse a été rendue possible grâce à une subvention octroyée par le gouvernement du Canada dans le cadre du programme Innovations pour la défense, l'excellence et la sécurité (IDeES).

## LISTE DES PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

### i. Publications scientifiques ayant servi à la rédaction de la thèse

**Deshayes, T.A.**, Pancrate, T., & Goulet, E.D.B. (2022). Impact of Dehydration on Perceived Exertion During Endurance Exercise: A Systematic Review with Meta-analysis. *Journal of Exercise Science & Fitness*, 20(3), 224-235.

**Deshayes, T.A.**, Daigle, N., Jeker, D., Lamontagne-Lacasse, M., Perreault-Briere, M., Claveau, P., Simoneau, I.L., Chamoux, E., Goulet, E.D.B. (2021). Impact of Repeated Acute Exposures to Low and Moderate Exercise-Induced Hypohydration on Physiological and Subjective Responses and Endurance Performance. *Nutrients*, 13(12), 4477.

**Deshayes, T.A.**, Daigle, N., Jeker, D., Lamontagne-Lacasse, M., Perreault-Briere, M., Claveau, P., Simoneau, I.L., Chamoux, E., Goulet, E.D.B. (2022). Cognitive Performance Before and Following Habituation to Exercise-Induced Hypohydration of 2 and 4% Body Mass in Physically Active Individuals. *Nutrients*, 14(5), 935.

### ii. Publications scientifiques produites en marge de la thèse

**Deshayes, T.A.**, De La Flore, A., Gosselin, J., Beliveau, J., Jeker, D., & Goulet, E.D.B. (2019). The Impact of an Ice Slurry-Induced Gastrointestinal Heat Sink on Gastrointestinal and Rectal Temperatures Following Exercise. *Sports*, 7(9), 198.

Perreault-Briere, M., Beliveau, J., Jeker, D., **Deshayes, T.A.**, Duran, A., & Goulet, E.D.B. (2019). Effect of Thirst-Driven Fluid Intake on 1 H Cycling Time-Trial Performance in Trained Endurance Athletes. *Sports*, 7(10), 223.

**Deshayes, T.A.**, Jeker, D., & Goulet, E.D.B. (2020). Impact of pre-exercise hypohydration on aerobic exercise performance, peak oxygen consumption and oxygen consumption at lactate threshold: A systematic review with meta-analysis. *Sports Medicine*, 50(3), 581-596.

Beliveau, J., Perreault-Briere, M., Jeker, D., **Deshayes, T.A.**, Durán-Suárez, A., Baker, L. B., & Goulet, E.D.B. (2020). Permanent tattooing has no impact on local sweat rate, sweat sodium concentration and skin temperature or prediction of whole-body sweat sodium concentration during moderate-intensity cycling in a warm environment. *European Journal of Applied Physiology*, 120(5), 1111-1122.

Pancrate, T., Gosselin, J., **Deshayes, T.A.**, & Goulet, E.D.B. (2020). Validity and Reliability of the CorTemp<sup>TM</sup> Telemetric Pill during 50 h of Reuse in a Circulating Water Bath. *Journal of Thermal Biology*, 93, 102737.

Abed, M.E.F., **Deshayes, T.A.**, Claveau, P., Jeker, D., Thénault, F., & Goulet, E.D.B. (2020). Impact of Mild Hypohydration on 100 m Front Crawl Performance and Starting Block Peak Force Production in Competitive University-Level Swimmers. *Sports*, 8(10), 133.

Claveau, P., **Deshayes, T.A.**, Jeker, D., Pancrate, T., & Goulet, E.D.B. (2022). Provision of instructions to drink ad libitum or according to thirst sensation: impact during 120 km of cycling in the heat in men. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 47(1), 83-90.

Jeker, D., Claveau, P., Abed, M. E. F., **Deshayes, T.A.**, Lajoie, C., Gendron, P., Hoffman, M.D., & Goulet, E.D.B. (2022). Programmed vs. Thirst-Driven Drinking during Prolonged Cycling in a Warm Environment. *Nutrients*, 14(1), 141.

Naulleau, C., Jeker, D., Pancrate, T., Claveau, P., **Deshayes, T.A.**, Burke, L.M., & Goulet, E.D.B. (2022). Effect of Pre-Exercise Caffeine Intake on Endurance Performance and Core Temperature Regulation During Exercise in the Heat: A Systematic Review with Meta-Analysis. *Sports Medicine*, 52(10), 2431-2445.



## TABLE DES MATIÈRES

<b>RÉSUMÉ .....</b>	<b>III</b>
<b>REMERCIEMENTS .....</b>	<b>V</b>
<b>LISTE DES PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES .....</b>	<b>VII</b>
<b>I. PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES AYANT SERVI À LA RÉDACTION DE LA THÈSE .....</b>	<b>VII</b>
<b>II. PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES PRODUITES EN MARGE DE LA THÈSE .....</b>	<b>VII</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>XI</b>
<b>LISTE DES FIGURES .....</b>	<b>XII</b>
<b>LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES .....</b>	<b>XIV</b>
<b>CHAPITRE I. INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE II. REVUE DE LA LITTÉRATURE .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1. MYTHE DE L'ABONDANCE EN EAU : IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES .</b>	<b>4</b>
<b>2.2. ÉQUILIBRE HYDRIQUE : DÉFINITIONS ET CONCEPTS.....</b>	<b>7</b>
2.2.1. L'EAU : CONSTITUANT ESSENTIEL DE L'ORGANISME .....	7
2.2.2. MOUVEMENTS D'EAU ENTRE LE COMPARTIMENT INTRA ET EXTRACELLULAIRE : RÔLE DE L'OSMOLALITÉ .	7
2.2.3. ÉQUILIBRE HYDRIQUE .....	10
2.2.3.1. Définitions, concepts et mesures.....	10
2.2.3.2. Exemple de régulation en situation de sédentarité.....	14
<b>2.3. PERTES ET APPORTS HYDRIQUES LORS DE L'EXERCICE : MÉCANISMES DE RÉGULATION .....</b>	<b>15</b>
2.3.1. PERTES HYDRIQUES.....	15
2.3.1.1. Sudation : des pertes hypotoniques .....	15
2.3.1.2. Hormone antidiurétique et système rénine-angiotensine-aldostérone .....	18
2.3.2. APPORTS HYDRIQUES .....	21
2.3.2.1. Déclenchement et inhibition de la soif : mécanismes sous-jacents .....	21
2.3.2.2. Concept de déshydratation volontaire lors de l'exercice .....	26
<b>2.4. DÉSHYDRATATION INDUITE PAR L'EXERCICE : IMPACTS .....</b>	<b>27</b>
2.4.1. VARIABLES PHYSIOLOGIQUES .....	27
2.4.1.1. Impacts sur la fonction cardiovasculaire .....	27
2.4.1.2. Impacts sur la température corporelle .....	30
2.4.1.3. Impacts sur le métabolisme énergétique .....	35
2.4.2. PERCEPTIONS SUBJECTIVES .....	35

2.4.2.1.	Impacts sur la sensation de soif.....	35
2.4.2.2.	Impacts sur l'humeur, la fatigue mentale et la douleur .....	36
2.4.2.3.	Impacts sur la perception de l'effort .....	37
2.4.2.3.1.	Perception de l'effort : possible médiateur de la relation entre la déshydratation et la performance d'endurance.....	37
2.4.2.3.2.	Des évidences contradictoires qui démontrent la nécessité d'une revue systématique avec méta-analyse.....	38
2.4.2.3.3.	Principes, avantages et limites des méta-analyses.....	40
2.4.3.	PERFORMANCE D'ENDURANCE .....	42
2.4.4.	PERFORMANCE COGNITIVE .....	44
<b>2.5.</b>	<b>EXPOSITIONS RÉPÉTÉES ET FRÉQUENTES À LA DÉSHYDRATATION : UNE POSSIBLE HABITUATION?.....</b>	<b>47</b>
2.5.1.	EXPOSITION RÉPÉTÉE À LA DÉSHYDRATATION .....	48
2.5.2.	PROTOCOLES D'ACCLIMATATION À LA CHALEUR PERMETTANT UNE DÉSHYDRATATION.....	55
2.5.3.	SYNTHÈSE : UNE REVUE DE LITTÉRATURE QUI SOULÈVE PLUSIEURS QUESTIONS.....	56
<b>2.6.</b>	<b>OBJECTIFS, QUESTIONS DE RECHERCHE ET HYPOTHÈSES .....</b>	<b>57</b>
 <b>CHAPITRE III. RÉSULTATS.....</b>		<b>60</b>
 <b>3.1. IMPACT OF DEHYDRATION ON PERCEIVED EXERTION DURING ENDURANCE EXERCISE: A SYSTEMATIC REVIEW WITH META-ANALYSIS.....</b>		<b>60</b>
3.1.1.	RÉSUMÉ.....	60
<b>3.2. IMPACT OF REPEATED ACUTE EXPOSURES TO LOW AND MODERATE EXERCISE-INDUCED DEHYDRATION ON PHYSIOLOGICAL AND SUBJECTIVE RESPONSES AND ENDURANCE PERFORMANCE .....</b>		<b>107</b>
3.2.1.	RÉSUMÉ.....	107
<b>3.3. COGNITIVE PERFORMANCE BEFORE AND FOLLOWING HABITUATION TO EXERCISE-INDUCED HYPOHYDRATION OF 2 AND 4% BODY MASS IN PHYSICALLY ACTIVE INDIVIDUALS .....</b>		<b>128</b>
3.3.1.	RÉSUMÉ.....	128
 <b>CHAPITRE IV. DISCUSSION ET CONCLUSION .....</b>		<b>150</b>
 <b>4.1. RAPPEL DES QUESTIONS DE RECHERCHE ET RÉSULTATS PRINCIPAUX .....</b>		<b>150</b>
<b>4.2. DÉSHYDRATATION ET PERCEPTION DE L'EFFORT : UN EFFET DOSE-RÉPONSE ?</b>		<b>151</b>
<b>4.3. S'ENTRAÎNER À LA DÉSHYDRATATION : PAS DE BÉNÉFICES SUPPLÉMENTAIRES, MAIS PAS MOINS DE BÉNÉFICES POUR AUTANT .....</b>		<b>153</b>
<b>4.4. S'ENTRAÎNER À LA DÉSHYDRATATION : VERS UNE APPROCHE PLUS CIBLÉE ?... </b>		<b>155</b>
<b>4.5. EXPOSITION RÉPÉTÉE : UN EFFET SUR LA PERCEPTION DE LA SOIF QUI EST À APPROFONDIR .....</b>		<b>157</b>
<b>4.6. CONCLUSION GÉNÉRALE .....</b>		<b>161</b>
 <b>RÉFÉRENCES.....</b>		<b>163</b>

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Consommation d'eau domestique par pays. ....	4
Tableau 2. Répartition des principaux solutés osmotiquement actifs ( $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ). ....	8
Tableau 3. Principaux marqueurs de déshydratation et seuils associés rapportés dans la littérature. ....	14
Tableau 4. Études qui se sont intéressées à la relation entre les changements de masse corporelle et la performance lors de compétitions. ....	50

## LISTE DES FIGURES

- Figure 1.** Mouvements d'eau entre le compartiment intra et extracellulaire. Les flèches pleines bleues représentent les mouvements d'eau. Les flèches en pointillés noirs représentent les modifications structurelles cellulaires..... 10
- Figure 2.** Relation entre la diminution de l'eau corporelle totale et les changements (a) de volume plasmatique et (b) d'osmolalité plasmatique. Les croix représentent les données individuelles. Données récoltées au repos chez des personnes acclimatées à la chaleur après une hypohydratation induite par transpiration. .... 18
- Figure 3.** Relation entre les concentrations plasmatiques d'ADH et (a) l'osmolalité plasmatique et (b) l'osmolalité urinaire chez des humains sains. ADH = hormone antidiurétique. Les croix représentent les données individuelles. La ligne verticale en pointillés reflète les concentrations plasmatiques d'ADH à partir desquelles les concentrations maximales d'urine interviennent. Données récoltées au repos après trois manipulations du statut hydrique : prise de liquide ad libitum, hyperhydratation aiguë et après plusieurs périodes de restriction hydrique. .... 20
- Figure 4.** Relation entre l'osmolalité plasmatique et l'ADH et la sensation de soif chez une personne en santé lors d'une infusion saline de 5 %. ADH = hormone antidiurétique. ... 22
- Figure 5.** (a) Localisation et fonctionnement des osmorécepteurs et (b) schématisation des réseaux neuronaux qui interviennent dans la régulation de la perception de la sensation de soif. SFO = organe subfornical, MnPO = noyau préoptique médian, OVLT = organe vasculaire de la lame terminale, ADH = hormone antidiurétique, TRPV1 = transient receptor potential vanilloïde 1. USG = gravité spécifique de l'urine, CCA = cortex cingulaire antérieur, CI = cortex insulaire. .... 25
- Figure 6.** Impact graduel de la déshydratation induite par l'exercice (1 à 4 % de la masse corporelle) sur (a) le débit cardiaque, (b) le VES et (c) la fréquence cardiaque lors d'un exercice de 120 min à vélo (33 °C, 50 % d'humidité et 9 km · h<sup>-1</sup> de vent). VES = volume d'éjection systolique. .... 29
- Figure 7.** Impacts de l'hypovolémie et de l'hyperosmolalité plasmatique sur le seuil de déclenchement de la sudation ainsi que sur la sensibilité sudorale. .... 31
- Figure 8.** Impact de la déshydratation, de l'ingestion d'eau et de l'ingestion de saline sur (a) le changement de masse corporelle, (b) le changement de volume plasmatique, (c) la température tympanique et (d) l'osmolalité plasmatique lors d'un protocole varié (45 °C, 40 % d'humidité et 5 km · h<sup>-1</sup> de vent). Les détails du protocole sont présentés dans le texte principal. .... 32
- Figure 9.** Impact graduel de la déshydratation induite par l'exercice (1 à 4 % de la masse corporelle) sur la température rectale lors d'un exercice de 120 min à vélo (33 °C, 50 % d'humidité et 9 km · h<sup>-1</sup> de vent)..... 33

**Figure 10.** Possible effet médiateur de la perception de l'effort dans la relation entre la déshydratation induite par l'exercice et la diminution de la performance d'endurance. .. 37

**Figure 11.** Impact graduel de la déshydratation induite par l'exercice (1 à 4 % de la masse corporelle) sur la perception de l'effort lors d'un exercice de 120 min à vélo (33 °C, 50 % d'humidité et 9 km · h<sup>-1</sup> de vent)..... 38

**Figure 12.** Graphique en forêt présentant l'effet combiné pondéré de l'hypohydratation préexercice sur la performance d'endurance. .... 41

**Figure 13.** Variabilité interindividuelle dans la réponse de la performance d'endurance lorsque hypohydraté. Les croix représentent les changements de performance des individus. Les ronds noirs et les barres représentent le changement de performance moyen ± déviation standard. Ces 3 études utilisaient une période de vélo à intensité fixe suivie d'un contre-la-montre de 15-30 min où le travail total (kJ) était mesuré (vent faible : 0 à 7km/h). Les % indiqués en bas de la figure correspondent aux % d'hypohydratation au début du test de performance. .... 44

**Figure 14.** Effet de l'hypohydratation de 2,5 % de la masse corporelle sur (a) la performance d'endurance, (b) la perception de l'effort et (c) la fréquence cardiaque avant (pré) et après (post) 4 séances d'habituatation à l'hypohydratation faible. \* p < 0,05 EUH vs. DEH (effet d'hydratation), \$ p < 0,05 pré vs. post (effet d'habituatation). EUH = euhydraté, DEH = déshydraté..... 53

**Figure 15.** Relation entre l'impact initial de l'hypohydratation et la magnitude du changement de la performance en étant hypohydraté à la suite d'un protocole d'habituatation. Légende : a indique les 25 % de ceux les plus impactés par l'hypohydratation; b indique les 25 % de ceux les moins impactés. Zone grise : coefficient normal d'une performance d'endurance fixée à 1,5 %. IC 95 % = intervalle de confiance à 95 %, pp = points de pourcentage. .... 156

**Figure 16.** Relation entre osmolalité plasmatique et perception de la soif. AU = unité arbitraire, IC 95 % = intervalle de confiance à 95 %, EUH = euhydraté, DEH = déshydraté. Les valeurs présentées sont les valeurs d'osmolalité plasmatique et de soif récoltées à la fin de la période d'exercice à intensité fixe, juste avant le contre-la-montre. .... 158

**Figure 17.** Augmentation de la soif à la fin du contre-la-montre en étant hypohydraté selon la condition et le temps. AU = unité arbitraire, IC 95 % = intervalle de confiance à 95 %, EUH = euhydraté. .... 159

## LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES

ACSM	<i>American College of Sports Medicine</i>	
ADH	<i>Antidiuretic hormone</i> ou hormone antidiurétique	[pg · mL <sup>-1</sup> ]
AU	<i>Arbitrary unit</i> ou unité arbitraire	[AU]
c.-à-d.	C'est-à-dire	
CCA	Cortex cingulaire antérieur	
CI	Cortex insulaire	
CV	<i>Coefficient of variation</i> ou coefficient de variation	[%]
DEH	<i>Dehydrated</i> ou déshydraté	
EID	<i>Exercise-induced dehydration</i> ou déshydratation induite par l'exercice	
EUH	<i>Euhydrated</i> ou Euhydraté	
HYPO	<i>Hypohydrated</i> ou hypohydraté	
IC 95 %	Intervalle de confiance à 95 %	
MnPO	Noyau préoptique médian	
O <sub>2</sub>	Dioxygène	
OVLT	Organe vasculaire de la lame terminale	
P <sub>max</sub>	Puissance maximale	[W]
pp	Points de pourcentage	[pp]
RH	<i>Relative humidity</i> ou humidité relative	[%]
RPE	<i>Rating of Perceived Exertion</i> ou perception de l'effort	[AU]
SD	<i>Standard deviation</i> ou déviation standard	

SFO	Organe subfornical	
SRAA	Système rénine-angiotensine-aldostérone	
TRPV1	<i>Transient receptor potential vanilloïde 1</i>	
USG	<i>Urine specific gravity</i> ou gravité spécifique de l'urine	[g · mL <sup>-1</sup> ]
VES	Volume d'éjection systolique	[mL]
$\dot{V}O_{2\max}$	Consommation maximale d'oxygène	[mL · min <sup>-1</sup> · kg <sup>-1</sup> ]
W	Watts	[W]
WBGT	<i>Wet-bulb globe temperature</i>	[°C]
$\Delta$	Delta (différence entre deux grandeurs)	

## CHAPITRE I. INTRODUCTION

Ensemble, les données issues des évidences épidémiologiques, climatologiques et sanitaires sont sans équivoque et indiquent une augmentation des vagues de chaleur et de leurs conséquences sur la santé d'ici la fin du XXI<sup>e</sup> siècle (Bush & Lemmen, 2019; Clark et al., 2021; GIEC, 2015). Selon les divers scénarios d'émissions de gaz à effet de serre, appelés « profils représentatifs d'évolution de concentration » (ou RCP), une augmentation moyenne de la température à la surface de la Terre de 1 à 4 °C est estimée d'ici 2100 (GIEC, 2015), avec de grandes disparités entre les régions. L'humain est et sera donc amené à évoluer dans un environnement de plus en plus chaud (Grundstein et al., 2013; Maloney & Forbes, 2011), y compris au Québec (Ouranos, 2015). Par ailleurs, les enjeux de disponibilité en eau sont de plus en plus présents, en raison de l'accroissement de la demande mondiale, elle-même liée à la forte croissance démographique et à l'élévation du niveau de vie. Ces enjeux sont réels, y compris au Canada, puisque les conséquences présentes et futures des changements climatiques sont doubles : réduction de la quantité (sécheresse, fonte des glaciers et des réserves d'eau douce, etc.) et de la qualité de l'eau disponible (contamination des réserves lors des inondations/montée des océans et destructions des systèmes de récupération et de traitement des eaux usées) (Loudière & Gourbesville, 2020).

Ces changements climatiques ont et auront des impacts démographiques, socio-économiques, sociosanitaires et environnementaux sans précédent. Ils affecteront inévitablement les diverses sphères de l'activité physique, incluant les activités récréatives de loisirs, mais aussi les activités sportives et de travail (Bernard et al., 2021). Les personnes à faible revenu, atteintes de maladies chroniques et âgées en seront, sans doute, les plus touchées (Bernard et al., 2021). Or, dans une autre perspective, divers corps de métiers (militaires, pompiers, services médicaux d'urgence, etc.) ainsi que certains athlètes sont fréquemment appelés à se déplacer et à performer physiquement, tout en maintenant un haut niveau de performance cognitive, parfois pendant plusieurs journées consécutives, dans des environnements chauds, où l'accessibilité à l'eau est parfois restreinte, les prédisposant ainsi à l'hypohydratation et ses conséquences.



Une faible proportion de mammifères, dont l'humain, maintient sa température interne par la production et l'évaporation de sueur pendant l'exercice et/ou l'exposition à la chaleur (Lieberman, 2015). Bien que ce mécanisme de thermolyse soit l'un des plus efficaces, il induit des pertes d'eau corporelle, et d'électrolytes, qui peuvent s'avérer importantes. L'eau est l'élément le plus présent dans l'organisme et assure de multiples rôles essentiels à son bon fonctionnement, notamment lors de la réalisation d'une activité physique. Il n'est donc pas surprenant que, si suffisamment importants, la déshydratation et le stress thermique, qui par ailleurs sont fréquemment vécus de manière conjointe, altèrent les performances physiques et cognitives, et ce, proportionnellement au stress induit. À cet égard, même si cela est contesté (Goulet, 2011; 2013), l'exposition aiguë à l'hypohydratation induite par l'exercice, notamment  $\geq 2$  % de la masse corporelle, est généralement associée à une altération des fonctions physiologiques, de la performance d'endurance et des fonctions cognitives (Sawka et al., 2007). Plus précisément, il est fréquemment mentionné qu'ensemble, les impacts physiologiques et subjectifs induits par la déshydratation pourraient contribuer à augmenter la perception de l'effort, qui à son tour, agirait comme un médiateur central de la performance d'endurance.

Concernant le stress thermique, plusieurs stratégies de mitigation peuvent être mises en place pour en réduire l'impact sur la physiologie et la performance humaines (Périard et al., 2021). Par exemple, il est bien démontré que l'humain peut s'acclimater à la chaleur en s'y exposant fréquemment et ainsi en réduire les effets néfastes (Périard et al., 2015). Ce phénomène est-il possible pour la déshydratation ? Autrement dit, est-il possible de réduire les effets néfastes de la déshydratation sur la performance humaine en s'y exposant fréquemment ? Certaines évidences soutiennent cette possibilité et démontrent que plusieurs expositions à l'hypohydratation aiguë pourraient, en partie, réduire le stress qu'elle occasionne, notamment sur la perception de l'effort, et donc ses impacts négatifs sur la performance d'endurance (Fleming & James, 2014). Toutefois, l'idée que l'humain puisse s'habituer à la déshydratation n'a été discutée que de manière superficielle et anecdotique. De nombreuses questions restent sans réponses et se doivent d'être davantage étudiées. C'est donc dans ce contexte et cette perspective que s'inscrit la présente thèse.

Le second chapitre de cette thèse permettra d'introduire le concept d'équilibre hydrique et ses mécanismes de régulation à l'exercice, de faire une revue exhaustive des impacts de la déshydratation induite par l'exercice sur la physiologie et la performance humaines et de synthétiser la littérature ayant vérifié s'il est possible de s'habituer à la déshydratation en s'y exposant fréquemment. Dans son ensemble, cette revue de la littérature permettra aux lecteurs de mieux comprendre le contexte dans lequel s'inscrivent les résultats des travaux exposés dans le troisième chapitre. Enfin, le dernier chapitre permettra de discuter des résultats et des retombées inhérentes.

## CHAPITRE II. REVUE DE LA LITTÉRATURE

### 2.1. Mythe de l'abondance en eau : impacts des changements climatiques

L'eau a toujours été et demeurera une ressource essentielle à la vie. L'histoire le démontre, comme en témoigne le fait que toutes les grandes civilisations, et plus récemment les villes, se sont installées et développées à proximité ou autour d'étendues d'eau et d'axes fluviaux majeurs. Si les fleuves permettent un approvisionnement continu en eau, ils ont aussi longtemps servi de système d'assainissement. L'Organisation Mondiale de la Santé mentionne que le minimum vital quotidien par personne pour répondre aux besoins fondamentaux d'hydratation et d'hygiène personnelle est de 20 litres (OMS, 2013). Le tableau 1 ci-bas représente la consommation d'eau domestique quotidienne par habitant selon certains pays. À titre d'exemple, en 2019 chaque Québécois consommait en moyenne 411 litres d'eau par jour, dont 215 litres pour l'utilisation résidentielle<sup>1</sup>.

Tableau 1. Consommation d'eau domestique par pays<sup>2</sup>.

Pays	Consommation quotidienne (litres/personne)
Canada, États-Unis, Japon, Australie, Suisse	> 250
Finlande, Italie, Espagne, Portugal, Corée du Sud, Grèce, Suède	160-250
Danemark, Royaume-Uni, Autriche, France, Luxembourg, Irlande	130-160
Allemagne, Pays-Bas, Belgique, Hongrie, Bulgarie, Pologne, République Tchèque	< 130
Asie et Amérique latine	50-100
Afrique sub-saharienne	10-20

<sup>1</sup> Source : Enquête sur les usines de traitement de l'eau potable, 2019. Diffusé le 17 août 2021 par Statistique Canada.

<sup>2</sup> Source : créé à partir des données disponibles sur le site internet du Centre d'Information sur l'Eau (CIEAU).

Avoir un accès facile et fiable à l'eau potable est généralement perçu comme fondamental, évident et normal, surtout dans les pays occidentaux. Toutefois, de nombreuses régions dans le monde ne jouissent toujours pas de ce privilège, et certaines localités, même dans les pays les plus développés, souffrent épisodiquement d'un accès restreint voir nul à cette ressource (Mekonnen & Hoekstra, 2016). Par exemple, cela s'est illustré en 2008 à Barcelone, qui a vécu une crise d'eau majeure; dans la mégalopole São Paulo à l'été 2015, qui a vécu rationnement et coupures d'eau; ainsi qu'en 2021 et 2022 avec la sécheresse historique en Californie et en France, respectivement. Le Canada, quant à lui, n'est pas épargné par les sécheresses et plusieurs communautés autochtones manquent d'eau potable. Bien que le Canada possède 20 % des réserves mondiales d'eau douce, et que la croyance que la ressource en eau est infinie, le plus récent rapport du consortium scientifique Ouranos souligne que les changements climatiques affecteront la disponibilité et la qualité, et donc l'approvisionnement en eau potable au Québec (Alberti-Dufort et al., 2022; Carlson et al., 2021). Les chiffres sont éloquentes puisqu'à ce jour, dans le monde, 2,3 milliards de personnes vivent en situation de stress hydrique (entre 500 et 1000 m<sup>3</sup> d'eau par an et par habitant), dont 733 millions en situation de stress hydrique élevé et critique (< 500 m<sup>3</sup> par an et par habitant) (UN-Water 2021). Environ 4 milliards de personnes, représentant près des deux tiers de la population mondiale, connaissent une grave pénurie d'eau pendant au moins un mois de l'année, même en Amérique du Nord (Mekonnen & Hoekstra, 2016).

Il est estimé que les changements climatiques pourraient exacerber cette situation, en affectant non seulement la quantité et la régularité saisonnière d'eau potable disponible, mais aussi sa qualité (Alberti-Dufort et al., 2022; Carlson et al., 2021; Gouvernement du Canada, 2003). *In fine*, cela pourrait compromettre la capacité de répondre aux besoins des populations, alors que ces derniers sont amenés à grandir dû notamment à l'accroissement de la population et la hausse de l'utilisation en eau pour la production agricole et les besoins urbains (ex : utilisation de l'air conditionné). Cette situation est d'autant plus problématique que le manque d'eau survient, la plupart du temps, lors des sécheresses estivales, quand la température ambiante est à son maximum ce qui impose deux stress à l'organisme : thermique et hydrique. Les changements climatiques augmentent donc la

probabilité de survenue d'aléas, comme les sécheresses parmi d'autres (GIEC, 2015). Pour tenter de limiter les effets et les conséquences de ces aléas, deux grandes approches sont proposées (GIEC, 2015). Les mesures d'atténuation, qui visent à limiter l'impact de notre mode de vie sur les changements climatiques pour en réduire l'ampleur et donc restreindre les aléas à l'intérieur de valeurs acceptables. Les mesures d'adaptation visent, elles, à réduire la vulnérabilité de la population lors de la survenue des aléas.

Il est possible d'imaginer que les humains peuvent s'adapter aux changements climatiques via des adaptations physiologiques, comportementales, infrastructurelles et/ou technologiques, parmi d'autres (Hondula et al., 2015). Par exemple, parmi les adaptations physiologiques souvent mentionnées se trouve l'acclimatation à la chaleur, qui permet à l'humain de mieux la tolérer lorsque fréquemment exposé à cette dernière. La question se pose donc : une telle acclimatation est-elle possible pour le stress hydrique ? Autrement dit, l'humain peut-il s'adapter au manque d'eau chronique, comme c'est le cas pour certains animaux qui vivent dans des régions à fort stress hydrique/thermique. Si cette possibilité existe, alors cette approche pourrait être utilisée, conjointement à plusieurs autres mesures d'adaptation (comportementales, infrastructurelles et/ou technologiques) pour tenter de réduire la vulnérabilité de la population, ou du moins d'une certaine partie de celle-ci, aux impacts du stress hydrique qui est appelé à être de plus en plus fréquent. Dans une perspective plus large, cela démontre le rôle que peut jouer la recherche en physiologie de l'exercice, dépassant largement le domaine disciplinaire des sciences de l'activité physique, afin de contribuer à l'effort interdisciplinaire inhérent à la recherche sur les changements climatiques. Plus spécifiquement, cette contribution peut se concrétiser en (1) fournissant des détails mécanistiques qui décrivent comment l'état physiologique d'un organisme change (c.-à-d. s'adapte) à mesure que l'environnement dans lequel il évolue se modifie et en (2) établissant des prédictions sur la façon dont ces adaptations pourraient modifier le fonctionnement humain et sa capacité de performer à mesure que l'environnement continue de se réchauffer (Stillman, 2019).

## **2.2. Équilibre hydrique : définitions et concepts**

Maintenir un bon état d'hydratation est primordial puisque l'eau est un élément essentiel qui intervient dans la régulation de nombreux processus physiologiques. Après avoir présenté les rôles de l'eau dans l'organisme et les définitions/concepts clés, les mécanismes qui interviennent dans la régulation de l'équilibre hydrique seront détaillés.

### 2.2.1. L'eau : constituant essentiel de l'organisme

L'eau est l'élément le plus présent dans l'organisme et constitue  $60 \pm 15$  % de la masse corporelle d'un individu, soit  $\sim 42$  L chez un adulte de 70 kg (EFSA, 2010; Jéquier & Constant, 2010). Une certaine variabilité interindividuelle existe et est principalement inhérente aux différences de composition corporelle, la masse hydrique totale étant inversement proportionnelle à la masse grasse et étroitement liée à la masse musculaire (Wang et al., 1999). Ainsi, la masse maigre contient 70-75 % d'eau (Wang et al., 1999). Environ deux tiers de l'eau corporelle totale se trouvent dans les cellules (compartiment intracellulaire) et le reste dans le compartiment extracellulaire, représentant 28 et 14 L respectivement pour un individu de 70 kg. Le liquide extracellulaire comprend le liquide interstitiel (11 L) et plasmatique (3 L) (EFSA, 2010; Jéquier & Constant, 2010). Parmi ses rôles fondamentaux, l'eau constitue le milieu de toutes les réactions chimiques de l'organisme, elle contribue à la formation des cellules et des liquides corporels (salive, liquide synovial, sucs digestifs, liquide céphalo-rachidien, etc.) et permet l'élimination des déchets par la production d'urine (EFSA, 2010; Jéquier & Constant, 2010). Elle intervient également dans la composition du sang (plasma) et assure donc le transport des nutriments et de l'oxygène, le maintien de la fonction cardiovasculaire et contribue à la thermorégulation par le transport de chaleur vers la périphérie et le processus de sudation.

### 2.2.2. Mouvements d'eau entre le compartiment intra et extracellulaire : rôle de l'osmolalité

Puisque les capillaires et les membranes des cellules sont perméables à l'eau, cette dernière diffuse dans l'ensemble des compartiments de l'organisme selon des gradients osmotiques, oncotiques et hydrostatiques, ce qui signifie que les valeurs d'eau dans les différents

compartiments de l'organisme ne sont pas fixes. Les mouvements d'eau de part et d'autre d'une membrane perméable sélective sont induits par des changements de concentration dans l'un des deux compartiments : c'est le principe d'osmose. Plus spécifiquement, l'eau diffuse d'une région à faible concentration en soluté (haute concentration hydrique) vers une autre à haute concentration en soluté (faible concentration hydrique) (Guyton & Hall, 2006). Ces mouvements d'eau interviennent jusqu'à ce que la même concentration en soluté soit atteinte de part et d'autre de la membrane. Ce concept permet d'introduire celui d'osmolalité, qui représente la quantité de molécules osmotiquement actives par kg de solvant ( $\text{mOsmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ ). Plus l'osmolalité est élevée, plus la concentration en eau est faible et *vice versa*. Dans le sang, ces molécules, dont les principales sont le sodium, le glucose et l'urée, disposent d'un fort pouvoir attractif envers l'eau. Les principaux solutés présents dans le plasma et le liquide intracellulaire sont présentés dans le Tableau 2.

Tableau 2. Répartition des principaux solutés osmotiquement actifs ( $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ )<sup>3</sup>.

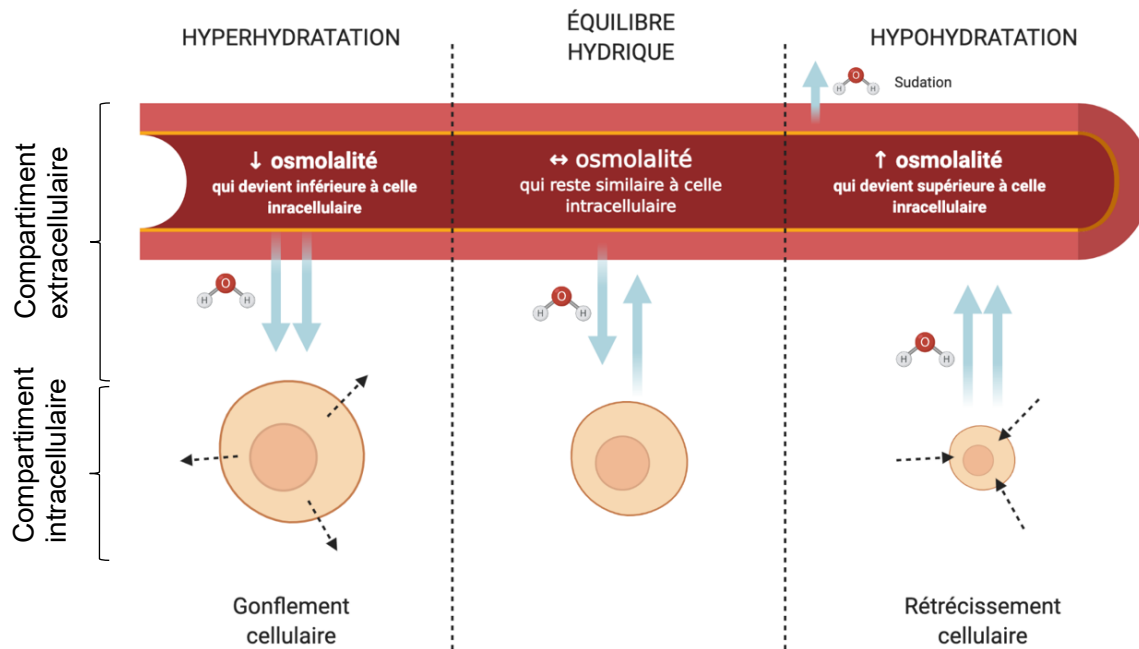
	Plasma	Liquide intracellulaire
Sodium	142	14
Potassium	4,2	140
Calcium	1,3	0
Magnésium	0,8	20
Chlorure	108	4
Bicarbonate	24	10
Glucose	5,6	-
Urée	4	4
Osmolalité totale (corrigée <sup>4</sup> )	301,8 (282)	301,2 (281)

<sup>3</sup> Source : reproduit et modifié à partir du tableau 25-2 du chapitre 25 - The body fluids and Kidneys (Guyton & Hall, 2006).

<sup>4</sup> Cette correction est nécessaire puisque les molécules et les ions d'une solution donnée exercent une attraction ou une répulsion entre eux. Ces effets peuvent induire une légère variation de l'activité osmotique des substances dissoutes. L'exemple le plus connu est avec le chlorure et le sodium. En solution ces deux ions n'agissent pas de manière isolée, mais interagissent sous forme de NaCl, ce qui réduit l'osmolalité comparativement à une situation fictive où ces deux ions agiraient de manière isolée.

Toutefois, ces molécules ne diffusent pas aussi facilement que l'eau à travers la membrane cellulaire. Ainsi, lorsque leur concentration devient plus importante dans un compartiment, elles attirent l'eau d'un autre compartiment qui diffuse librement à travers la membrane. Ce mouvement permet *in fine* de rééquilibrer les concentrations de part et d'autre de la membrane. Les mouvements d'eau induits par osmose engendrent des modifications structurelles au niveau cellulaire. La Figure 1 permet de visualiser ce processus. Par exemple, lorsque l'osmolalité du compartiment extracellulaire diminue et devient inférieure à celle du compartiment intracellulaire (hyperhydratation, partie de gauche du schéma), alors l'eau est attirée et diffuse vers la cellule, causant le gonflement de cette dernière. L'inverse est aussi vrai, lorsque l'osmolalité plasmatique augmente en raison d'une perte de liquide au niveau extracellulaire et devient supérieure à celle du liquide intracellulaire (sudation, partie de droite du schéma), alors l'eau à l'intérieur des cellules est attirée et diffuse vers le compartiment extracellulaire afin de rééquilibrer les concentrations. Puisque l'eau quitte la cellule, cette dernière verra sa taille diminuer. L'état résultant, appelé déshydratation intracellulaire, est celui qui représente le mieux ce qu'il se passe lors de la déshydratation induite par l'exercice et semble être celui qui intervient au niveau cérébral dans la détection de la soif (voir section 2.3.2).





**Figure 1.** Mouvements d'eau entre le compartiment intra et extracellulaire<sup>5</sup>. Les flèches pleines bleues représentent les mouvements d'eau. Les flèches en pointillés noirs représentent les modifications structurales cellulaires.

Puisque l'eau assure de multiples fonctions, l'homéostasie hydrique est donc essentielle au fonctionnement de l'organisme, notamment lors de l'exercice. Cependant, avant de présenter les mécanismes de régulation de l'équilibre hydrique une définition des principaux concepts clés ainsi que des principales méthodes de mesure s'impose.

### 2.2.3. Équilibre hydrique

#### 2.2.3.1. *Définitions, concepts et mesures*

Les définitions suivantes sont le fruit d'une traduction libre de celles présentées par McDermott et al., (2017).

L'**équilibre hydrique** réfère à un état dans lequel les apports hydriques compensent les pertes. Le terme **euhydratation** est justement employé pour caractériser cet état où la quantité d'eau corporelle totale est adéquate et maintenue dans les normes physiologiques de référence (apports = pertes). Puisque les pertes se produisent en continu, mais que les

<sup>5</sup> Figure créée avec BioRender.com.

apports sont, eux, sporadiques, l'euhydration reflète un processus dynamique (courbe sinusoïdale) plutôt qu'un point statique/fixe (Chevront & Sawka, 2005). Dans la littérature, il est fréquemment mentionné que la variation normale de l'eau corporelle totale se situe à l'intérieur d'un changement de 2 %, ce qui correspond à un changement de 1 % de la masse corporelle. Ainsi, toute variation de  $\pm 1$  % de la masse corporelle est généralement considérée comme une variation « normale », délimitant l'euhydration (Chevront & Kenefick, 2014). La masse corporelle de base pour caractériser l'état d'euhydration peut être déterminée en faisant la moyenne de prises consécutives (le matin, après avoir uriné) sur trois jours (Chevront et al., 2004). Dans la majorité des études, l'apport hydrique des participants est contrôlé près de leur arrivée au laboratoire, et la masse corporelle est prise comme valeur de base à l'arrivée, après avoir uriné. D'autres variables, urinaires et sanguines, sont collectées à l'arrivée des participants et permettent, ensemble, de vérifier l'état d'euhydration. Ces dernières sont décrites plus bas.

Un **déséquilibre hydrique** se définit donc comme tout écart de l'eau corporelle totale  $\geq$  à 1 % de la masse corporelle. Il existe deux situations où l'équilibre hydrique est rompu : l'**hypohydration** et l'**hyperhydration**. La première reflète un état stable de déficit d'eau corporelle, tandis que la seconde traduit un état stable de surplus d'eau corporelle. Bien que les termes hypohydration et **déshydration** soient fréquemment utilisés de manière interchangeable, ils représentent des concepts différents. En effet, la déshydration reflète, elle, le processus de perte d'eau corporelle non compensée (c.-à-d. passer d'un état hyperhydraté à euhydraté ou d'un état euhydraté à hypohydraté). Par exemple, pendant l'exercice, l'eau est essentiellement perdue par la sudation. Les pertes d'eau induites par la production d'urine, la respiration, les fèces (spécifiquement lors de diarrhées) ou vomissements peuvent aussi induire une déshydration. Dans un contexte d'exercice, l'hypohydration peut être présente dès l'initiation de l'activité, on parle alors d'hypohydration préexercice. De plus, la déshydration peut se développer progressivement au cours de l'activité, il s'agit, dans ce cas, de déshydration induite par l'exercice. Récemment, le terme **sous-hydration** a été introduit (Kavouras, 2019) et est caractérisé par un faible apport hydrique sans déficit hydrique (maintien de l'osmolalité plasmatique dans des valeurs normales, pas de sensation de soif), puisque les mécanismes

de conservations homéostatiques sont activés (augmentation des concentrations plasmatiques d'hormone antidiurétique ou ADH ce qui favorise la production d'une urine plus concentrée). Toutefois, ce concept est davantage applicable à un contexte de vie quotidienne/situation de sédentarité plutôt qu'à l'exercice. Dans le reste de la présente thèse, le terme déshydratation sera davantage utilisé. Néanmoins, à certaines occasions le terme hypohydratation sera préféré puisque, dans certains cas, les tests de performance (endurance et cognition) étaient effectués dans des états fixes d'hypohydratation, eux-mêmes atteints à la suite d'une période de déshydratation induite par l'exercice, c.-à-d. un exercice d'intensité fixe avec restriction hydrique pour atteindre une hypohydratation faible (2 %) ou modérée (4 % de la masse corporelle).

Bien que cette méthode contienne plusieurs limites, la mesure des changements de masse corporelle est utilisée, autant en recherche qu'en pratique, pour estimer les changements d'eau corporelle totale sur la base de la relation suivante : 1 kg = 1 L (Maughan, 2012; Maughan et al., 2007). Cela permet aussi d'estimer les pertes sudorales et le taux de sudation. À titre d'exemple, pour un individu de 70 kg en situation d'euhydratation, une déshydratation de 1,4 kg lors d'un exercice de 1 heure 30 équivaut à une hypohydratation de 2 % de la masse corporelle (selon l'équation [1]). Si ce dernier consomme 500 mL de liquides et n'urine pas pendant l'exercice alors ses pertes sudorales atteignent 1,9 L (équation [2]), ce qui équivaut à un taux de sudation de 1,27 L · h<sup>-1</sup> (équation [3]).

$$\frac{\Delta \text{Masse corporelle exercice}}{\text{Masse corporelle avant exercice}} \times 100 \quad [1]$$

$$\Delta \text{Masse corporelle exercice} + \text{eau bue} - \text{urine produite} \quad [2]$$

$$\frac{\Delta \text{Masse corporelle exercice} + \text{eau bue} - \text{urine produite}}{\text{Durée d'exercice}} \quad [3]$$

$\Delta$ Masse corporelle exercice représente le changement de masse corporelle induit pendant l'exercice (avant–après) en Kg, l'eau bue et l'urine produite en litres et la durée d'exercice en heures.

Lors d'exercices d'endurance prolongés il est recommandé de prendre en compte les pertes de masse liées à l'oxydation des substrats (Maughan et al., 2007) et aux échanges respiratoires (Mitchell et al., 1972) dans l'équation [2]. Toutefois, il a été démontré que lors d'exercices d'une durée allant jusqu'à 4 heures, la relation entre ces deux paramètres (c.-à-d. 1 kg = 1 L) est très étroite et est peu influencée par d'autres sources de pertes de masse corporelle (ex : oxydation des substrats, échanges respiratoires) (Cheuvront et al., 2002). D'autres marqueurs, dérivés du sang (osmolalité plasmatique, natrémie et hématoците), de l'urine (gravité spécifique urinaire et osmolalité urinaire) et des perceptions (soif et sécheresse de la bouche) sont fréquemment utilisés pour estimer le statut hydrique (Armstrong, 2007). Les principaux sont présentés dans le Tableau 3 ci-dessous. L'utilisation de ces marqueurs se fait dans un cadre très disciplinaire, avec d'un côté la médecine clinique qui utilise plutôt les marqueurs sanguins (natrémie et osmolalité) et, de l'autre, la médecine sportive qui utilise fréquemment les marqueurs urinaires (Lacey et al., 2019). Bien qu'il n'existe pas de mesures de référence reconnues pour délimiter les niveaux d'hydratation en état stable, l'osmolalité plasmatique constitue à ce jour la méthode la plus pratique et valide dans un contexte de laboratoire (Armstrong, 2005; 2007). De plus, il apparaît qu'une seule et unique méthode n'est pas suffisante pour représenter adéquatement la complexité et l'aspect dynamique de l'équilibre hydrique (Armstrong, 2007). Cette observation renforce l'idée qu'utiliser une approche interdisciplinaire combinant plusieurs méthodes conjointes constitue la stratégie optimale à privilégier (Cheuvront & Sawka, 2005). Si l'osmolalité de l'urine est une mesure de concentration de l'urine qui est influencée par le nombre de particules dans une solution, la gravité spécifique de l'urine (USG) représente, quant à elle, la densité de l'urine, comparativement à celle d'un volume équivalent d'eau distillée. Puisque la densité de l'eau distillée est de  $1 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$ , cela explique pourquoi les valeurs d'USG sont toujours  $> 1 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$ . Cette dernière est donc influencée par le nombre de particules, mais également par leur masse.

Dans la littérature du domaine de la médecine sportive, les indices urinaires sont fréquemment utilisés de manière dichotomique pour classifier des individus comme étant « déshydratés/hypohydratés ». Or, il est important de noter que de nombreuses évidences démontrent que ces indices manquent de sensibilité pour détecter la déshydratation

intracellulaire (Hew-Butler et al., 2018). En fait, de telles valeurs reflètent une réponse/un processus physiologique normal (c.-à-d. la capacité des reins à conserver l'eau) plutôt qu'un état hydrique donné. Cela est très bien démontré par le fait que certains individus ont une urine très concentrée (USG et osmolalité urinaire  $\geq$  aux seuils présentés dans le tableau 3), mais des valeurs d'osmolalité plasmatique et de natrémie dans les normes de référence. En réalité, une telle situation est le reflet de l'activation des processus de conservation de l'eau au niveau rénal afin de maintenir l'équilibre hydrique en produisant une urine plus concentrée. Cela laisse donc suggérer une sous-hydratation plutôt qu'une hypohydratation (Kavouras, 2019).

Tableau 3. Principaux marqueurs de déshydratation et seuils associés rapportés dans la littérature<sup>6</sup>.

Marqueur	Méthode de mesure	Applicabilité terrain	Seuil de « déshydratation »
Osmolalité plasmatique	Osmomètre	Faible	$> 295 \text{ mOsmol} \cdot \text{kg}^{-1}$
Natrémie	Diverses	Moyenne	$> 145 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$
Osmolalité urinaire	Osmomètre	Moyenne	$\geq 700 \text{ mOsmol} \cdot \text{kg}^{-1}$
Gravité spécifique de l'urine	Réfractomètre	Élevée	$\geq 1,020 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$
Changement de masse corporelle	Balance	Élevée	$\geq 1 \%$

### 2.2.3.2. Exemple de régulation en situation de sédentarité

Au quotidien, en situation de sédentarité, l'équilibre hydrique est relativement constant puisque, de manière générale, les apports hydriques compensent adéquatement les pertes. Les apports hydriques proviennent de trois sources : les liquides consommés par voie orale

<sup>6</sup> Inspiré de Sawka et al., (2007) et modifié à partir des données de Perrier et al., (2021). Les seuils présentés sont les plus couramment utilisés. Les lecteurs sont référés à Perrier et al., (2021) pour de plus amples informations concernant ces seuils.

(60 %), l'eau provenant des aliments ingérés (30 %) et l'eau métabolique issue de l'oxydation des substrats (10 %) (EFSA, 2010; Jéquier & Constant, 2010). Les pertes hydriques, quant à elles, découlent majoritairement de l'excrétion de l'urine (60 %) et des pertes insensibles (peau, respiration, fèces; 40 %) (EFSA, 2010; Jéquier & Constant, 2010). Quotidiennement, en situation de sédentarité, environ 5 à 10 % de l'eau corporelle totale est renouvelée (2-3 L).

Contrairement à un état de sédentarité, à l'exercice, c'est la sudation qui constitue la principale avenue de pertes hydriques. À ce titre, des taux de sudation moyens de 0,5 à 2 L · h<sup>-1</sup> (Baker et al., 2016) sont classiquement observés dépendamment de l'intensité de l'exercice, de l'environnement, de l'équipement porté, du sexe, du niveau d'entraînement et du niveau d'acclimatation à la chaleur de l'individu, entre autres. Si ces pertes ne sont pas adéquatement balancées par un apport hydrique suffisant, plusieurs mécanismes compensatoires sont mis en branle afin de tenter de rétablir l'équilibre hydrique. Ces mécanismes agissent de concert afin de tenter de maintenir l'osmolalité plasmatique à l'intérieur des valeurs physiologiques de référence : 280-295 mOsmol · kg<sup>-1</sup>.

## **2.3. Pertes et apports hydriques lors de l'exercice : mécanismes de régulation**

### **2.3.1. Pertes hydriques**

#### *2.3.1.1. Sudation : des pertes hypotoniques*

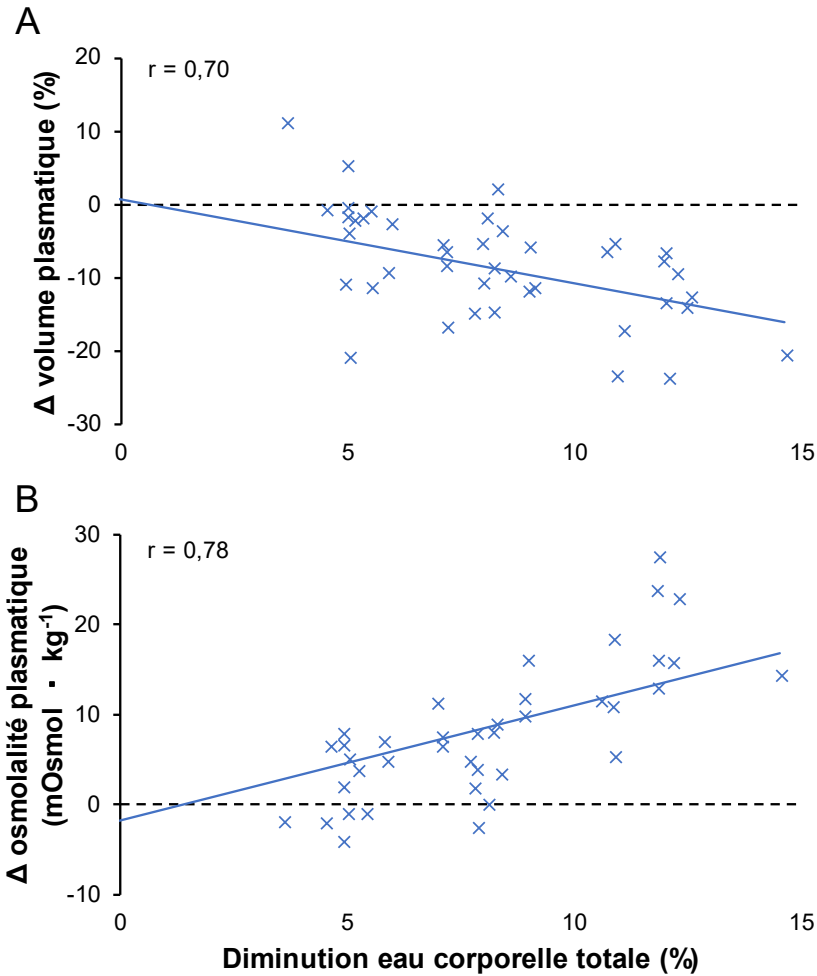
L'augmentation de la production de chaleur métabolique liée à l'intensité de l'exercice et l'augmentation de la température ambiante sont parmi les principaux facteurs qui, de manière isolée (exercice ou chaleur uniquement) ou combinée (exercice à la chaleur), déclenchent et provoquent les pertes hydriques par la sueur. En effet, ces stress induisent plusieurs réponses physiologiques marquées par (1) une vasodilatation périphérique et une redistribution sanguine cutanée afin de favoriser les pertes de chaleur sèches par convection, conduction et radiation et (2) le déclenchement de la sudation, dont l'évaporation favorise la thermolyse, puisque chaque gramme de sueur évaporée permet l'élimination de 0,58 kcal (2,43 kJ) sous forme de chaleur (Wenger, 1972). La contribution de ces mécanismes dans la thermolyse lors de l'exercice dépend principalement du gradient

entre la température ambiante et celle de la peau (Sawka et al., 2012). Si en conditions fraîches, le refroidissement se fait principalement par convection, ce mécanisme devient presque nul lorsque la température ambiante devient supérieure à celle de la peau ( $\sim 35$  °C). Ainsi, plus la température ambiante augmente, plus la contribution de la convection diminue, tandis que celle de l'évaporation augmente. En revanche, l'évaporation de la sueur diminue lorsque l'humidité ambiante augmente, puisque l'air est chargé en vapeur d'eau, ce qui réduit la capacité évaporative de l'environnement. Dans ce contexte, la sueur reste sur la peau ou tombe au sol, réduisant par le fait même l'effet refroidissant. De manière générale, pour un exercice réalisé à l'air, les pertes de chaleur par conduction sont presque nulles (Sawka et al., 2012). Ensemble, ces mécanismes permettent de maintenir la température interne dans les normes physiologiques. Ce sont majoritairement les glandes eccrines qui interviennent dans le processus de sudation (Baker, 2019; Wingo et al., 2018). Ces dernières répondent principalement à un stimulus thermique (augmentation de la température interne, de la peau et du débit sanguin cutané), bien que certains stimuli non thermiques liés à l'exercice opèrent (mécanorécepteurs, osmorécepteurs et barorécepteurs) (Baker, 2019; Shibasaki & Crandall, 2010). Les glandes eccrines sont stimulées par l'activité sympathique cholinergique (et adrénergique dans une moindre mesure) et par la fixation de l'acétylcholine sur le récepteur muscarinique de la membrane basolatérale des cellules du glomérule (Sato, 1977). Cela déclenche la filtration de la sudation primaire, iso-osmotique par rapport au plasma, en filtrant le contenu liquidien du compartiment extracellulaire. Les mouvements d'eau suivent un gradient osmotique créé par l'entrée des ions sodium et chlorure dans la lumière du glomérule (Baker, 2019). Au fur et à mesure du cheminement de la sudation primaire dans le canal excréteur, les ions sodium (transport actif, pompe sodium-potassium-ATPase sous la dépendance de l'aldostérone (Sato & Dobson, 1970) et chlorure (transport passif)) sont réabsorbés, produisant une sueur finale hypotonique par rapport au plasma (Baker, 2019). À l'exercice, les concentrations de sodium dans la sueur atteignent 10 à 90 mmol  $\cdot$  L<sup>-1</sup> dépendamment de l'intensité de l'exercice, du niveau d'entraînement et d'acclimatation à la chaleur, entre autres (Baker, 2019). Si les concentrations de sodium dans la sueur sont peu influencées par le sexe, les pertes totales de sodium (en mg) sont généralement plus importantes chez les hommes, en raison, notamment, de leur taux de sudation qui est plus important (Barnes et al., 2019).

Ceci explique pourquoi les pertes d'eau par la sudation sont caractérisées comme étant hypotoniques relativement au plasma. Les concentrations de sodium dans la sudation sont d'autant plus grandes que le taux de sudation (Buono et al., 2008) et donc l'intensité de l'exercice, est élevée (Baker et al., 2019). Lors de l'exercice à la chaleur ( $> 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), l'évaporation de cette sueur constitue le principal mécanisme de thermolyse, du moins si l'environnement permet l'évaporation de cette dernière (stress thermique compensable). Outre par la sudation, de l'eau est également perdue par la respiration, et de manière plus importante lors de l'exercice du fait de l'augmentation du débit ventilatoire. Les pertes d'eau respiratoires (généralement  $1\text{ à }2\text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ ) peuvent varier dépendamment de l'intensité de l'exercice et de l'environnement (Mitchell et al., 1972), mais sont généralement compensées par la production d'eau métabolique (Cheuvront & Montain, 2017).

Puisque la concentration de NaCl perdue dans la sueur est plus faible que celle dans le plasma, les pertes hydriques hypotoniques induites par la sueur induisent une diminution du volume plasmatique (hypovolémie, Figure 2a) et une augmentation concomitante de l'osmolalité plasmatique (hypersosmolalité, Figure 2b), et ce, de manière dose-réponse au déficit hydrique induit (Sawka et al., 1996). Ce stress hypovolémique hyperosmotique déclenche plusieurs mécanismes physiologiques afin de favoriser : (1) dans un premier temps, la rétention d'eau au niveau rénal par la sécrétion de l'ADH (conservation) et, (2) dans un second temps la consommation d'eau via la sensation de soif (acquisition).





**Figure 2.** Relation entre la diminution de l'eau corporelle totale et les changements (a) de volume plasmatique et (b) d'osmolalité plasmatique. Les croix représentent les données individuelles. Données récoltées au repos chez des personnes acclimatées à la chaleur après une hypohydratation induite par transpiration<sup>7</sup>.

### 2.3.1.2. Hormone antidiurétique et système rénine-angiotensine-aldostérone

Cette hormone a une action antidiurétique, c.-à-d. qu'elle réduit la diurèse (quantité d'urine) et joue donc un rôle central dans la régulation des quantités d'eau corporelle totale. Elle est synthétisée par les noyaux supraoptiques et paraventriculaires de l'hypothalamus et libérée par la neurohypophyse en réponse à une augmentation de l'osmolalité plasmatique de 1-2 %, soit 3 à 6 mOsmol  $\cdot$  kg $^{-1}$ . Elle est également libérée en réponse à une diminution du volume plasmatique d'environ 10 % (Bankir et al., 2017; Danziger &

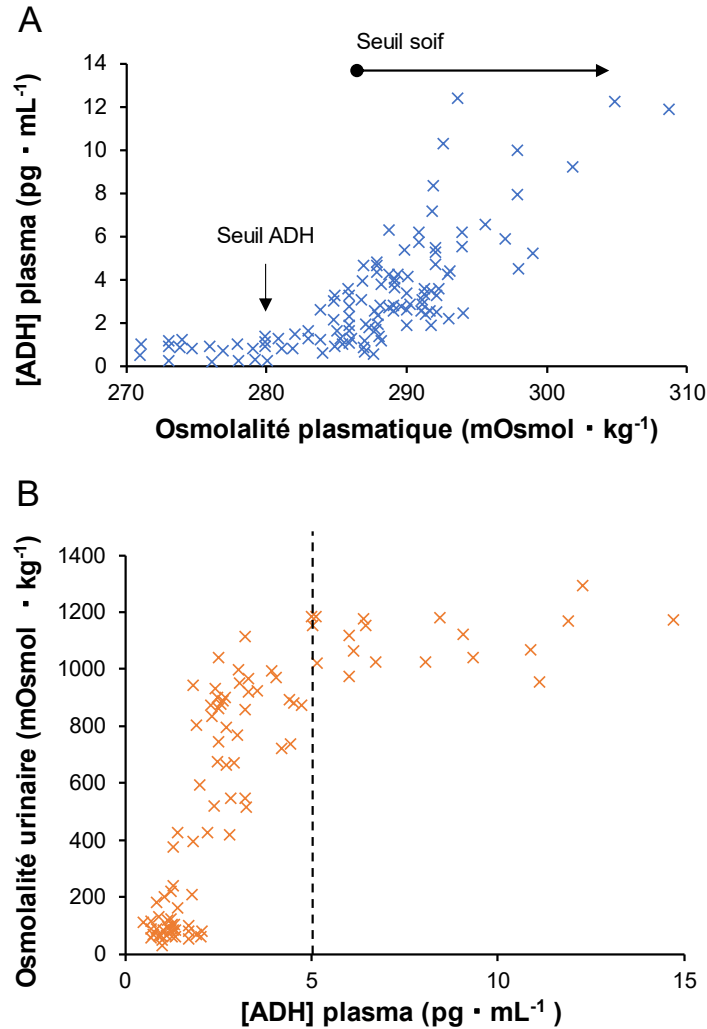
<sup>7</sup> Reproduit à partir des données de Sawka et al., (1996).

Zeidel, 2015; Hughes et al., 2018). Les concentrations basales se situent autour de  $1-2 \text{ pg} \cdot \text{mL}^{-1}$ . Une fois le seuil de  $280 \text{ mOsmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  dépassé, une relation linéaire est généralement observée entre l'osmolalité plasmatique et la sécrétion d'ADH comme démontré dans la

Figure 3a. L'ADH agit au niveau rénal en se fixant sur les récepteurs  $V_2$  de la membrane basolatérale des cellules des tubules distaux et collecteurs. Ces liaisons activent l'adénylate cyclase, augmentant ainsi les concentrations d'adénosine 3'5'monophosphate cyclique, ce qui active ensuite la protéine kinase A et *in fine* permet la synthèse et la translocation des aquaporines 2 au niveau de la membrane apicale (Danziger & Zeidel, 2015). Ce processus augmente la perméabilité des cellules à l'eau, permettant la réabsorption de cette dernière vers le compartiment intravasculaire et donc la production d'une urine plus concentrée (Bankir et al., 2017; Danziger & Zeidel, 2015). Par exemple, une augmentation de  $1 \text{ pg} \cdot \text{mL}^{-1}$  des concentrations plasmatiques d'ADH se traduit par une augmentation de  $200 \text{ mOsmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  de l'osmolalité urinaire (

Figure 3b) (Andreoli et al., 2010). Les reins peuvent concentrer l'urine à des valeurs maximales allant de  $1\ 200$  à  $1\ 400 \text{ mOsmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  chez un adulte en santé (Guyton & Hall, 2006), ce qui équivaut à une USG maximale de  $1,030-1,035 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$ . Ces concentrations maximales d'urine interviennent pour des concentrations plasmatiques d'ADH de  $5-6 \text{ pg} \cdot \text{mL}^{-1}$  (Andreoli et al. (2010),

Figure 3b). Cette réabsorption d'eau permet d'ajouter du liquide au compartiment intravasculaire et de rétablir ou maintenir l'osmolalité plasmatique. Toutefois, et de manière paradoxale, plusieurs études ont observé une diminution de la capacité de concentration de l'urine lors de l'exercice aérobie ( $> 60\%$  de la  $\dot{V}O_{2\text{max}}$ ), et ce malgré l'augmentation des concentrations plasmatiques d'ADH et la diminution de la production d'urine à l'exercice et l'exposition à la chaleur (Freund et al., 1991; Melin et al., 1997; Melin et al., 2001; Wade & Claybaugh, 1980). Ceci s'explique par la diminution du débit sanguin rénal et du débit de filtration glomérulaire à l'exercice, puisque le sang est principalement redistribué aux muscles actifs et en périphérie afin de favoriser la thermorégulation. Cette diminution du débit sanguin rénal et du débit de filtration glomérulaire réduit l'action de l'ADH et de l'aldostérone (Freund et al., 1991).



**Figure 3.** Relation entre les concentrations plasmatiques d'ADH et (a) l'osmolalité plasmatique et (b) l'osmolalité urinaire chez des humains sains<sup>8</sup>. ADH = hormone antidiurétique. Les croix représentent les données individuelles. La ligne verticale en pointillés reflète les concentrations plasmatiques d'ADH à partir desquelles les concentrations maximales d'urine interviennent. Données récoltées au repos après trois manipulations du statut hydrique : prise de liquide *ad libitum*, hyperhydratation aiguë et après plusieurs périodes de restriction hydrique.

Les mécanismes de régulation ADH-soif constituent le système de contrôle homéostatique à rétroaction négative le plus efficace pour contrôler l'équilibre hydrique. Cependant, le système rénine-angiotensine-aldostérone (SRAA) intervient également dans le contrôle de

<sup>8</sup> Reproduit à partir des données de Robertson (1983).

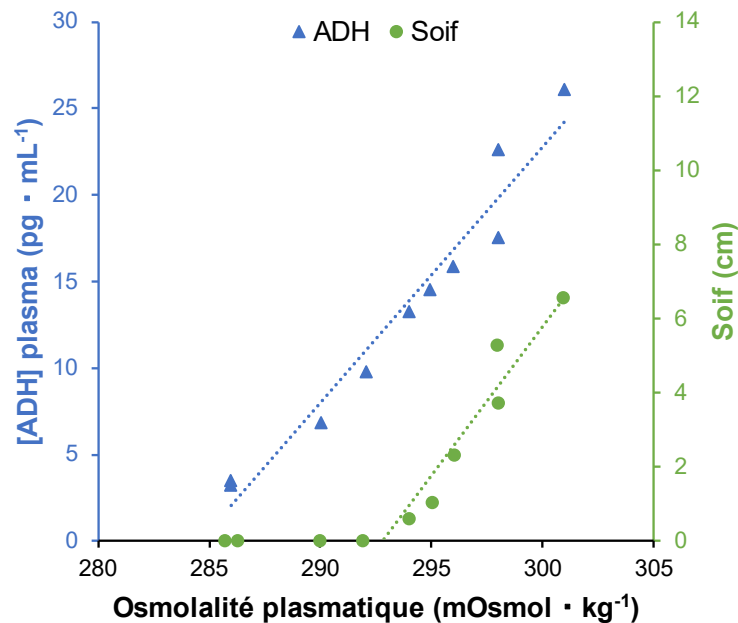
l'équilibre hydro-électrolytique. À cet égard, outre en réponse à l'hyperosmolalité plasmatique, l'ADH est également sécrétée en réponse à une augmentation des concentrations d'angiotensine II (Guyton & Hall, 2006), un peptide qui provient du clivage de l'angiotensine I par l'enzyme de conversion de l'angiotensine. Elle joue un rôle dans le contrôle de la pression artérielle en favorisant la vasoconstriction des artéioles, ce qui augmente la résistance périphérique totale et donc la pression artérielle (Guyton & Hall, 2006). Elle stimule également la sécrétion de l'aldostérone au niveau de la zone glomérulée du cortex des glandes surrénales (Guyton & Hall, 2006). L'aldostérone agit principalement au niveau du tubule contourné distal, par le canal épithélial à sodium et la pompe sodium-potassium-ATPase, ce qui favorise *in fine* une réabsorption active du sodium et par le fait même une réabsorption passive de l'eau (qui suit le gradient osmotique créé par la réabsorption de sodium) (Booth et al., 2002). Si les effets de l'ADH sont très rapides après sa libération (quelques minutes), ceux de l'aldostérone s'installent plus lentement (plusieurs heures/jours) (Booth et al., 2002). Enfin, l'angiotensine II stimule également la sensation de soif.

### 2.3.2. Apports hydriques

#### 2.3.2.1. *Déclenchement et inhibition de la soif : mécanismes sous-jacents*

La soif, tout comme la faim, la fatigue ou la douleur parmi d'autres, est une émotion primordiale (Denton et al., 2009), autrement dit, une sensation instinctive présente chez les mammifères et qui régule les comportements dans le but de maintenir l'homéostasie (Gizowski & Bourque, 2018). Les connaissances scientifiques inhérentes à la sensation de la soif, son origine et sa régulation ont largement évolué depuis le XIX<sup>e</sup> siècle, mais plusieurs mécanismes restent encore peu connus à ce jour (Armstrong & Kavouras, 2019). La sensation de soif est influencée par trois stimuli principaux : l'hyperosmolalité plasmatique détectée par les osmorécepteurs situés dans l'hypothalamus, l'hypovolémie > 10 % détectée par les barorécepteurs centraux et périphériques et, enfin, l'angiotensine II (Armstrong & Kavouras, 2019; Hughes et al., 2018). Cependant, c'est l'hyperosmolalité plasmatique qui constitue le stimulus principal, puisqu'une augmentation de seulement 2 % (soit  $6 \text{ mOsmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) suffit pour déclencher la sensation de soif (Hughes et al., 2018). Il est généralement mentionné que le seuil osmotique à partir duquel la sensation de soif se

déclenche interviendrait environ  $10 \text{ mOsmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  plus tard comparativement à celui de l'ADH, soit pour des valeurs autour de  $290 \text{ mOsmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  (Figure 3 et Figure 4). Au-delà de ce seuil, la relation entre l'osmolalité plasmatique et la sensation de soif est linéaire. La première réponse physiologique à une augmentation de l'osmolalité plasmatique serait donc inconsciente : sécrétion de l'ADH et rétention hydrique au niveau rénal (conservation). La seconde réponse serait, quant à elle, consciente, faisant intervenir la sensation de soif afin de pousser l'individu à consommer des liquides (acquisition). Toutefois, si certaines évidences soutiennent des seuils différents (Robertson, 1984), d'autres observent des seuils similaires (Thompson et al., 1986), autour de  $285 \text{ mOsmol} \cdot \text{kg}^{-1}$  (Hughes et al., 2018). Quoi qu'il en soit, il semblerait que ces seuils soient relativement fixes chez un même individu à travers le temps (faible variabilité intra-individuelle), mais qu'une forte variabilité interindividuelle existe (Zerbe et al., 1991).



**Figure 4.** Relation entre l'osmolalité plasmatique et l'ADH et la sensation de soif chez une personne en santé lors d'une infusion saline de 5 %<sup>9</sup>. ADH = hormone antidiurétique.

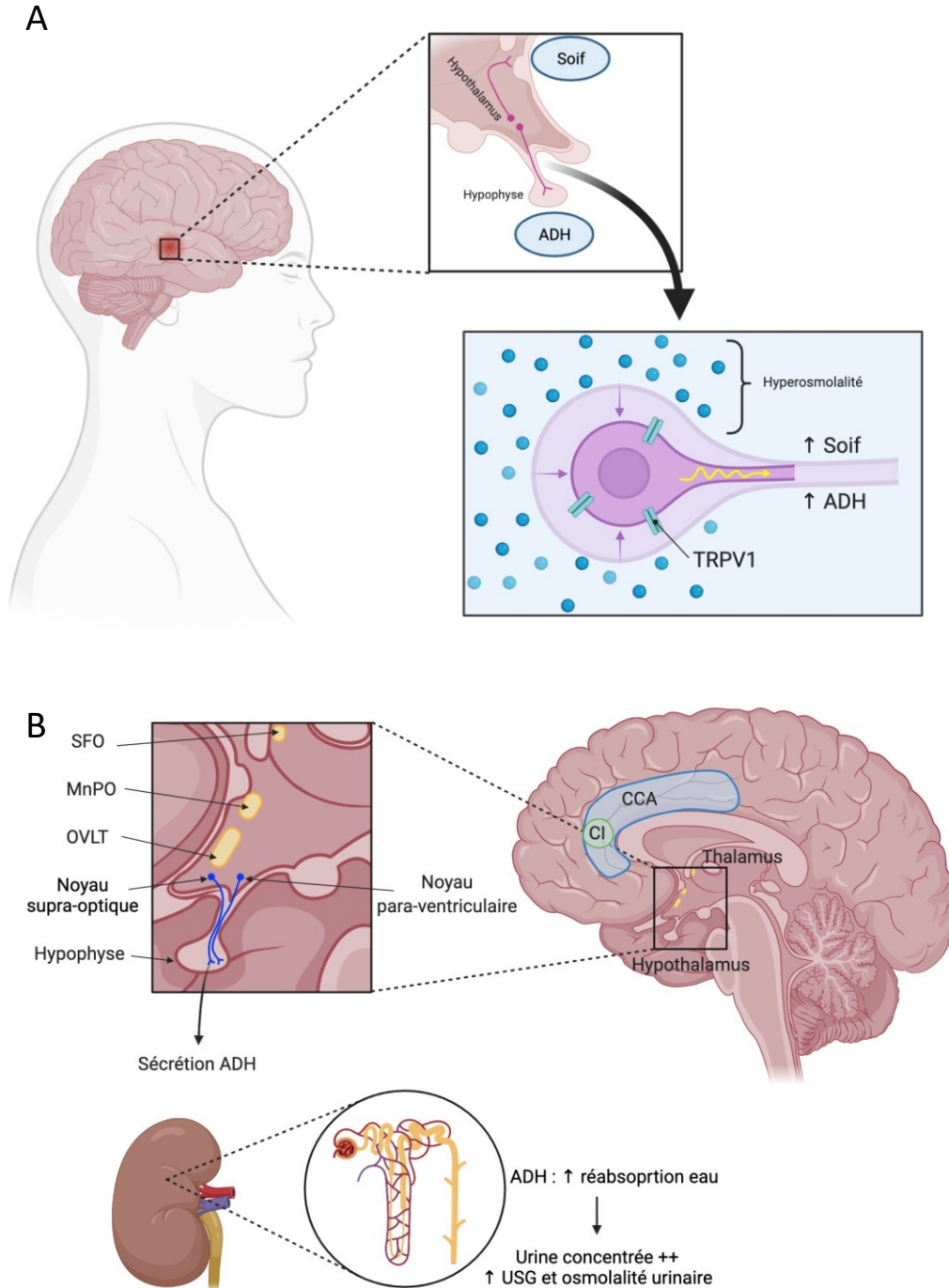
Les mécanismes corticaux/cérébraux exacts qui interviennent dans le déclenchement de la sensation de soif et la consommation de liquide sont assez peu connus à ce jour, et plusieurs

<sup>9</sup> Reproduit à partir des données de Robertson (1984).

études proviennent du modèle animal (Armstrong & Kavouras, 2019). Il semblerait que la relation entre les organes circumventriculaires et le cortex préfrontal, notamment le cortex cingulaire antérieur et le cortex insulaire (CAA et CI respectivement dans la Figure 5), soit la voie neurale centrale dans le déclenchement de la sensation de soif et le comportement de consommer des liquides (Armstrong & Kavouras, 2019). Premièrement, les organes circumventriculaires interviennent dans la détection des variations homéostatiques par les osmorécepteurs, des neurones spécialisés qui détectent les changements d'osmolalité plasmatique. Plus spécifiquement, ces osmorécepteurs se trouvent dans trois régions, dont l'organe subfornical, l'organe vasculaire de la lame terminale et le noyau préoptique médian (SFO, OVLT et MnPO respectivement dans la Figure 5). Les deux premiers sont dépourvus de barrière hématoencéphalique permettant ainsi une proximité, et donc des échanges directs, avec la circulation sanguine systémique (Adams et al., 2020; Augustine et al., 2020). En cas d'hyperosmolalité, l'eau présente dans les osmorécepteurs diffuse vers le compartiment extracellulaire, induisant un rétrécissement de la taille des osmorécepteurs (flèches mauves dans la Figure 5a), comme cela a préalablement été décrit (section 2.2.2). Ce changement de structure induirait l'activation des récepteurs TRPV1 situés sur la membrane cellulaire des osmorécepteurs (Figure 5a) (Ciura et al., 2011). Cela permettrait l'entrée de charge positive, la dépolarisation cellulaire et la création d'un potentiel d'action. Ce dernier stimulerait ensuite la sécrétion de l'ADH et l'augmentation de la sensation de soif. Plus précisément, les osmorécepteurs ont des connexions neuronales avec (1) les noyaux supraoptiques et paraventriculaires de l'hypothalamus, qui synthétisent l'ADH et, (2) le CAA et le CI (en passant par le thalamus), régions corticales supérieures qui agissent comme « centre de la soif » (Adams et al., 2020; Gizowski & Bourque, 2018) (Figure 5b). À ce jour, il semblerait donc que cela soit un processus mécanique via des modifications structurelles des osmorécepteurs captés par les récepteurs TRPV1 (Ciura et al., 2011). À ce titre, il est intéressant de constater que ces deux régions corticales supérieures (CAA et CI) sont respectivement activées et inhibées (IRM fonctionnel) lorsque la sensation de soif augmente et que des liquides sont consommés (Becker et al., 2017; Shackman et al., 2011). Cette observation renforce ainsi l'idée que ces régions interviennent activement dans la perception consciente de la sensation de soif. Classiquement, la soif est décrite comme une boucle de rétroaction négative, mais de plus en plus d'évidences suggèrent des mécanismes

agissant par anticipation. Ainsi des facteurs non homéostatiques peuvent influencer la sensation de soif (Gizowski & Bourque, 2018). Certaines évidences utilisant l'IRM fonctionnelle démontrent même que le simple fait d'imaginer avoir soif induit une activation des mêmes aires corticales que la soif induite par des changements physiologiques (Saker et al., 2020). Cela soutient donc le concept de « soif par anticipation ».

Il est à noter que la sécrétion de l'ADH et la sensation de soif sont rapidement inhibées par l'ingestion d'eau captée par les récepteurs de l'oropharynx (Denton et al., 1999; Figaro & Mack, 1997; Geelen et al., 1984), bien avant que l'eau ne soit absorbée et que l'osmolalité plasmatique ne retourne à des valeurs normales/initiales. Par exemple, la sensation de soif est rapidement inhibée lorsque des individus boivent *ad libitum* pendant 10 minutes, même en cas d'hypohydratation de 3 % de la masse corporelle induite par l'exercice (Adams et al., 2019). Ce mécanisme permettrait d'éviter une surhydratation qui pourrait conduire à l'hyponatrémie (c.-à-d. une dilution du compartiment sanguin, entraînant une diminution de la concentration de sodium dans le sang). Capitán-Jiménez & Aragón-Vargas (2022) ont très bien démontré que 47 min après un exercice de deux heures visant à induire une déshydratation de 3,6 % de la masse corporelle, les participants remplaçaient près de 60 % de leurs pertes hydriques en buvant *ad libitum*. Même s'ils étaient encore en déficit hydrique à la fin de la période de réhydratation (-1,4 % de leur masse corporelle), l'osmolalité plasmatique et la sensation de soif se trouvaient à des niveaux similaires à ceux pré déshydratation.



**Figure 5.** (a) Localisation et fonctionnement des osmorécepteurs et (b) schématisation des réseaux neuronaux qui interviennent dans la régulation de la perception de la sensation de soif<sup>10</sup>. SFO = organe subforéal, MnPO = noyau préoptique médian, OVLT = organe vasculaire de la lame terminale, ADH = hormone antidiurétique, TRPV1 = *transient receptor potential vanilloïde 1*. USG = gravité spécifique de l'urine, CCA = cortex cingulaire antérieur, CI = cortex insulaire.

<sup>10</sup> Figure créée avec BioRender.com.



### 2.3.2.2. Concept de déshydratation volontaire lors de l'exercice

Généralement, lors d'un exercice d'endurance, les individus remplacent environ la moitié de leurs pertes sudorales lorsqu'ils boivent selon leur soif/*ad libitum* (Cheuvront & Haymes, 2001; Claveau et al., 2022; Dugas et al., 2009; Goulet & Hoffman, 2019), bien qu'une forte variabilité interindividuelle existe (entre 20 et 70 % (Cheuvront & Haymes, 2001; Dion et al., 2013; Passe et al., 2007)). Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette variabilité, dont l'intensité et le mode d'exercice, ainsi que la facilité d'accès à de l'eau, la température et le goût, parmi d'autres. Ce phénomène, initialement mis en lumière dans les travaux d'Adolph et connu sous le nom de *voluntary dehydration* (Adolph, 1947; Greenleaf & Sargent, 1965), s'observe, peu importe le statut d'entraînement (Merry et al., 2008). Cela constitue l'un des arguments fréquemment mentionnés pour indiquer que se fier à la soif pour consommer des liquides lors de l'exercice ne serait pas suffisant et donc non optimal d'un point de vue de la performance. Bien que cette thèse ne porte pas sur les différentes stratégies d'hydratation et leurs impacts sur la performance d'endurance, un bref survol s'impose à cet égard. Même si plusieurs questions restent en suspens, les travaux menés dans notre laboratoire démontrent que :

- i. Bien que la consommation de liquides selon la sensation de la soif induise une plus grande déshydratation, comparativement à une prise selon un plan programmé, cela ne nuit pas à la performance d'endurance pour des exercices de 1 à 2 heures (Dion et al., 2013; Goulet & Hoffman, 2019).
- ii. Lors d'exercices de 1 heure à intensité élevée, boire des liquides pour remplacer toutes les pertes hydriques pourrait créer des inconforts intestinaux et nuire à la performance (Holland et al., 2017). Dans ce contexte, nous n'avons observé aucune différence tant d'un point de vue physiologique que de la performance d'endurance entre ces trois stratégies : ne pas boire, boire selon la soif, boire pour limiter les pertes de masse corporelle à  $\sim 0,5$  % de la masse corporelle (Perreault-Briere et al., 2019).
- iii. Boire selon sa soif pourrait ne pas être une stratégie optimale lors d'exercices prolongés (> 5 heures) à la chaleur (Jeker et al., 2021), bien que d'autres études soient nécessaires pour confirmer ceci.

- iv. Boire *ad libitum* et selon la soif mènent à des patrons de consommation de liquides différents lors d'un exercice à vélo de 2 heures à la chaleur, mais ultimement la consommation totale de liquide et le niveau d'hypohydratation résultant sont similaires (Claveau et al., 2022).

La section suivante présente une revue exhaustive de la littérature portant sur les impacts de la déshydratation induite par l'exercice sur les variables physiologiques, les perceptions subjectives, la performance d'endurance ainsi que la performance cognitive.

## **2.4. Déshydratation induite par l'exercice : impacts**

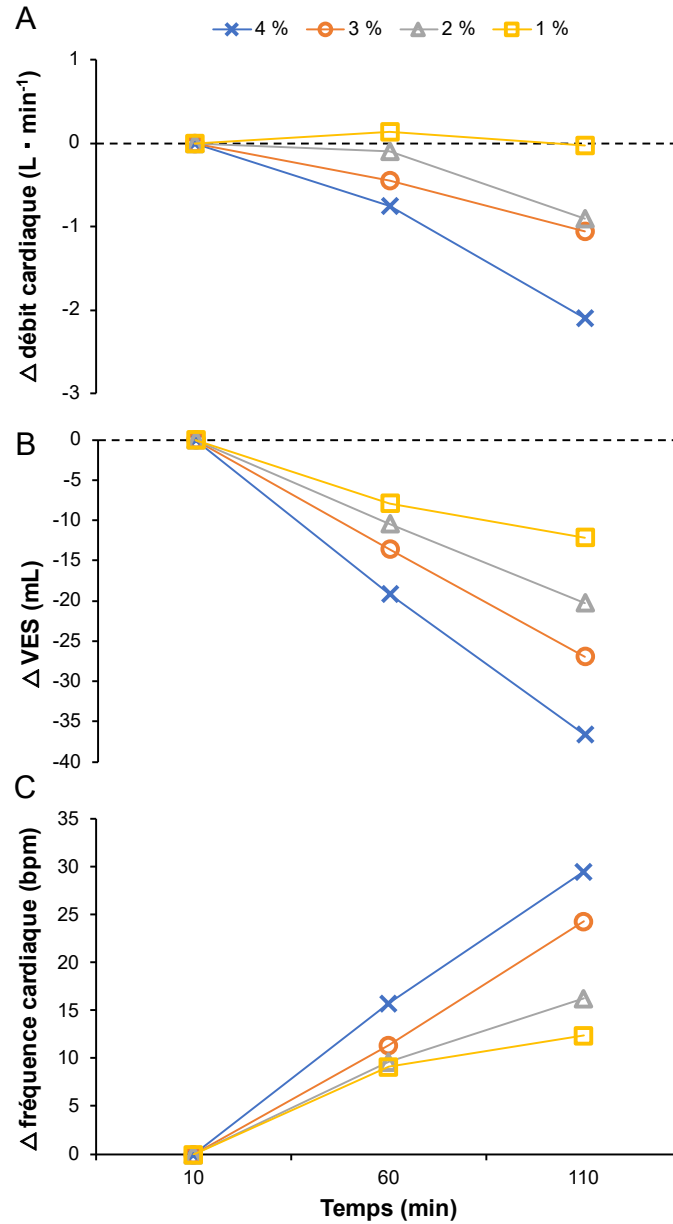
### 2.4.1. Variables physiologiques

#### *2.4.1.1. Impacts sur la fonction cardiovasculaire*

Les pertes hydriques hypotoniques induites par la sudation, combinées à un apport hydrique inadéquat, engendrent une diminution du volume plasmatique et une augmentation concomitante de l'osmolalité plasmatique. Cet état hypovolémique hyperosmotique contribue à exacerber le stress cardiovasculaire pour une intensité d'exercice donnée (Gonzalez-Alonso et al., 1995; González-Alonso et al., 1998; Hamilton et al., 1991; Montain et al., 1998; Montain & Coyle, 1992; Sawka et al., 1979). Cette réponse est proportionnelle au niveau d'hypohydratation induit comme démontré dans la Figure 6 (Montain & Coyle, 1992). Des impacts sur la fréquence cardiaque ont été observés à des niveaux de déshydratation aussi faible que 1 % de la masse corporelle (Graham et al., 2020; Logan-Sprenger et al., 2012). De manière plus détaillée, la déshydratation induite par l'exercice est associée à une réduction du volume plasmatique, du retour veineux, du volume télédiastolique, du volume d'éjection systolique (VES), du débit cardiaque et à une hausse de la fréquence cardiaque (dérive cardiaque) (Gonzalez-Alonso et al., 1995; González-Alonso et al., 1997; Montain & Coyle, 1992; Watanabe et al., 2020), et ce, même lorsque l'exercice est réalisé dans un environnement tempéré (Hamilton et al., 1991; Logan-Sprenger et al., 2013; Logan-Sprenger et al., 2012). González-Alonso et al., (1997) ont étudié les impacts isolés et combinés de l'hyperthermie et de l'hypohydratation (4 % de la masse corporelle) lors de l'exercice à la chaleur. De façon indépendante,

l'hyperthermie et l'hypohydratation sont associées à une baisse du VES (7-8 %) sans diminution du débit cardiaque. Or, quand ces deux stress sont combinés, le VES diminue davantage (20 %), de même que le débit cardiaque (13 %) cette fois-ci. L'hypohydratation exacerbe donc la dérive cardiaque, et ce, proportionnellement au déficit hydrique induit (Figure 6c, Montain & Coyle, 1992). Toutefois, il est primordial de noter que cette réponse est dépendante de l'intensité de l'exercice, le stress cardiovasculaire inhérent à l'hypohydratation étant plus important lors d'exercices réalisés à plus haute intensité (Montain et al., 1998). Lors de l'exercice à la chaleur, la fréquence cardiaque augmente de 3 battements  $\cdot$  min<sup>-1</sup> pour chaque diminution de 1 % de la masse corporelle comparativement au même exercice réalisé euhydraté (Adams et al., 2014). Il est démontré que le maintien de l'euhydratation atténue largement la dérive cardiaque lors de l'exercice prolongé, même dans un environnement chaud (Figure 6c, Montain & Coyle, 1992), renforçant l'impact de l'hypohydratation *per se* sur le système cardiovasculaire. De plus, l'hypohydratation (4 % de la masse corporelle) est également associée à une diminution du débit sanguin musculaire lors de l'exercice prolongé (135 min, 61 %  $\dot{V}O_{2max}$ , 35 °C), bien que l'apport musculaire en O<sub>2</sub> soit maintenu par une augmentation de l'extraction de l'O<sub>2</sub> (González-Alonso et al., 1998). Une telle diminution n'est pas observée lorsque l'exercice est réalisé euhydraté dans un environnement chaud (35-40 °C), et ce, même en présence d'hyperthermie (González-Alonso et al., 1998; Nielsen et al., 1990). L'exercice d'intensité modéré *per se* augmente également le débit sanguin cérébral (Hellström et al., 1996; Smith et al., 2012), tandis que l'exposition à la chaleur, quant à elle, induit une réduction de ce dernier tant au repos qu'à l'exercice (Fan et al., 2008; Nybo et al., 2001; Ogoh et al., 2013; Périard & Racinais, 2015; Wilson et al., 2006). Au repos, Fan et al. (2008) ont démontré que le débit sanguin cérébral est augmenté par l'hypohydratation faible (1,5 % de la masse corporelle), bien que les mécanismes sous-jacents soient, à ce jour, inconnus. Toutefois, à l'exercice prolongé (120 min, 55 % P<sub>max</sub>, 35 °C), la baisse du débit sanguin cérébral semble exacerbée par l'hypohydratation (3 % de la masse corporelle) sans pour autant altérer le métabolisme cérébral, notamment grâce, là encore, à une augmentation de l'extraction de l'O<sub>2</sub> (Trangmar et al., 2014; Trangmar et al., 2015). Enfin, certaines évidences suggèrent que l'hypohydratation (2,5 % de la masse corporelle) induite par l'exercice prolongé à la chaleur (Chapman et al., 2019) ou par l'exercice intermittent à haute intensité dans un

environnement tempéré (Juett et al., 2021) pourrait être associée à une augmentation des biomarqueurs de lésions rénales, notamment au niveau des tubules proximaux.

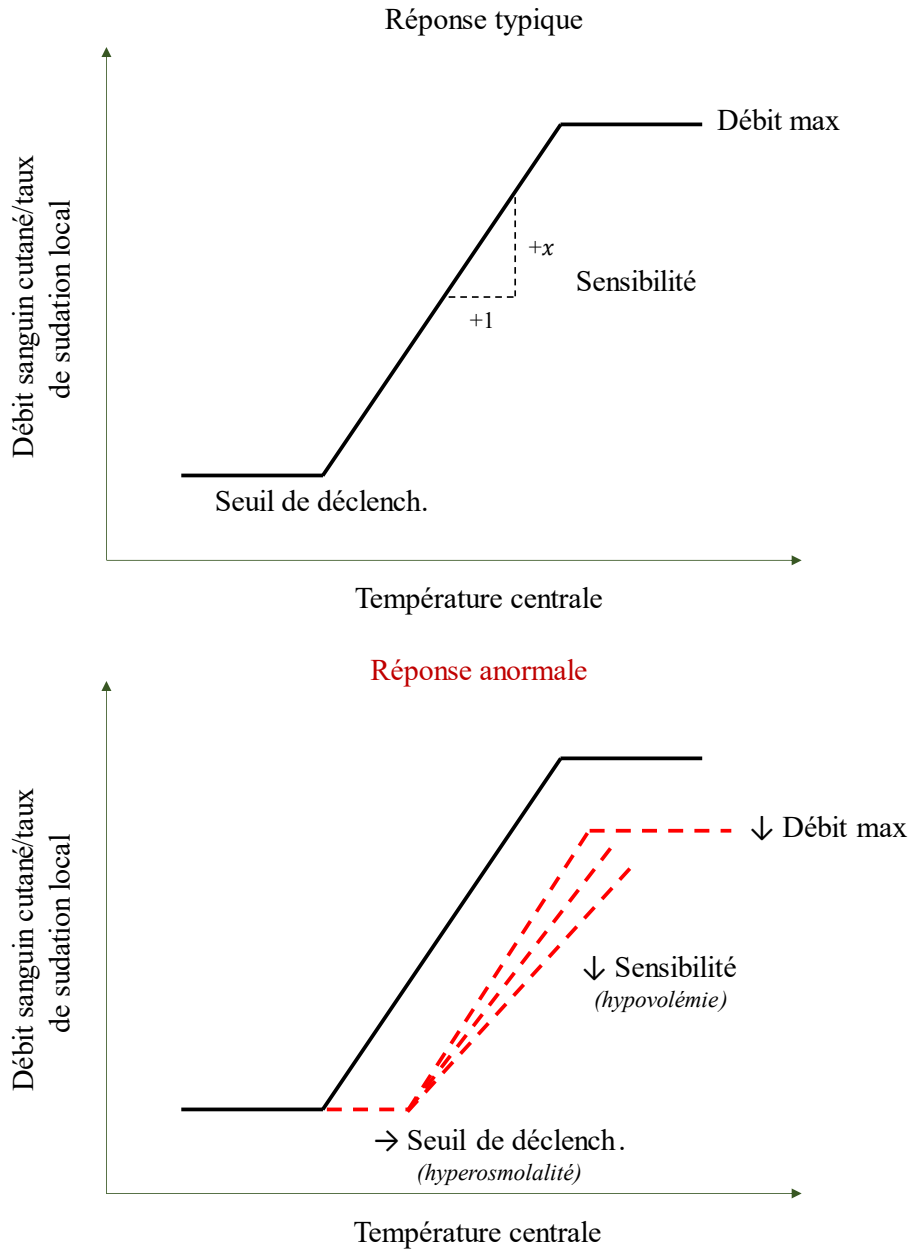


**Figure 6.** Impact graduel de la déshydratation induite par l'exercice (1 à 4 % de la masse corporelle) sur (a) le débit cardiaque, (b) le VES et (c) la fréquence cardiaque lors d'un exercice de 120 min à vélo (33 °C, 50 % d'humidité et 9 km · h<sup>-1</sup> de vent)<sup>11</sup>. VES = volume d'éjection systolique.

<sup>11</sup> Reproduit à partir des données de Montain & Coyle (1992).

#### *2.4.1.2. Impacts sur la température corporelle*

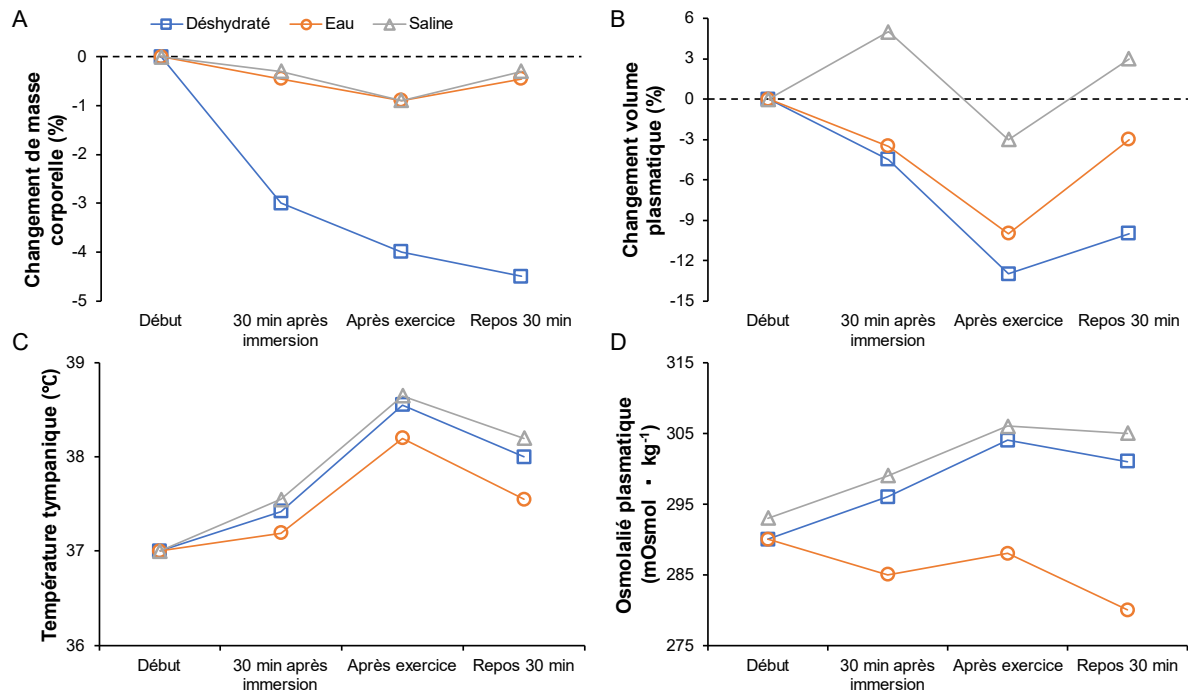
L'hypovolémie et l'hyperosmolalité associées à l'hypohydratation peuvent individuellement ou de concert altérer la thermorégulation. Plus précisément, ces stress repoussent le seuil de déclenchement de la vasodilatation périphérique et de la sudation (Fortney et al., 1984; Montain et al., 1995; Nadel et al., 1980; Sawka et al., 1985; Shibasaki et al., 2009; Takamata et al., 1997; Takamata et al., 1998) comme illustré dans la Figure 7, et ce, même lors d'une exposition passive à la chaleur (Gagnon et al., 2016). Il est à noter que la déshydratation et l'entraînement/l'acclimatation à la chaleur ont des impacts opposés sur le seuil de déclenchement de la sudation ainsi que sur la production de sudation pour une température corporelle donnée (sensibilité). À titre d'exemple, Sawka et al., (1985) ont démontré que le taux de sudation pour une température rectale donnée diminue au prorata du niveau d'hypohydratation (0, 3, 5 et 7 % de la masse corporelle, 4 x 25 min, marche à 49 °C et 20 % d'humidité).



**Figure 7.** Impacts de l'hypovolémie et de l'hyperosmolalité plasmatique sur le seuil de déclenchement de la sudation ainsi que sur la sensibilité sudorale.

Cet effet semble être davantage associé à la hausse de l'osmolalité plasmatique plutôt qu'à la diminution du volume plasmatique comme habillage démontré par Harrison et al., (1978). En effet, dans leur étude, les auteurs ont exposé 4 hommes adultes en santé au protocole suivant : (a) période d'immersion de 90 min dans l'eau chaude pour manipuler le statut hydrique, (b) repos de 30 min, (c) période de vélo à 75 W et (d) période de repos

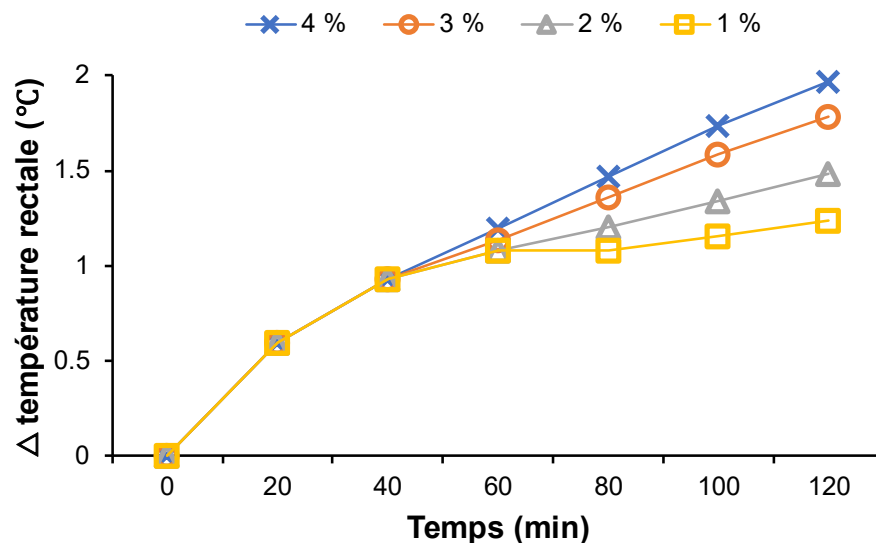
de 30 min. Les étapes (b) à (d) étaient effectuées dans une chambre environnementale maintenue à 45 °C, 40 % d'humidité et 5 km · h<sup>-1</sup> de vent. Les participants agissaient comme leur propre contrôle et ont effectué ce protocole 3 fois de manière randomisée : (i) sans apport hydrique (**déshydraté**), (ii) en remplaçant les pertes hydriques par de l'eau servie à 38 °C (**eau**). Dans la condition (iii) les participants remplaçaient leurs pertes hydriques par de la saline à 1 % servie à 38 °C (**saline**). Cette condition visait à maintenir l'euhydration et le volume plasmatique tout en augmentant la natrémie et l'osmolalité. Les auteurs ont alors constaté que même si les pertes de masse corporelle étaient maintenues < 1 % (Figure 8a) et que le volume plasmatique (Figure 8b) était mieux préservé dans la condition saline, la température tympanique (Figure 8c) y était la plus élevée, avec des valeurs mêmes légèrement supérieures à celles observées dans la condition déshydratée. Cette observation se faisait en parallèle d'une natrémie et d'une osmolalité plasmatique plus importante dans la condition saline (Figure 8d).



**Figure 8.** Impact de la déshydratation, de l'ingestion d'eau et de l'ingestion de saline sur (a) le changement de masse corporelle, (b) le changement de volume plasmatique, (c) la température tympanique et (d) l'osmolalité plasmatique lors d'un protocole varié (45 °C, 40 % d'humidité et 5 km · h<sup>-1</sup> de vent)<sup>12</sup>. Les détails du protocole sont présentés dans le texte principal.

<sup>12</sup> Reproduit à partir des données de Harrison et al., (1978).

Dans ce contexte, il est donc intéressant de constater que si les effets de l'hypohydratation et de la chaleur sont bien souvent synergiques, ces stress s'influencent mutuellement. Ainsi, si l'exercice et l'exposition à la chaleur augmentent la sudation, l'hypohydratation, elle, réduit cette dernière, bien que cela ne soit pas observé chez tous les individus, notamment ceux entraînés (Merry et al., 2010). L'hypohydratation s'accompagne d'une augmentation marquée de la température interne (dérive thermique) observée tant dans un environnement chaud (Figure 9, Montain & Coyle, 1992) que tempéré (22 °C) (Hamilton et al., 1991; Logan-Sprenger et al., 2013; Logan-Sprenger et al., 2012). Des impacts ont été observés à des niveaux d'hypohydratation aussi faibles que 1 % de la masse corporelle sur la température rectale (+0,2 à 0,4 °C comparativement à euhydraté) (Adams et al., 2019; Graham et al., 2020) et gastro-intestinale (+0,5 °C comparativement à euhydraté) (Logan-Sprenger et al., 2012) lors d'exercices à vélo et de course à pied à la chaleur. Lors de l'exercice, la température interne augmente de 0,15 à 0,20 °C pour chaque diminution de 1 % de la masse corporelle, comparativement au même exercice réalisé euhydraté (Casa et al., 2010; Huggins et al., 2012; Sawka et al., 2001).



**Figure 9.** Impact graduel de la déshydratation induite par l'exercice (1 à 4 % de la masse corporelle) sur la température rectale lors d'un exercice de 120 min à vélo (33 °C, 50 % d'humidité et 9 km · h<sup>-1</sup> de vent)<sup>13</sup>.

<sup>13</sup> Reproduit à partir des données de Montain & Coyle (1992).



Les données de laboratoire (temps jusqu'à l'épuisement : Che Muhamed et al., 2016; Galloway & Maughan, 1997; de Korte et al., 2021; Maughan et al., 2012) et les données terrain (contre-la-montre : Bright et al., 2021; Mantzios et al., 2022) sont sans équivoques et démontrent une réduction de la performance d'endurance lorsque la température ambiante et l'humidité augmentent. Plusieurs données chez l'humain (Nielsen et al., 1993) mais aussi chez les modèles animaux (Fuller et al., 1998), soulignent l'atteinte d'une température interne constante lors de l'arrêt volontaire d'un exercice causé par la fatigue. Ce constat a conduit au développement d'une théorie qui stipule qu'il pourrait exister une température interne « critique » à partir de laquelle la fatigue pourrait survenir, conduisant à l'arrêt volontaire de l'exercice afin de protéger l'organisme et le cerveau des conséquences d'une hyperthermie sévère (ex : modèle du gouverneur central de Tim Noakes (Noakes et al., 2004) ou le modèle de la chasse d'eau de Guillaume Millet (Millet, 2011)). À cet égard, plusieurs évidences démontrent que l'hyperthermie a un impact sur le système nerveux central, en augmentant la perception de l'effort et donc, la fatigue, ce qui réduirait la motivation à poursuivre l'exercice. Cela a très bien été montré par Nielsen et al., (2001) qui ont utilisé l'électro-encéphalographie lors d'un exercice à vélo jusqu'à l'épuisement (34 min, 60 %  $\dot{V}O_{2max}$ , 42 °C, 18 % d'humidité) pour mettre en évidence le lien entre l'hyperthermie (température œsophagienne à l'épuisement : 39,8 °C), l'altération de l'activité cérébrale au niveau du cortex préfrontal et l'augmentation de la perception de l'effort. Plusieurs données démontrent aussi l'impact de l'hyperthermie sur la composante neuromusculaire, marqué par la réduction du recrutement musculaire, produisant *in fine* une réduction de la force développée (Morrison et al., 2004; Nybo et al., 2001; Thomas et al., 2006).

D'autres évidences réfutent le concept d'une température interne « critique » à partir de laquelle la fatigue surviendrait, et donc la performance diminuerait. Ces évidences soulignent plutôt l'impact négatif de la réduction du gradient entre la température interne et celle de la peau (Cheuvront et al., 2010; Sawka et al., 2012). Une telle réduction serait désavantageuse pour perdre de la chaleur et serait donc un facteur clé de la réduction de la performance d'endurance à la chaleur (Cuddy et al., 2014; Ely et al., 2009; Périard et al., 2012). En effet, pour une température interne donnée, une peau plus chaude réduit le

gradient entre la température interne et celle de la peau et augmente par le fait même les besoins d'apport sanguin cutané (Sawka et al., 2012). Bright et al., (2021) ont observé une corrélation moyenne à forte ( $r = 0,61$ ,  $p < 0,01$ ) entre la réduction du gradient entre la température interne et celle de la peau et la réduction de la puissance moyenne lors d'un contre-la-montre à vélo de 30 km chez 14 cyclistes. Cela s'accompagnait d'une plus grande perception de l'effort ainsi que d'une exacerbation du stress thermique perçu. L'hypohydratation exacerbe cet effet puisque la réduction du volume plasmatique réduit la quantité de sang disponible et donc le retour veineux au niveau du cœur comme détaillé précédemment (Sawka et al., 2012). À cet égard, à une température de la peau  $> 27$  °C, une hypohydratation de 3-4 % dégrade la performance d'endurance d'environ 1,5 % pour chaque augmentation supplémentaire de 1 °C de la température de la peau (Kenefick et al., 2010; Kenefick et al., 2010).

#### *2.4.1.3. Impacts sur le métabolisme énergétique*

La déshydratation induite par l'exercice (120-135 min, 65 %  $\dot{V}O_{2max}$ , 20-39 °C, 2 à 4 % de la masse corporelle) est également associée à une plus grande oxydation des glucides ainsi qu'à une glycolyse plus importante (+ 16 à 45 %) (González-Alonso et al., 1999), et ce, même lorsque l'exercice est effectué à 20-22 °C (Hargreaves et al., 1996; Logan-Sprenger et al., 2013; Logan-Sprenger et al., 2012), renforçant l'impact de l'hypohydratation *per se*. Ces observations pourraient s'expliquer par une plus grande augmentation de la température interne et musculaire (Starkie et al., 1999) ainsi que par l'augmentation des concentrations plasmatiques de catécholamines (Febbraio et al., 1994; Febbraio, 2000) avec la déshydratation.

### 2.4.2. Perceptions subjectives

#### *2.4.2.1. Impacts sur la sensation de soif*

Puisque la sensation de soif est largement influencée par les niveaux d'osmolalité plasmatique, il n'est pas étonnant qu'elle soit exacerbée par la déshydratation. À cet égard, Dugas et al., (2009) ont démontré que la sensation de soif augmente au prorata du niveau de déshydratation (de 0,5 à 4,5 % de la masse corporelle) lors d'un contre-la-montre à vélo

de 80 km à 33 °C. De manière intéressante, des études ont récemment démontré que cette observation demeure même lorsque le statut hydrique (déshydratation de 2-3 % de la masse corporelle) des participants est manipulé à l'aveugle par l'apport d'eau directement dans l'estomac via une sonde nasogastrique (Funnell et al., 2019; James et al., 2017). Certains auteurs mentionnent que la sensation de soif pourrait, en partie, expliquer l'impact de la déshydratation sur la performance d'endurance (Sawka & Noakes, 2007). Récemment, Adams et al., (2018) ont utilisé une méthode similaire pour manipuler le statut hydrique (sonde nasogastrique), mais les participants pouvaient consommer 25 mL d'eau toutes les 5 minutes dans les deux conditions afin de maintenir la sensation de soif à son minimum. Malgré tout, les auteurs observent une diminution de la performance de 6 % en étant déshydraté de 2-3 % de la masse corporelle. Comme mentionné par Funnell et al., (2019), ces résultats suggèrent que les impacts de la déshydratation sur la performance d'endurance ne sont pas exclusivement médiés par la sensation de soif.

#### *2.4.2.2. Impacts sur l'humeur, la fatigue mentale et la douleur*

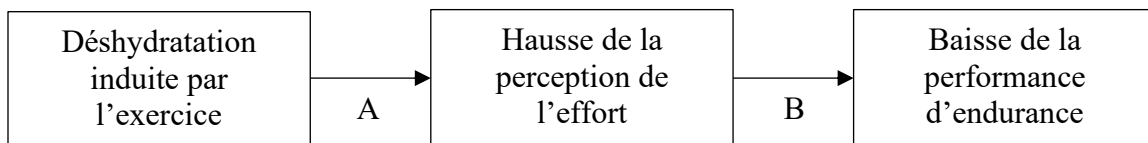
De manière générale, la déshydratation est associée à des perceptions subjectives altérées, incluant, entre autres, des maux de tête et de la fatigue ainsi qu'une altération de la concentration, de la vigilance et de l'humeur. Récemment, une étude randomisée croisée a démontré que l'hyperosmolalité plasmatique (infusion saline en aveugle, au repos sans exercice ni exposition à la chaleur) est associée à une altération de l'humeur comparativement à une situation où l'osmolalité plasmatique est maintenue dans les normes physiologiques (Suh et al., 2021). Similairement, la soif semble exacerber la fatigue mentale (Goodman & Marino, 2020). Ceci soutient d'autres études qui ont précédemment rapporté des altérations de l'humeur avec la déshydratation (Shirreffs et al., 2004), même lorsque faible (1,5 % de la masse corporelle) (Armstrong et al., 2012; Ganio et al., 2011). Moyen et al., (2015) ont observé une relation entre une plus grande gravité spécifique de l'urine et une plus grande douleur rapportée lors d'une épreuve de 164 km à vélo. Bien que plus d'études contrôlées soient nécessaires, d'autres évidences suggèrent que la déshydratation ~ 1 % de la masse corporelle serait également associée à une augmentation de la douleur perçue (Ogino et al., 2014; Perry et al., 2016; Tan et al., (2022)).

### 2.4.2.3. Impacts sur la perception de l'effort

#### 2.4.2.3.1. Perception de l'effort : possible médiateur de la relation entre la déshydratation et la performance d'endurance

Bien que l'origine de la perception de l'effort soit largement débattue, les deux principales théories suggèrent qu'elle soit d'origine centrale (*corollary discharge model* ou théorie de la copie efférente, vision des neurosciences) (Marcora, 2009) ou générée par des processus neuronaux qui intègrent les signaux afférents périphériques et centraux (vision de la physiologie de l'exercice : fréquence cardiaque, tension musculaire, fréquence respiratoire, température interne, etc.) (Borg, 1982; Robertson & Noble, 1997).

Il a été suggéré que la perception de l'effort pourrait agir comme médiateur de l'effet de la déshydratation sur la performance d'endurance (Cheuvront et al., 2010; James et al., 2019). Autrement dit, selon cette théorie, la déshydratation induite par l'exercice serait à l'origine d'une augmentation de l'effort perçu, qui elle-même, contribuerait à altérer la performance d'endurance (Figure 10), en diminuant l'intensité et/ou la durée de l'exercice (Abbiss et al., 2015; Crewe et al., 2008; Eston et al., 2007; Noakes, 2008; Thiel et al., 2018). Ceci est légitime d'un point de vue physiologique, étant donné (1) les impacts cardiovasculaires, thermiques, métaboliques ainsi que subjectifs induits par la déshydratation qui ont été présentés plus tôt et (2) la relation qui existe entre certains de ces marqueurs et la perception de l'effort (Borg, 1982; Robertson & Noble, 1997).



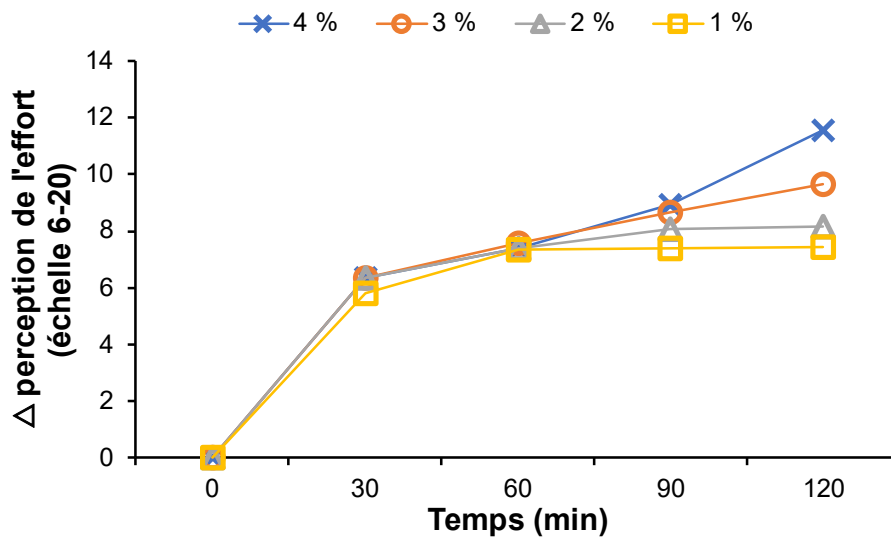
**Figure 10.** Possible effet médiateur de la perception de l'effort dans la relation entre la déshydratation induite par l'exercice et la diminution de la performance d'endurance.

Plus concrètement, si la déshydratation est suffisamment importante, ses impacts sur la fonction cardiovasculaire, la température corporelle, le métabolisme énergétique et les perceptions subjectives pourraient alors contribuer à augmenter la difficulté perçue de l'effort (A dans la Figure 10). Il est probable que lors d'un exercice constant à intensité

fixe, la perception de l'effort soit plus importante pour une intensité donnée, rendant l'exercice plus difficile à maintenir et favorisant un arrêt prématuré de ce dernier (Cheuvront et al., 2010). En revanche, lors d'un exercice de type contre-la-montre, il est probable d'observer une diminution de l'intensité de l'exercice (c.-à-d., une diminution de la vitesse/cadence et donc *in fine* de la puissance) afin d'avoir une perception d'effort similaire (Cheuvront et al., 2010). Dans les deux cas, ceci se traduit par une diminution de la performance (B dans la Figure 10). Quoiqu'il en soit, un bref survol de la littérature concernant l'impact de la déshydratation sur la perception de l'effort s'impose et est présenté dans la sous-section suivante.

#### 2.4.2.3.2. Des évidences contradictoires qui démontrent la nécessité d'une revue systématique avec méta-analyse

Plusieurs études rapportent une augmentation de la perception de l'effort lorsque la déshydratation s'installe progressivement lors de l'exercice à intensité fixe. Un exemple typique est donné dans la Figure 11 ci-bas.



**Figure 11.** Impact graduel de la déshydratation induite par l'exercice (1 à 4 % de la masse corporelle) sur la perception de l'effort lors d'un exercice de 120 min à vélo (33 °C, 50 % d'humidité et 9 km · h<sup>-1</sup> de vent)<sup>14</sup>.

Cela a été observé pour des niveaux de déshydratation dès 1 % (Logan-Sprenger et al., 2013; Logan-Sprenger et al., 2012) lors d'exercices de durée et d'intensité variée et

<sup>14</sup> Reproduit à partir des données de Montain & Coyle (1992).

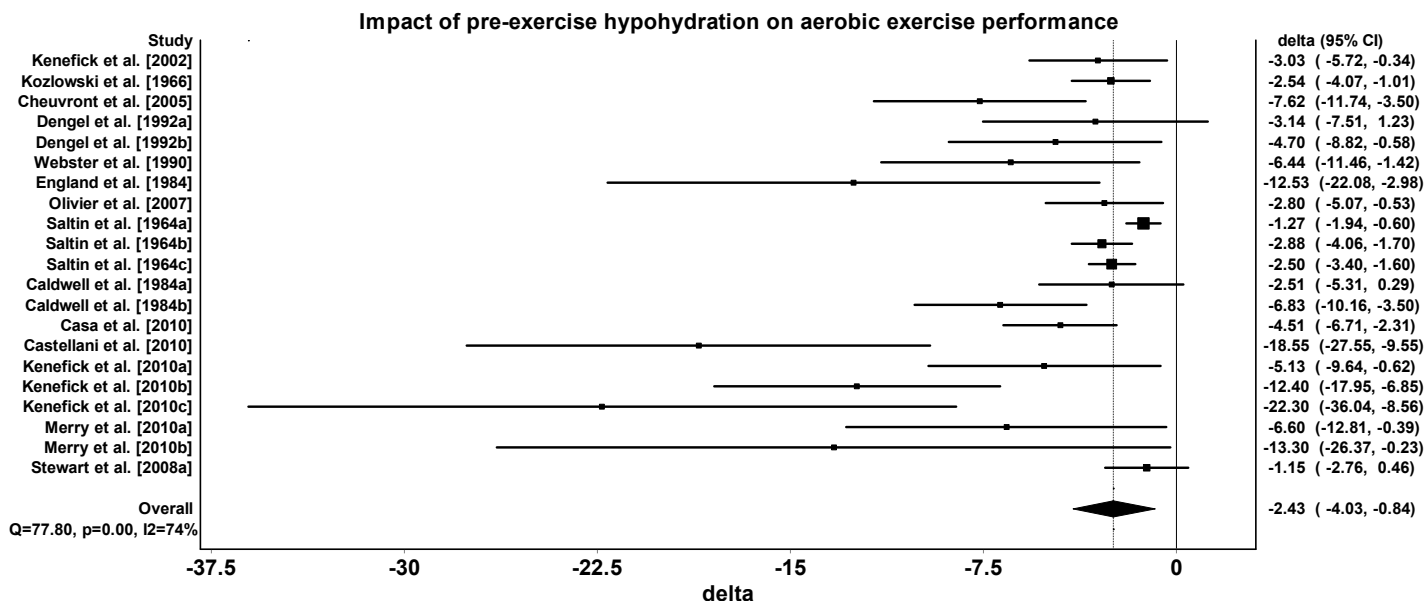
conduits dans divers environnements (Adams et al., 2019; Barr et al., 1991; Below et al., 1995; Fallowfield et al., 1996; Gava Pompermayer et al., 2014; Gonzalez-Alonso et al., 1995; Ishijima et al., 2009; James et al., 2017; Montain & Coyle, 1992; Murray et al., 1995; Walsh et al., 1994; Wittbrodt et al., 2015). De manière intéressante, l'augmentation de la perception de l'effort semble être observée même lorsque l'apport hydrique est manipulé à l'aveugle, sans que les participants n'aient conscience de leur statut hydrique (Funnell et al., 2019). Toutefois, une revue plus approfondie de cette littérature permet de constater que cet effet n'est pas observé dans un nombre important d'études (Backhouse et al., 2007; Bardis et al., 2017; Berkulo et al., 2016; Dion et al., 2013; Ebert et al., 2007; Erkmen et al., 2010; Ganio et al., 2006; Hashimoto et al., 2016; Hillman et al., 2011; Lambert et al., 2008; Lee et al., 2014; McConell et al., 1999; Muñoz et al., 2012; Perreault-Briere et al., 2019; Robinson et al., 1995), et ce, même pour des niveaux d'hypohydratation allant jusqu'à 4 % de la masse corporelle (Dugas et al., 2009).

Conclure sur cette littérature est donc complexe, car, à ce jour, (1) aucune revue systématique n'a été faite à ce sujet, (2) la méthodologie des études varie considérablement (hypohydratation présente dès l'initiation de l'exercice vs. déshydratation qui se développe progressivement pendant l'exercice, exercice continu vs. intermittent, etc.) et (3) la perception de l'effort est, dans la majorité des études, une donnée secondaire voire tertiaire qui n'est pas toujours rapportée/accessible. Ce constat souligne non seulement la nécessité mais aussi la pertinence d'effectuer une telle revue systématique de la littérature avec méta-analyse. Bien qu'une étude originale pourrait être conduite pour vérifier cela, cette dernière nécessiterait une taille d'échantillon conséquente et le contrôle très rapproché de nombreuses variables confondantes, ce qui réduit largement la faisabilité de la réalisation d'une telle étude. De plus, une telle étude ne permettrait pas de vérifier l'effet de facteurs confondants tels que la température ambiante, l'humidité et l'intensité de l'exercice, parmi d'autres. Or, cette possibilité existe en faisant une revue systématique avec méta-analyse puisque plusieurs études sont déjà disponibles et ont été conduites dans divers environnements et à diverses intensités d'exercice. Cela justifie donc l'usage de cette technique statistique dans ce contexte. En outre, cela permettrait de caractériser la magnitude de l'impact de la déshydratation sur cette variable clé, comme c'est le cas pour

la fréquence cardiaque et la température interne (augmentation de 3 battements · min<sup>-1</sup> et de 0,15-0,20 °C pour chaque 1 % de diminution de la masse corporelle respectivement). De ce fait, une brève description des principes sous-jacents à la méthode méta-analytique, ainsi que ses principales forces et faiblesses semble nécessaire.

#### 2.4.2.3.3. *Principes, avantages et limites des méta-analyses*

La méta-analyse réfère à un ensemble de méthodes/procédures statistiques qui permettent de rassembler et de combiner les résultats quantitatifs d'études originales afin de produire une synthèse des connaissances empiriques sur un sujet donné (Fortin & Gagnon, 2016; Higgins et al., 2019; Littell et al., 2008). Si, dans une étude, les participants constituent l'unité d'analyse, dans le cas d'une méta-analyse, c'est l'étude en soi qui devient l'unité d'analyse (Hagger, 2006). Brièvement, dans un premier temps, la taille d'effet de chaque étude est recueillie ou calculée. À ce stade, une unité commune doit être déterminée afin de comparer les résultats selon la même échelle. Toutes les tailles d'effet sont ensuite combinées afin de produire un effet global moyen. Cependant, ce dernier n'est pas calculé à l'aide d'une simple moyenne arithmétique. Puisque la taille d'un échantillon influence la taille de l'effet, chaque taille d'effet est pondérée selon le nombre de participants et la variance de l'étude (Hagger, 2006; Higgins et al., 2019). Ainsi, les tailles d'effet qui découlent d'études ayant un plus grand échantillon se voient accorder un poids plus important. Ultimement, ceci permet de calculer un effet moyen pondéré, qui s'accompagne d'une erreur standard ainsi que d'un intervalle de confiance. Ce dernier permet de déterminer le degré de confiance accordé à cet effet moyen pondéré et se traduit généralement par un intervalle de confiance à 95 % (IC 95 %). Les résultats d'une méta-analyse sont généralement exprimés à l'aide d'un graphique en forêt, comme dans la Figure 12 ci-bas. Cette technique permet de dépasser les limitations inhérentes à la simple procédure de *vote counting* qui consiste à uniquement quantifier la proportion de résultats significatifs par rapport à la totalité des études disponibles dans un domaine donné. Finalement, la méta-analyse constitue et est considérée comme le plus haut niveau de preuve scientifique (Higgins et al., 2019).



**Figure 12.** Graphique en forêt présentant l'effet combiné pondéré de l'hypohydratation pré exercice sur la performance d'endurance<sup>15</sup>.

Ce type d'analyse possède plusieurs forces (Higgins et al., 2019; St-Amand & Saint-Jacques, 2013), dont les principales sont :

- L'augmentation de la puissance statistique. Le regroupement des données issues de plusieurs études augmente la puissance statistique, ce qui permet d'estimer de façon plus précise l'ampleur de l'effet d'une intervention/d'une condition et de dégager les tendances qui se dessinent dans les études. Cela réduit le risque de commettre une erreur de type II (c.-à-d. conclure à l'absence d'effet/de relation alors qu'il y en a un ou une). Ceci est d'autant plus vrai dans le domaine de la physiologie de l'exercice où les tailles d'échantillons sont parfois faibles (entre 10 et 20 participants).
- L'augmentation de la capacité à répondre à des questions non posées par des études individuelles, et la possibilité de synthétiser des informations sur des domaines de recherche où les données s'accroissent et les résultats sont contradictoires. Elle peut également permettre de soulever de nouvelles hypothèses.

<sup>15</sup> Source : données issues d'une publication personnelle Deshayes, Jeker & Goulet. (2020).



- La vérification de l'effet de variables confondantes/modératrices, c.-à-d., de facteurs méthodologiques qui peuvent influencer le résultat principal et donc expliquer certaines divergences observées dans la littérature.

Toutefois, il faut garder en tête que les résultats ne sont applicables qu'à un contexte très précis; celui qui est fixé par les critères de sélection et d'inclusion des études. De plus, les résultats peuvent être difficiles à interpréter lorsqu'une forte hétérogénéité méthodologique et/ou qualitative est présente parmi les études incluses (Higgins et al., 2019). Enfin, bien que cette méthode soit souvent le fruit d'une revue systématique de la littérature, il est impossible d'affirmer, hors de tout doute, que les conclusions reflètent une vérité absolue. En effet, il est possible que certaines études aient été oubliées, notamment celles publiées dans une langue étrangère, celles non indexées dans les bases de recherches (littérature grise), ou encore des résultats de recherches non publiés ou rejetés pour publication, car les résultats ne vont pas en la faveur des croyances du domaine ou ne sont pas « statistiquement significatifs » (fréquemment appelés « résultats nuls »). Ce dernier phénomène, plus connu sous le nom de biais de publication, est un enjeu important lorsque vient le temps d'effectuer les analyses statistiques d'une méta-analyse.

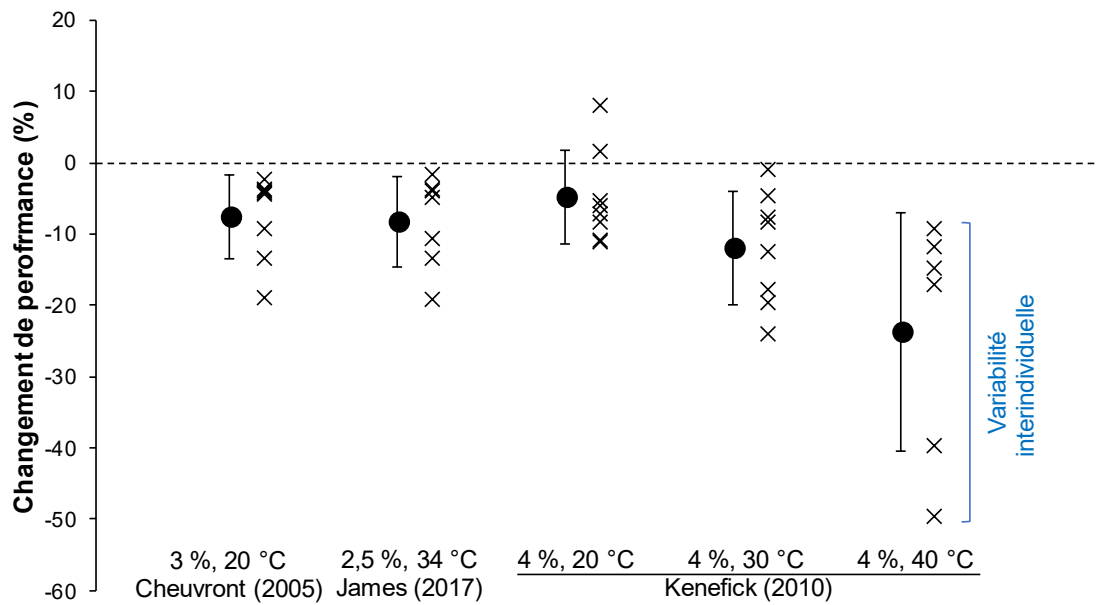
En résumé, bien qu'une revue systématique soit nécessaire pour confirmer l'effet de la déshydratation induite par l'exercice sur la perception de l'effort, il est actuellement mis de l'avant que cette dernière pourrait agir comme un médiateur clé dans la relation entre la déshydratation et la diminution de la performance d'endurance. La section suivante sera l'occasion de faire une mise à jour de la littérature concernant l'impact de la déshydratation sur la performance d'endurance.

#### 2.4.3. Performance d'endurance

Individuellement ou de concert, les facteurs présentés auparavant peuvent contribuer à réduire la performance d'endurance, d'autant plus si l'exercice est réalisé dans un environnement chaud ou humide (Chevront et al., 2010; de Korte et al., 2021; Galloway & Maughan, 1997; Maughan et al., 2012). De plus, il est à noter que la déshydratation est parfois également associée à une plus grande perturbation de l'intégrité et de la fonction

gastro-intestinale (Costa et al., 2019) et au développement d'inconforts et de problèmes gastro-intestinaux (de Oliveira et al., 2014) qui peuvent, eux aussi, affecter la performance d'endurance. S'il ne fait pas de doute que la déshydratation puisse altérer la performance d'endurance, le débat scientifique est davantage centré sur le niveau d'hypohydratation (% de réduction de la masse corporelle) à partir duquel cet effet est observé. Plus précisément, il est fréquemment mentionné que l'hypohydratation  $\geq$  à 2 % de la masse corporelle diminue la performance d'endurance (Cheuvront & Kenefick, 2014; Cheuvront et al., 2010; Sawka et al., 2007), et ce, même lorsque le statut hydrique des individus est manipulé à l'aveugle afin de réduire l'effet placebo/nocebo (Adams et al., 2018; Adams et al., 2019; Funnell et al., 2019; James et al., 2017). Par ailleurs, des diminutions de la performance d'endurance ont été observées dès 1 % d'hypohydratation (Bardis et al., 2013). Toutefois, plusieurs considérations méthodologiques importantes sont à prendre en compte lorsqu'il s'agit de s'intéresser aux impacts de l'hypohydratation sur la performance d'endurance. En effet, un regard plus nuancé de la littérature à ce sujet démontre, avant tout, que le type de protocole utilisé semble modérer les conclusions (Goulet, 2011; 2013; Périard et al., 2021). Effectivement, un impact délétère de la déshydratation semble être davantage observé lors de protocoles incrémentaux ou à intensité fixe jusqu'à épuisement comparativement aux protocoles de type contre-la-montre, où la déshydratation jusqu'à 4 % de la masse corporelle ne semble pas réduire la performance (Goulet, 2011; 2013). Il est à rappeler que les protocoles à intensité fixe jusqu'à épuisement souffrent d'une faible validité scientifique et écologique (Currell & Jeukendrup, 2008). De plus, la température ambiante, et donc celle de la peau (Cheuvront et al., 2005; Kenefick et al., 2010) (Figure 13), la présence de vent favorisant la thermolyse (Saunders et al., 2005), la durée d'exercice (Holland et al., 2017) ainsi que la familiarité à l'hypohydratation (Fleming & James, 2014) sont autant de facteurs qui peuvent modérer, parfois de manière très importante, les conclusions. Concernant le dernier point, il est à noter que les évidences précédemment exposées ont été obtenues auprès d'individus qui n'étaient pas spécifiquement habitués à l'hypohydratation (Fleming & James, 2014). De plus, il est possible que l'impact négatif de cette dernière sur la performance ne soit pas systématique et qu'une grande variabilité interindividuelle existe pour un niveau d'hypohydratation donné comme démontré dans la Figure 13 et initialement remarqué, il y a de cela 80 ans par Adolph (1947). Autrement dit,

pour un même niveau d'hypohydratation, certains individus pourraient voir leur performance largement diminuer tandis que d'autres pourraient avoir une meilleure tolérance, et ainsi voir leur performance trivialement diminuer, se maintenir (Chevront et al., 2003; Sawka & Noakes, 2007), voire même légèrement augmenter (voir Kenefick, 2010 à 20 °C dans la Figure 13 ci-dessous). Cette variabilité interindividuelle, probablement causée par une meilleure tolérance/résilience, pourrait également contribuer, en partie, à expliquer certains résultats divergents observés dans la littérature.



**Figure 13.** Variabilité interindividuelle dans la réponse de la performance d'endurance lorsque hypohydraté<sup>16</sup>. Les croix représentent les changements de performance des individus. Les ronds noirs et les barres représentent le changement de performance moyen  $\pm$  déviation standard. Ces 3 études utilisaient une période de vélo à intensité fixe suivie d'un contre-la-montre de 15-30 min où le travail total (kJ) était mesuré (vent faible : 0 à 7 km  $\cdot$  h<sup>-1</sup>). Les % indiqués en bas de la figure correspondent aux % d'hypohydratation au début du test de performance.

#### 2.4.4. Performance cognitive

<sup>16</sup> Reproduit à partir des données disponibles dans les articles originaux.

Le traitement cognitif de haut niveau, incluant les fonctions exécutives, est essentiel, en particulier lorsque des décisions tactiques et vitales doivent être prises. En effet, les individus tels que les militaires, les services médicaux d'urgence, les pompiers et, dans certains cas, les athlètes, doivent maintenir un haut niveau de performance cognitive tout en étant confrontés à un environnement chaud, où l'accès à l'eau pourrait être restreint, les prédisposant à l'hypohydratation.

L'impact de l'hypohydratation sur la performance cognitive a été largement étudié. Les premières évidences expérimentales rapportent que l'hypohydratation de 2 % de la masse corporelle, induite par l'exercice en environnement chaud, altère la concentration, les fonctions exécutives ainsi que la coordination motrice, avec une altération accrue pour des niveaux d'hypohydratation modérés (4 % de la masse corporelle) (Bijlani & Sharma, 1980; Gopinathan et al., 1988; Sharma et al., 1983; Sharma et al., 1986). Dans la dernière décennie, ce sujet a été discuté à de multiples reprises dans diverses revues narratives, qui ensemble, soutiennent l'idée selon laquelle la performance cognitive est altérée en présence d'une hypohydratation  $\geq 2$  % de la masse corporelle (Adan, 2012; Masento et al., 2014; Sawka et al., 2007). Toutefois, il est important de souligner que cela n'est pas systématiquement rapporté et que plusieurs études n'observent aucune altération de la performance cognitive (Adam et al., 2008; D'anci et al., 2009; Goodman et al., 2019b; Wittbrodt et al., 2015), et ce malgré des niveaux d'hypohydratation allant jusqu'à 4 à 5 % de la masse corporelle (Ely et al., 2013; van den Heuvel et al., 2017). Divers aspects méthodologiques peuvent expliquer les résultats divergents (Grandjean & Grandjean, 2007; Lieberman, 2007; 2010; Masento et al., 2014) et la forte hétérogénéité qui est observée dans la littérature (Goodman et al., 2019a; Wittbrodt & Millard-Stafford, 2018). Premièrement, il est souvent mentionné que l'hypohydratation induite par l'exercice, d'autant plus si ce dernier est réalisé dans un environnement chaud, pourrait confondre l'impact de l'hypohydratation *per se*, à cause du stress supplémentaire induit par l'exercice et la chaleur, même si ce point n'est pas toujours soutenu expérimentalement (Cian et al., 2000; Cian et al., 2001). En effet, l'altération de la performance cognitive semble être exacerbée si la tâche cognitive est complexe et le stress thermique sévère et prolongé (Martin et al., 2019) et combiné à l'hyperthermie (Schmit et al., 2017). Enfin, il semblerait

que certaines tâches cognitives soient plus impactées que d'autres par l'hypohydratation, notamment celles d'ordre supérieur (attention, coordination motrice, fonctions exécutives) comparativement aux tâches plus simples (Wittbrodt & Millard-Stafford, 2018).

À ce jour, les évidences suggèrent que, si présent, l'impact de l'hypohydratation sur la performance cognitive est (1) relativement faible/modéré (Goodman et al., 2019a; Wittbrodt & Millard-Stafford, 2018), (2) plutôt observé pour les tâches cognitives d'ordre supérieur, telles que les fonctions exécutives (Wittbrodt & Millard-Stafford, 2018), et (3) dépendant de la sévérité de l'hypohydratation (Wittbrodt & Millard-Stafford, 2018), du stress thermique (Martin et al., 2019; Schmit et al., 2017), et de la difficulté de la tâche cognitive à accomplir (Pageaux & Lepers, 2018). Plusieurs hypothèses ont été émises pour expliquer les impacts de l'hypohydratation sur la performance cognitive (Cheuvront & Kenefick, 2014; Masento et al., 2014), dont les changements structuraux/morphologiques au niveau de l'encéphale. Si certaines évidences suggèrent une plus grande perméabilité de la barrière hémato-encéphalique lorsque l'exercice est réalisé à la chaleur avec une restriction hydrique menant à une hypohydratation faible à modérée (2,8 % de la masse corporelle) (Watson et al., 2006), les données concernant les changements de volume de l'encéphale sont plutôt contradictoires. La majorité des études n'observent pas de changement du volume total de l'encéphale lorsque hypohydraté de 1 à 3 % de la masse corporelle (Dickson et al., 2005; Kempton et al., 2009; Watson et al., 2010; Nakamura et al., 2014; Meyers et al., 2016; Wittbrodt et al., 2018). Concernant le volume des ventricules latéraux, les évidences sont plus divergentes; certaines études rapportent une réduction (Watson et al., 2010), une augmentation (Kempton et al., 2009; Kempton et al., 2011; Wittbrodt et al., 2018) ou l'absence de changement (Dickson et al., 2005; Meyers et al., 2016; Streitburger et al., 2012) lorsque hypohydraté de 1 à 3 % de la masse corporelle. Toutefois, Wittbrodt et al., (2018) ont démontré que plusieurs structures cérébrales sont sensibles aux changements d'osmolalité plasmatique, mais que les changements de ces structures n'étaient pas liés aux performances visuomotrices. Toutefois, si des mécanismes physiologiques clairs permettent d'expliquer l'effet néfaste de la déshydratation sur les variables physiologiques et *in fine* la performance d'endurance, cela n'est pas le cas concernant la performance cognitive. En effet, aucune évidence systématique ne permet de

démontrer un mécanisme par lequel le stress hypovolémique hyperosmotique contribuerait à altérer le fonctionnement cognitif (Cheuvront & Kenefick, 2014). En revanche, il est fréquemment avancé que les symptômes associés à l'hypohydratation, incluant, mais sans s'y limiter, la soif, les maux de tête, la fatigue mentale et l'altération de l'humeur (Armstrong et al., 2012; Ely et al., 2013; Ganio et al., 2011; Goodman & Marino, 2021; Suh et al., 2021; Szinnai et al., 2005) pourraient agir comme une distraction et ainsi réduire les performances cognitives (Cheuvront & Kenefick, 2014; Edmonds et al., 2013). À cet égard, il a récemment été démontré que le stimulus hyperosmotique et la perception de la soif qui y est associée exacerbent la fatigue mentale (Goodman & Marino, 2020; Suh et al., 2021). De plus, là encore, il se peut que les individus ne répondent pas systématiquement de la même manière à l'hypohydratation, et il ne peut être écarté que certains puissent avoir une meilleure capacité à tolérer (résilience cognitive) les effets de cette dernière (Cheuvront & Kenefick, 2014; Wittbrodt & Millard-Stafford, 2018).

### **2.5. Expositions répétées et fréquentes à la déshydratation : une possible habitude?**

L'accoutumance ou l'habitude est généralement définie comme une réduction des réponses et/ou des perceptions à une stimulation répétée (Mercer & Werner, 2001). Dans le contexte de la présente thèse, le terme habitude a été préféré au terme adaptation qui, lui, réfère plutôt à des changements physiologiques/anatomiques qui réduisent les stress physiologiques induits par l'environnement (Mercer & Werner, 2001).

L'absence d'effet de l'hypohydratation ou la grande variabilité interindividuelle dans la réponse à l'hypohydratation sur la performance d'endurance et cognitive pourrait en partie s'expliquer par un effet d'habitude. En effet, il est possible que certaines personnes soient plus tolérantes à l'hypohydratation du fait de leurs fréquentes expositions répétées à ce stress lors d'entraînements ou de compétitions. En effet, certains athlètes s'entraînent plusieurs fois par semaine avec un apport hydrique souvent faible (Fudge et al., 2008; Fudge et al., 2006; Onywera et al., 2004), les exposant de manière répétée à des niveaux d'hypohydratation de 2-3 % de la masse corporelle (Fudge et al., 2008).

Contrairement à la croyance générale, l'idée selon laquelle il serait possible pour l'Homme de s'habituer aux effets aigus répétés de l'hypohydratation a émergé dans les dernières

décennies. L'idée se fonde sur la capacité de l'organisme à s'accoutumer à des stress aigus répétés et d'en réduire leurs effets lors d'expositions similaires futures (Leonard, 2015). Comme pour l'exposition à l'altitude (Burtscher et al., 2018) et à la chaleur (Armstrong & Maresh, 1991; Périard et al., 2015), deux situations dont il est possible d'en réduire les impacts physiologiques inhérents en s'y acclimatant, il pourrait être possible de s'habituer aux effets de l'hypohydratation. Ainsi, il ne peut être exclu que certaines adaptations physiologiques puissent se produire à la suite d'expositions répétées à l'hypohydratation et entraîner de meilleures réponses physiologiques et subjectives lors d'expositions ultérieures. Par exemple, des expositions répétées au stress hyperosmotique pourraient éventuellement conduire à une réduction de la sensation de la soif et de la perception de l'effort, deux variables qui peuvent influencer la performance d'endurance et la performance cognitive, comme décrit précédemment.

#### 2.5.1. Exposition répétée à la déshydratation

C'est dans ce contexte que certains auteurs ont émis l'hypothèse que l'exposition répétée à l'hypohydratation pourrait atténuer certains effets de cette dernière et en réduire l'impact subséquent sur la performance d'endurance (Adolph, 1947; Cheuvront et al., 2003; Cotter et al., 2014; Fleming & James, 2014; Garrett et al., 2014; James et al., 2019; Merry et al., 2010). Plusieurs données transversales soutiennent ce point, soulignant que les individus entraînés et les athlètes d'endurance sont fréquemment exposés à d'importants niveaux d'hypohydratation sans toutefois que leurs performances physiques en soient présumément altérées de façon importante (Cheuvront et al., 2003; Kao et al., 2008; Racinais et al., 2021; Sharwood et al., 2004; Tan et al., 2021; Zouhal et al., 2011; Zouhal et al., 2009). Un résumé de ces études est exposé dans le Tableau 4. Dès 1967, Pugh et al., mentionnaient que : « [...] la tolérance à une température corporelle élevée est une condition nécessaire au succès lors d'un marathon. Une autre condition de succès semble être une grande tolérance aux pertes hydriques. ». De manière importante, le fait que les vainqueurs des épreuves d'endurance soient également ceux qui perdent le plus de masse corporelle pendant l'épreuve ne signifie pas que la déshydratation puisse avoir un effet ergogénique. Bien qu'aucune relation de causalité ne puisse être établie, cette relation soulève plusieurs

questions : (1) la déshydratation  $\geq 2$  % de la masse corporelle a-t-elle réellement un impact négatif sur la performance dans un contexte hors laboratoire ou lors d'une performance de type contre-la-montre? et (2) est-il possible que les athlètes aient une meilleure capacité à tolérer les pertes hydriques? À cet égard, comparativement à des individus non entraînés, les individus entraînés en endurance ( $\dot{V}O_{2max} = 45$  vs.  $65 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$  respectivement) ont une réponse neuroendocrine atténuée (relation osmolalité plasmatique/ADH) (Merry et al., 2008) de même qu'une dérive cardiaque, thermique ainsi qu'une diminution de la performance lors d'un contre-la-montre de 40 minutes à vélo moins importante (-13 % vs. -6 % respectivement) lorsque hypohydraté de 2 % de la masse corporelle (Merry et al., 2010). Ce constat laisse entrevoir la possibilité d'une certaine tolérance/résilience à l'hypohydratation, qui pourrait réduire l'impact sur la performance chez les individus qui y sont habitués en raison d'expositions répétées. Précédemment, plusieurs auteurs avaient déjà rapporté que l'acclimatation à la chaleur et l'entraînement physique de court terme (2-3 semaines) peuvent réduire l'impact de l'hypohydratation (5 % de la masse corporelle) sur le stress thermique et cardiovasculaire dans un environnement confortable (20-25 °C) à chaud (35-49 °C) (Buskirk et al., 1958; Sawka et al., 1983). L'acclimatation à la chaleur pourrait également atténuer, sans complètement renverser, les diminutions des fonctions exécutives induites par le stress thermique, bien que les évidences soient peu nombreuses et divergentes (Barry et al., 2022; Piil et al., 2019; Racinais et al., 2017; Radakovic et al., 2007).



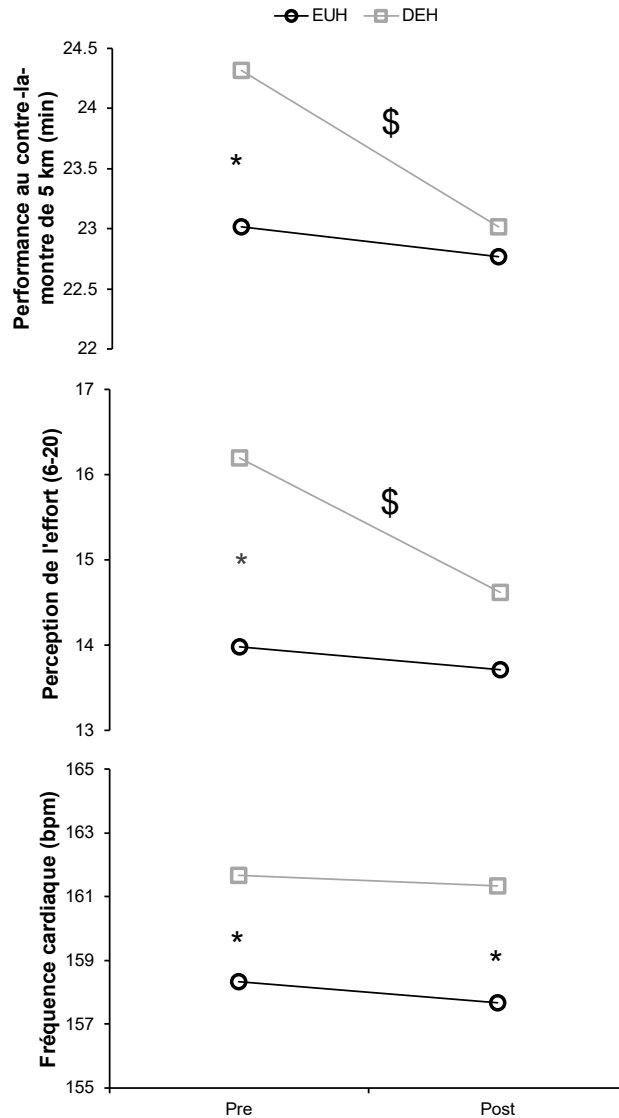
Tableau 4. Études qui se sont intéressées à la relation entre les changements de masse corporelle et la performance lors de compétitions.

Étude	Épreuve, échantillon	Variable de performance	Relation changement de masse corporelle (%) et performance	Conclusion
Chevront et al., (2003)	Revue de littérature Analyse effectuée sur 24 études (marathon)	Vitesse moyenne de course ( $m \cdot \text{min}^{-1}$ )	Relation positive ( $r = 0,50, p < 0,01$ ) $\Delta$ masse corporelle : -8 à -2 %	Ceux qui performant le mieux perdent plus de masse corporelle.
Sharwood et al., (2004)	Ironman environnement tempéré N = 767 (2 années compilées).	Temps total (min)	Relation positive ( $r = 0,23, p < 0,01$ ) $\Delta$ masse corporelle : -11 à + 3 %	Ceux qui performant le mieux perdent plus de masse corporelle.
Kao et al., (2008)	Ultra-marathon a) 12 h, N = 18 (1 femme) b) 24 h, N = 23 (4 femmes)	Distance complétée (km)	a) Pas de relation ( $p = 0,39$ ) b) Relation négative ( $p < 0,01$ ) $\Delta$ masse corporelle : a) -3 % (-7 à 0 %) b) -5 % (-11 à -1 %)	Lors de l'épreuve de 24 h ceux qui performant le mieux perdent plus de masse corporelle.
Zouhal et al., (2011)	Marathon environnement tempéré N = 643 (83 femmes)	Temps (min)	Relation positive ( $r = 0,22, p < 0,01$ ) $\Delta$ masse corporelle : -2 % (-8 à +5 %)	Ceux qui performant le mieux perdent plus de masse corporelle.

Racinais et al., (2021)	Marathon et marche (20 et 50 km) N = 83 athlètes élités (36 femmes)	a) Classement b) Temps (min)	a) Pas de relation ( $r = -0,17, p = 0,20$ ) b) Pas de relation ( $r = 0,18, p = 0,17$ ) $\Delta$ masse corporelle : -2 % (-6 à +3 %)	Pas de relation.
Tan et al., (2021)	Marathon environnement tropical N = 12 athlètes élités (6 femmes)	Temps (min)	Pas de relation ( $r = 0,09, p = 0,33$ ) $\Delta$ masse corporelle : -5 % (-7 à -4 %)	Pas de relation.

---

Toutefois, ces évidences ne répondent pas directement à la question qui est de savoir si une exposition répétée à la déshydratation peut permettre d'en réduire les effets néfastes. Outre le niveau d'entraînement, Fleming & James (2014) ont émis l'hypothèse que la familiarité avec l'hypohydratation pourrait davantage réduire l'impact de cette dernière sur la performance d'endurance. Dans leur étude, les auteurs démontrent qu'une exposition répétée à l'hypohydratation (2,5 % de la masse corporelle) peut atténuer de façon importante, sans toutefois complètement renverser, l'impact délétère sur la performance d'un contre-la-montre de 5 km à la course chez des individus actifs, mais non spécifiquement entraînés en endurance. En effet, malgré une performance significativement plus faible dans la condition hypohydratée au début de l'intervention (+78 secondes, soit 6 %,  $p < 0,01$ ), aucune différence n'est observée entre les deux conditions (+15 secondes, soit 1 %,  $p = 0,06$ ) après quatre séances d'habituation à l'hypohydratation (60 min, 75 %  $\dot{V}O_{2max}$ , -2,5 % de la masse corporelle) (Figure 14a). Fait très intéressant, après habituation, les auteurs notent une diminution concomitante de la perception de l'effort dans la condition hypohydratée, bien que le stress cardiovasculaire soit toujours plus important (Figure 14b-c). Cela laisse entrevoir qu'une certaine habituation, du moins d'ordre psychologique, opère. Fait important à souligner, les séances d'habituation et les tests de performance étaient réalisés dans un environnement tempéré (22 °C). Une année auparavant, Mendes et al., (2013) avaient émis une hypothèse similaire pour les sports de combat, milieu dans lequel certains athlètes pratiquent le *weight cutting*, soit une perte de masse corporelle dans les heures avant la pesée afin de concourir dans une catégorie de poids inférieure (principalement par d'importantes pertes d'eau par la sueur). En utilisant un devis transversal, les auteurs ont comparé des athlètes ayant une grande expérience dans le *weight cutting* à leurs homologues non-adeptes de cette pratique. Les auteurs concluaient que s'exposer de manière chronique à une perte de masse corporelle (5 %) avant les combats n'induisait pas une meilleure tolérance aux effets négatifs sur la performance subséquente.



**Figure 14.** Effet de l'hypohydratation de 2,5 % de la masse corporelle sur (a) la performance d'endurance, (b) la perception de l'effort et (c) la fréquence cardiaque avant (pré) et après (post) 4 séances d'habituation à l'hypohydratation faible. \*  $p < 0,05$  EUH vs. DEH (effet d'hydratation), \$  $p < 0,05$  pré vs. post (effet d'habituation)<sup>17</sup>. EUH = euhydraté, DEH = déshydraté.

À cet égard, dans son ouvrage *Men in the Desert* (chapitre 20, *Life in Deserts*), Adolph (1947) fait mention de travaux qui ont été conduits afin de spécifiquement vérifier la possibilité de réduire les effets néfastes de la déshydratation en s'y exposant fréquemment. La moitié des participants étaient déshydratés tous les deux jours pendant quatre à sept

<sup>17</sup> Reproduit à parti des données de Fleming & James (2014).

expositions, tandis que les autres étaient déshydratés uniquement lors de la première et de la dernière exposition (5 % de la masse corporelle). Toutefois, les auteurs n'observent aucune différence sur la réponse cardiovasculaire (fréquence cardiaque et régulation du volume plasmatique), thermique ni même sur le seuil d'épuisement à la suite de l'exposition répétée. Ainsi, les auteurs concluaient que : *“only negative evidence has been obtained regarding the hypothesis that man acclimatizes appreciably to dehydration.”* (page 154, chapitre 9). En revanche, les conditions expérimentales, de même que les méthodes et les résultats, sont très peu détaillés, et de manière surprenante, ces résultats ne sont presque jamais cités dans la littérature du domaine. Enfin, plus récemment, le laboratoire du Pr. Lewis James en Angleterre a tenté de reproduire les résultats obtenus en 2014. Brièvement, contrairement aux résultats de 2014, Funnell (2019) observe une performance (contre-la-montre course à pied de 3 km) significativement altérée par l'hypohydratation faible (2 % de la masse corporelle) tant avant qu'après 4 séances d'habituation à l'hypohydratation. Le nombre de participants à cette étude était relativement faible (6 par groupe) et peut expliquer l'absence d'effet (faible puissance statistique). De manière intéressante, les auteurs soulignent que malgré l'absence d'effet statistique, sur les 6 participants ayant effectué les 4 séances d'habituation à la déshydratation, 4 ont observé une atténuation de la baisse de performance et 1 a vu une amélioration de sa performance après habituation. Toutefois, à ce jour, leurs travaux n'ont pas été publiés dans un journal révisé par les pairs.

Ainsi, à notre connaissance, l'étude de Fleming & James (2014) est donc la seule révisée par les pairs bien détaillée et accessible, à avoir expérimentalement vérifié si l'entraînement hypohydraté atténue l'impact de l'hypohydratation sur la performance d'endurance (Jeukendrup, 2017). En revanche, aucune étude ne semble s'être intéressée à la possibilité que l'exposition répétée à l'hypohydratation puisse également contribuer à diminuer son impact sur la performance cognitive.

### 2.5.2. Protocoles d'acclimatation à la chaleur permettant une déshydratation

Plus récemment, plusieurs études ont émis l'hypothèse que l'hypohydratation induite par la restriction hydrique pendant l'acclimatation à la chaleur pourrait induire un stress physiologique supérieur et donc augmenter la réponse des hormones régulant l'équilibre hydroélectrolytique, engendrant ainsi des adaptations plus importantes comparativement au même protocole réalisé euhydraté (Garrett et al., 2014; Périard et al., 2015). En effet, le stress hypovolémique hyperosmotique induit par l'hypohydratation aiguë stimule la sécrétion de l'ADH et de l'aldostérone (Kenefick et al., 2007; Maresh et al., 2004; Montain et al., 1997) qui induisent respectivement la réabsorption rénale d'eau et de sodium. En contribuant à la rétention hydroélectrolytique après l'exercice/l'hypohydratation, ce processus favorise l'augmentation subséquente du volume plasmatique. À ce titre, Garrett et al., (2014) ont observé qu'un protocole d'acclimatation à la chaleur de cinq jours permettant une hypohydratation de 2 % de la masse corporelle engendre des augmentations des concentrations plasmatiques d'aldostérone, du volume plasmatique (8 vs. 4 %), ainsi qu'une diminution de la fréquence cardiaque à l'exercice significativement plus importante, comparativement au même protocole réalisé euhydraté. Aucune différence n'a toutefois été observée au niveau de la performance à vélo (test incrémental jusqu'à l'épuisement). Afin d'éliminer l'impact additionnel de l'hypohydratation sur le stress thermique, et donc isoler les effets de cette dernière, l'intensité de l'exercice était fixée à une température rectale de 38,5 °C. Ces résultats concordent avec ceux obtenus par Akerman et al., (2017) qui ont démontré que la déshydratation de 3 % de la masse corporelle pendant une seule séance d'exercices de type callisthénie de 90 minutes à la chaleur induit une réponse hypervolémique et un effet hypotenseur significativement plus important après 24 heures comparativement à la même séance réalisée euhydratée. Il est à noter que ces travaux sont issus du même laboratoire que ceux de Garrett et al., (2014) et Merry et al., (2008; 2010) (Laboratoire du Pr. James Cotter en Nouvelle-Zélande). Toutefois, les observations faites par Garrett et al., (2014) n'ont pas été répliquées par la suite auprès d'individus du même âge, ayant une  $\dot{V}O_{2\max}$  similaire et soumis à des protocoles d'acclimatation à la chaleur et des niveaux d'hypohydratation similaires (Haroutounian et al., 2021; Neal et al., 2016; Pethick et al., 2019; Schleh et al., 2018;

Travers et al., 2020). Il est toutefois intéressant de constater que ces études parviennent à la même conclusion, démontrant que l'hypohydratation faible (2 % de la masse corporelle) ne semble pas altérer les adaptations inhérentes à un protocole d'acclimatation à la chaleur de court/moyen terme. Fait important, il est à noter que ces études effectuaient leurs tests de performance, autant au début qu'à la fin de l'intervention, dans un état d'euhydratation. Ainsi, contrairement à Fleming & James (2014), ces études ne permettent pas spécifiquement de vérifier l'impact d'une exposition répétée à la déshydratation sur une performance subséquente elle-même réalisée hypohydratée.

### 2.5.3. Synthèse : une revue de littérature qui soulève plusieurs questions

En plus d'être un possible médiateur clé dans la relation entre la déshydratation induite par l'exercice et la performance d'endurance, la perception de l'effort pourrait également jouer un rôle central dans le processus d'habituation à l'hypohydratation. En effet, l'observation faite par Fleming & James (2014) laisse supposer que la diminution de la perception de l'effort engendrée par l'exposition répétée à la déshydratation pourrait en partie expliquer l'atténuation qui est observée dans la diminution de la performance d'endurance. Ceci ouvre donc la voie vers la nécessité de tenter de reproduire ces résultats afin de les confirmer, mais aussi et surtout, vers l'importance d'effectuer une revue approfondie de la littérature disponible à ce jour pour valider la relation entre la déshydratation induite par l'exercice et la perception de l'effort.

Dans un second temps, les résultats de l'étude de Fleming & James (2014) soulèvent plusieurs autres questions. En effet, les résultats auraient-ils été différents si (1) le protocole d'habituation avait été effectué à la chaleur; (2) les participants avaient été exposés à des niveaux d'hypohydratation plus importants et; (3) les participants avaient effectué un protocole d'habituation plus long (plus d'expositions à la déshydratation). De surcroît, il demeure incertain que l'exposition à deux niveaux d'hypohydratation différents (4 vs. 2 % de la masse corporelle) au cours du protocole d'habituation conduirait à des effets de performance similaires ou différents et le type d'effet que produirait une habitude à un niveau d'hypohydratation modéré (4 % de la masse corporelle) lorsque la performance est

évaluée à un niveau d'hypohydratation faible (2 % de la masse corporelle). Bien qu'ensemble certaines évidences précédemment exposées laissent entrevoir une possible habitude aux effets aigus et répétés de l'hypohydratation, elles démontrent également le manque d'études s'intéressant spécifiquement aux possibilités de s'accoutumer à l'hypohydratation *per se*. De surcroît, les effets de l'exposition répétée à des niveaux d'hypohydratation plus élevés (4 % de la masse corporelle), sur une plus longue période, dans un environnement plus chaud, de même que les impacts sur la performance cognitive, n'ont pas été étudiés. C'est donc dans ce contexte que s'inscrit la présente thèse. Les objectifs, les questions de recherches et les hypothèses principales sont présentées dans la section suivante.

## **2.6. Objectifs, questions de recherche et hypothèses**

Cette thèse vise donc à répondre aux questions suivantes :

- 1) Quel est l'impact de la déshydratation induite par l'exercice sur la perception de l'effort?
- 2) Quel est l'impact de la déshydratation faible (2 %) et modérée (4 % de la masse corporelle) sur la réponse cardiovasculaire, thermique et subjective (incluant la perception de l'effort), lorsque non habitué à cette dernière?
- 3) Quel est l'impact de l'hypohydratation faible et modérée sur la performance d'endurance et cognitive lorsque non habitué à cette dernière?
- 4) Une exposition répétée à l'hypohydratation faible et modérée peut-elle permettre d'en réduire les impacts néfastes sur les variables précédemment mentionnées dans les questions (1), (2) et (3)?

Dans un premier temps, une revue systématique de la littérature avec méta-analyse ayant pour objectif de caractériser la magnitude de l'effet de la déshydratation sur la perception de l'effort sera présentée (1<sup>er</sup> article). Plus précisément, cette méta-analyse visait à répondre aux questions suivantes :

- i. Le changement de perception d'effort pendant l'exercice est-il associé à la déshydratation?;
- ii. Quel est l'ampleur de l'effet de la déshydratation sur la perception de l'effort?;



- iii. L'ampleur de cet effet est-elle importante d'un point de vue pratique?;
- iv. Existe-t-il des facteurs identifiables parmi la température ambiante, le niveau d'humidité, l'intensité de l'exercice, la durée de l'exercice et la capacité aérobie qui peuvent modérer la relation entre ces deux variables?;
- v. Dans quelle mesure le stress cardiovasculaire médie la relation entre ces deux variables ?

L'hypothèse principale émise est que :

- La déshydratation serait associée à une plus grande perception de l'effort, et ce, proportionnellement au déficit hydrique induit.

Dans un second temps, deux articles originaux seront présentés.

Le premier (2<sup>e</sup> article) visait à déterminer dans quelle mesure des niveaux d'hypohydratation faibles et modérés ont un impact :

- i. Sur la réponse cardiovasculaire, thermique et subjective ainsi que sur la performance d'endurance;
- ii. Si une exposition répétée sur une période de 4 semaines modère la réponse de base, par rapport à une situation où l'euhydratation est maintenue pendant l'exercice.

Les hypothèses suivantes ont été émises :

- Le stress cardiovasculaire, thermique et subjectif serait significativement exacerbé par l'hypohydratation, d'autant plus avec l'hypohydratation modérée, mais qu'après une exposition répétée, il serait réduit;
- La performance d'endurance serait significativement réduite par l'hypohydratation, d'autant plus avec l'hypohydratation modérée, mais qu'après une exposition répétée, elle serait similaire, qu'une hydratation adéquate soit maintenue ou non pendant l'exercice et;
- Le changement de performance après habitude serait plus important lors de l'hypohydratation faible comparativement à l'hypohydratation modérée.

Enfin, dans le second article original (3<sup>e</sup> et dernier article de cette thèse), nous voulions vérifier :

- i. L'impact de l'hypohydratation faible et modérée sur la performance cognitive, principalement les fonctions exécutives;
- ii. Si une exposition répétée pouvait réduire les impacts délétères de l'hypohydratation sur ces variables.

Les hypothèses émises sont présentées ci-dessous :

- La performance cognitive serait marginalement, mais significativement atténuée par l'hypohydratation;
- Mais qu'après une exposition répétée à l'hypohydratation, la performance cognitive serait similaire, qu'une hydratation adéquate soit maintenue ou non pendant l'exercice.

Le chapitre subséquent présente les principaux résultats obtenus.

## CHAPITRE III. RÉSULTATS

### 3.1. Impact of Dehydration on Perceived Exertion During Endurance Exercise: a Systematic Review with Meta-Analysis

Article publié le 5 mai 2022 dans *Journal of Exercise Science & Fitness*.

#### 3.1.1. Résumé

**Contexte :** Comprendre l'impact de divers stress sur la perception de l'effort (RPE) est pertinent d'un point de vue de la performance et de l'adhésion/participation à l'exercice. Les athlètes et les personnes physiquement actives d'un point de vue récréationnel se déshydratent pendant l'exercice. Aucune tentative n'a été faite pour déterminer systématiquement l'impact de la déshydratation induite par l'exercice (EID) sur la RPE.

**Objectif :** La présente méta-analyse visait à déterminer les effets de EID sur RPE lors de l'exercice d'endurance et à examiner l'effet modérateur de facteurs confondants potentiels.

**Analyses :** Les analyses statistiques ont été effectuées sur des valeurs brutes de RPE à l'aide de modèles à effets aléatoires (effets moyens pondérés) et de méta-régressions avec des erreurs standard robustes, et avec un effet pratique significatif fixé à 1 point de différence entre la condition euhydratée (EUH) et EID. Seules les études croisées contrôlées qui mesuraient la RPE avec une échelle de Borg chez des adultes en santé réalisant  $\geq 30$  minutes d'exercice d'endurance continu tout en se déshydratant ou en buvant pour maintenir EUH ont été incluses.

**Résultats :** Seize études ont été incluses, représentant 147 personnes. La perte de masse corporelle moyenne avec EUH était de  $0,5 \pm 0,4$  %, contre  $2,3 \pm 0,5$  % avec EID (étendue : 1,7 to 3,1 %). Dans un EID de 0,5 à 3 % de la masse corporelle, une différence maximale de RPE de 0,81 point (IC 95 % : 0,36-1,27) a été observée entre les conditions. Une méta-régression a révélé que la RPE augmente de 0,21 point pour chaque augmentation de 1 % de EID (IC 95 % : 0,12-0,31). L'humidité, la température ambiante et la capacité aérobie ne modifiaient pas la relation entre EID et RPE.

**Conclusion :** Ainsi, il est peu probable que les effets de EID sur RPE soient significatifs d'un point de vue pratique jusqu'à une perte de masse corporelle d'au moins 3 %.

**Mots clés :** hydratation, hypohydratation, performance, perception de l'effort, RPE

# **Impact of Dehydration on Perceived Exertion During Endurance Exercise: A Systematic Review with Meta-analysis**

Thomas A. Deshayes<sup>1,2</sup>, Timothée Pancrate<sup>1</sup>, Eric D.B. Goulet<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> Faculty of physical activity sciences, University of Sherbrooke, P.Q., J1K 2R1, Canada  
(TAD: Thomas.Deshayes@USherbrooke.ca; TP: Timothee.Pancrate@USherbrooke.ca)

<sup>2</sup> Research Center on Aging, University of Sherbrooke, P.Q., J1H 4C4, Canada

**Running head:** Impact of Exercise-induced Dehydration on Perceived Exertion

## **Authors ORCIDs**

Deshayes: 0000-0002-7620-1939

Goulet: 0000-0001-5117-9977

Pancrate: 0000-0002-4161-5875

Correspondence: Eric D.B. Goulet, Ph.D.

Performance, Hydration and Thermoregulation Laboratory

University of Sherbrooke

2500 boul. de l'Université

Sherbrooke, Québec, Canada

J1K 2R1

E-mail: Eric.Goulet@USherbrooke.ca

Phone number: 1-819-821-8000 \*62728

Fax number: 1-819-821-7970

## **Abstract**

**Background:** Understanding the impact of stressors on the rating of perceived exertion (RPE) is relevant from a performance and exercise adherence/participation standpoint. Athletes and recreationally active individuals dehydrate during exercise. No attempt has been made to systematically determine the impact of exercise-induced dehydration (EID) on RPE.

**Objective:** The present meta-analysis aimed to determine the effect of EID on RPE during endurance exercise and examine the moderating effect of potential confounders.

**Data analyses:** Performed on raw RPE values using random-effects models weighted mean effect summaries and meta-regressions with robust standard errors, and with a practical meaningful effect set at 1 point difference between euhydration (EUH) and EID. Only controlled crossover studies measuring RPE with a Borg scale in healthy adults performing  $\geq 30$  min of continuous endurance exercise while dehydrating or drinking to maintain EUH were included.

**Results:** Sixteen studies were included, representing 147 individuals. Mean body mass loss with EUH was  $0.5 \pm 0.4\%$ , compared to  $2.3 \pm 0.5\%$  with EID (range 1.7 to 3.1%). Within an EID of 0.5 to 3% body mass, a maximum difference in RPE of 0.81 points (95% CI: 0.36-1.27) was observed between conditions. A meta-regression revealed that RPE increases by 0.21 points for each 1% increase in EID (95% CI: 0.12-0.31). Humidity, ambient temperature and aerobic capacity did not alter the relationship between EID and RPE.

**Conclusion:** Therefore, the effect of EID on RPE is unlikely to be practically meaningful until a body mass loss of at least 3%.

**Keywords:** hydration, hypohydration, performance, rating of perceived exertion, RPE

## INTRODUCTION

Rating of perceived exertion (RPE), a subjective estimation of the intensity or difficulty of a physical task, is widely used by professionals in the field of exercise sciences, coaching and sports medicine to monitor or prescribe exercise intensity <sup>1</sup>. Developed by Gunnar Borg <sup>2,3</sup>, the Borg RPE scale is a universally accessible, comprehensible, useful, non-invasive, valid and inexpensive tool that can be used in diverse populations such as in children, adolescents, young and older adults, and under different conditions, including leisure and elite sports, clinical rehabilitation and scientific research. Although the etiology of RPE is unclear, it is proposed that it is either centrally derived <sup>4</sup> or generated by neuronal processes that integrate afferent signals from various peripheral and central sources, as well as from psychological factors <sup>3,5</sup>.

The RPE is a pivotal component of aerobic exercise. Indeed, it acts as a regulator of exercise intensity <sup>6,7</sup> and exercise duration <sup>8-10</sup> and, thus, modulates exercise capacity in competitive athletes and, as important, is at the core of the decision to engage and adhere to the regular practice of physical activity among recreationally active individuals <sup>11,12</sup>. Given that physiological and psychological signals can act individually or in concert to disturb RPE, it follows that limiting the number of physiological or emotional stressors to a minimum during exercise should ensure optimal performance for the athlete and lead to a sense of fulfillment in recreationally active individuals <sup>6</sup>.

Depending on a host of factors, sweat losses typically reach 0.5 to 1.7 L/h during exercise <sup>13</sup>. Athletes as well as recreationally active individuals do not usually replace all their fluid

losses during exercise. Exercise-induced dehydration (EID), best represented by the acute body mass loss accrued during exercise, alters thermoregulatory, metabolic and cardiovascular functions <sup>14-18</sup>, more particularly in individuals with low aerobic fitness <sup>19</sup> and may predispose to the development of thirst, headaches, tiredness, mental fatigue <sup>20</sup> and impaired mood <sup>21,22</sup>, while its impact upon cognitive performance is still debated <sup>23</sup>. These factors may contribute to increasing RPE during exercise, ultimately impeding exercise performance in athletes <sup>24</sup> and potentially decreasing exercise adherence and participation in recreationally active individuals <sup>12,25</sup> which, from a societal and health perspective, is not suitable. Indeed, both the affective response and RPE are associated with long-term physical activity participation <sup>26</sup>.

The relationship between EID and RPE has received much scientific attention, with some studies showing that EID can significantly increase RPE <sup>15-18,27-38</sup>, while others did not <sup>39-55</sup>. At this time, no attempt has been made to systematically determine the impact of EID on RPE. Discrepancies between findings could potentially be related to methodological differences among studies, albeit this remains to be determined and confirmed with the aid of relevant analyses.

Efforts have yet to be deployed to determine, using a meta-analytic approach, the impact of EID on RPE. More specifically, there is a need to answer these questions: (1) does the change in RPE during exercise relate to EID?; (2) what is the magnitude of the effect of EID on RPE across different levels of EID; (3) is the magnitude of the effect of EID on RPE practically important?; (4) are there any identifiable factors among ambient temperature, humidity level, exercise intensity, exercise duration and aerobic capacity that may moderate the relationship between EID and RPE and; (5) to which extent

“cardiovascular strain” mediates the relationship between EID and RPE? The goal of this study, therefore, is to use a meta-analytic approach to provide answers to the above-mentioned questions. Findings will be valuable to scientists, physical trainers, sports nutritionists, physicians, exercise physiologists, sports psychologists and any individuals engaged in regular exercise. Also, such findings will be valuable to elucidate whether the changes in body water are part of an integrated signal.

## **METHODS**

Figure 1 reports the search strategy used for study selection. The literature search, limited to original peer-reviewed articles published in French or English, was performed with the PubMed, MEDLINE, SPORTDiscus, AMED and CINAHL databases, combining a “title field” and an “abstract field” research using the following keywords alone or in combination: cycling, dehydration, drink, effort, endurance, euhydration, exercise, exertion, fluid, hydration, hypohydration, perceived effort, perceived exertion, perception, performance, rate of perceived exertion, rating of perceived exertion, RPE and running. The exact search strategy can be found in supplementary material 1. A first selection based on the title was performed; afterward, the abstract and method sections of all potential articles were read. When hydration status was manipulated and RPE measured, the methodological section was carefully read to verify eligibility. Published abstracts, case studies, non-peer-review manuscripts and conference proceedings were not considered. Cross-referencing was performed on included studies and 6 narrative/systematic reviews<sup>24,56-60</sup>. When needed, authors of included studies were contacted and asked to share experimental raw data. The last search of the literature was done on February 16, 2022.



The review and the protocol were not registered. The meta-analysis was conducted using the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-analysis (PRISMA) guidelines.

*Figure 1 about here*

### ***Criteria for considering studies for inclusion/exclusion in the meta-analysis***

Inclusion criteria were: (1) controlled study using a randomized crossover design in healthy adults ( $\geq 18$  years old); (2)  $\geq 30$  min of continuous running or cycling endurance exercise (exercises  $< 30$  min are unlikely to induce substantial EID, or be limited by EID); (3) final EID in the experimental group  $> 1\%$  of pre-exercise body mass and  $\geq 0.5\%$  than the euhydrated (EUH) control condition; (4) dehydration progressively induced during, not before exercise<sup>61</sup>; (5) body mass change with EUH was within  $-1$  to  $+ 0.5\%$  of the pre-exercise body mass<sup>61</sup>; (6) fluid replacement was given orally; (7) if carbohydrates (CHO) or caffeine were provided during exercise, the amount was identical between conditions<sup>62,63</sup> and; (8) data required to compute changes in EID and RPE were included/available.

Exclusion criteria were: (1) sports-specific and intermittent exercises; (2) use of diuretics or sweatsuits to accelerate EID; (3) provision of fluid according to thirst sensation; (4) uncontrolled ambient conditions or experimentation timing; (5) collection of muscle biopsies and; (6) carrying of loads during exercise.

### ***Assessment of trial quality***

No specific and validated tool to assess the quality of exercise-related studies has been developed. Moreover, assessing trial quality in meta-analyses using a scale can influence the interpretation of results <sup>64</sup>. Hence, trial quality assessment was not performed in the present meta-analysis.

### ***Data extraction***

Using double data entry, data regarding (1) study characteristics; (2) participants characteristics; (3) exercise protocol characteristics; (4) EID levels and; (5) RPE were extracted and coded in spreadsheets. When not provided by authors, data only available in figures were extracted using WebPlotDigitizer.

### ***Exercise duration and intensity and participants' $\dot{V}O_{2max}$***

Exercise duration was computed as the average exercise time completed during both the EID and EUH conditions. Exercise intensity was taken as the average of the mean %  $\dot{V}O_{2max}$  at which both the EID and EUH conditions were performed. Mean exercise intensity was computed using a weighted average for those studies that used a combination of exercise intensities. When not measured by authors, exercise intensity was estimated and computed as explained by Goulet <sup>61</sup>. Most studies <sup>27,28,33,34,41-44,46,47,65-68</sup> reported participants'  $\dot{V}O_{2max}$ ; Barwood, Goodall, Bateman <sup>69</sup> and Dugas, Oosthuizen, Tucker, Noakes <sup>40</sup> did not, and these values were calculated as in Goulet <sup>61</sup>.

### ***Fluid intake, exercise-induced dehydration and dehydration rate measurement***

Hydration rate (mL/min) was computed as the total amount of fluid intake divided by exercise duration, with the relative hydration rate (mL/min/kg) corrected for pre-exercise body mass (kg). The percent change in body mass from the pre- to post-exercise period was used as an index of the level of dehydration incurred during exercise. While this index is an imperfect representation of EID <sup>70</sup> as it is impacted by both metabolic water production and gas exchange during exercise, measurement error is relatively low amounting to an overestimation of fluid loss of ~ 100 mL/h during moderate intensity exercise.

When not provided, pre-exercise body mass was taken as that provided in the sample description, whereas % body mass loss was computed using the following equation:

$$\frac{\text{Pre-exercise body mass (kg)} - \text{post-exercise body mass (kg)}}{\text{pre-exercise body mass (kg)}} \times 100 \quad (1)$$

Thus, any positive value represents a body mass loss while negative values indicate body mass gain.

Assuming a high repeatability of <sup>71</sup>, and consistency in <sup>72</sup>, sweating rate and thus body mass loss <sup>73</sup> during exercise at a given intensity, dehydration rate (% body mass loss/min) was computed as follows:

$$\frac{\text{End of exercise body mass loss (\%)}}{\text{exercise duration (min)}} \quad (2)$$

Dehydration rate was used to calculate the % body mass loss associated with each measurement of RPE within a single study. For example, if in a study RPE was measured at 30, 60 and 90 min and the dehydration rate was 0.03%/min, therefore the corresponding % body mass losses were respectively taken as 0.9 (ex., 30 min x 0.03%/min), 1.8 and 2.7%. In some studies, this iteration process had to be stopped when body mass loss

surpassed 1% in the EUH condition <sup>28,42,44,46,67</sup>. This procedure enabled us to pinpoint the behavior of RPE across a wide range of % body mass loss changes, using research data available from all included studies. To provide a practical, easy to understand and clear visual characterization of the effect of body mass loss on RPE during exercise, Figures 2a and b present the relationship between % body mass loss and RPE at fixed and anchored body mass loss levels, according to the classification presented in Table 1.

*Table 1 about here*

### ***Measurement of perceived exertion during exercise***

Perceived exertion data are presented according to the original 6-20 Borg scale. Dugas, Oosthuizen, Tucker, Noakes <sup>40</sup> and Walsh, Noakes, Hawley, Dennis <sup>33</sup> used the Borg-CR10 scale (range 0-10); for those studies, RPE was converted back to the 6-20 scale according to Arney, Glover, Fusco, Cortis, de Koning, van Erp, Jaime, Mikat, Porcari, Foster <sup>74</sup>. For Barwood, Goodall, Bateman <sup>69</sup> (hot and cold drink conditions), Dugas, Oosthuizen, Tucker, Noakes <sup>40</sup> (0, 33 and 66% conditions) and Murray, Michael, McClellan <sup>34</sup> (5- and 10-min conditions) merging of experiments were performed to eliminate data dependency.

### ***Moderating variables***

The following variables were *a priori* identified as potential moderators for the relationship between RPE and EID: ambient temperature, relative humidity, exercise duration and intensity and participants'  $\dot{V}O_{2max}$ . Ambient temperature and relative humidity are interdependent, as are exercise intensity and duration. To take this into account, absolute

humidity and a composite score of exercise stress (product of exercise intensity (%  $\dot{V}O_{2max}$ ) and exercise duration (min)) were also considered as moderating variables.

### *Mediating variable*

Heart rate was considered a potential mediating variable regarding the relationship between EID and RPE. Core temperature would have been another one to consider, but the paucity of data prevented us from evaluating its impact. For each study, mean exercise heart rate difference between the EUH and EID conditions was computed by averaging the sum of the heart rate difference computed at each measurement point.

### *Statistical analyses*

#### Software

Data were analyzed in their original form using Microsoft Office Excel 2020 (version 1902, Redmond, WA, USA), MetaXL (version 5.3, EpiGear), Comprehensive Meta-Analysis (version 2.2.064, Englewood, NJ, USA), STATA/MP (version 14, College Station, TX, USA), SPSS macros provided by Lipsey and Watson<sup>61,75</sup> and IBM SPSS Statistics (version 21, Armonk, NY, USA) software.

#### Weighted mean effect summaries

Each of the studies included in the meta-analysis took measurements of RPE during exercise at more than one EID level. Therefore, a meta-analysis of repeated measures was performed in an effort to limit the violation of the assumption of data independence in the data structure<sup>76</sup>. First, an all-points forest plot was constructed to determine the mean effect

of EID on RPE at body mass loss levels fixed and anchored at 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 and 3%. This method allows us to illustrate the rate of increase in RPE across this range of body mass losses. Moreover, it allows for more precision in establishing the relationship between RPE and body mass loss as this strategy increases the  $n$  for any dehydration point. All RPE data within a given EID level were independent of each other; however, each study contributed in providing RPE-related data to more than one EID level. Nevertheless, the assumption of independence was protected for each of the EID levels. Post-hoc analyses were done using the False Discovery Rate procedure, with the number of *a priori* defined comparisons taken as 6, mirroring each of the EID levels compared. Second, to establish the mean effect of EID on RPE for each increase in 1% body mass loss, a forest plot was constructed from the slope estimates of the relationships between EID and RPE for each of the included studies, using non-weighted linear regression analyses with the intercepts forced through the origin<sup>76</sup>. For this forest plot,  $n$  was taken as the number of EID levels included in the regression analysis. Initially, the analyses were performed separately by subgroups. However, data from studies using time-trial type exercise protocols were combined with those using fixed-intensity exercise protocols given the low number of studies using time-trial type exercise and because variations in RPE within the different EID levels were similar and, in all instances, < 1 point. Nonetheless, on few occasions, analyses excluding time-trial type exercises will be presented when deemed interesting. Weighted mean effect summaries were determined using method of moment random-effects model. A more intuitive approach was used to verify whether it would change the outcomes in comparison to our approach. For that, we averaged, within a given hydration

condition (EUH and EID), all RPE measurements across time, and then observed the difference in RPE between conditions.

#### *Practical significance of the weighted mean effect summaries and slope estimate*

The qualitative interpretation of the practical significance of the effect of EID on RPE was performed as in Goulet & Hoffman <sup>59</sup>. Previous studies observed reliability of the RPE scale to be < 1 point <sup>77,78</sup>. Because the minimal increment of the scale is 1 point, this threshold was taken and accepted as the smallest worthwhile practical difference in RPE.

#### *Heterogeneity, publication bias and sensitivity analysis*

Cochran's  $Q$  and  $I^2$  statistic were both used to assess between-study heterogeneity and the degree of inconsistency among results of included studies. Cochran's  $Q$  test was considered significant at  $p \leq 0.1$  <sup>79</sup>. The following classification was used to interpret the  $I^2$  statistic: low (< 40%), moderate (40-59%), substantial (> 60%) <sup>80</sup>. Publication bias was performed using visual assessment of funnel plots with Trim and Fill adjustments. A sensitivity analysis was performed on each of the forest plots by removing each study once from the models to determine whether this would change the magnitude of the outcome summaries.

#### *Meta-regression analyses*

The potential mediating effect of heart rate and moderating effect of the *a priori* defined confounders were determined by regressing the slope estimates upon the mean heart rate difference between conditions or each of the confounders, respectively. Confounder and mediator variables included at least 10 data points from 10 different studies. A multiple

meta-regression combining all moderators (with the exception of absolute humidity and composite score of exercise stress) was performed to understand the strength of our proposed model. Meta-regression analyses were performed using method of moment random-effects model, with 95% robust (Huber-Eicher-White-sandwich) standard errors.

### Statistical significance

Otherwise stated, in all instances, results were considered significant at  $p < 0.05$  or when the 95% confidence interval did not include 0.

### Variance computations

When raw data were obtained from the authors, variances were directly calculated from the  $\Delta$  standard errors or standard deviations of the absolute changes in RPE between conditions. Otherwise, individual variances for changes in RPE were estimated as in Goulet, Hoffman <sup>59</sup> using an imputed weighted correlation coefficient of 0.81 deriving from 40 correlation coefficients obtained from 5 different studies whose authors provided raw data.

## **RESULTS**

### ***Search results and characteristics of the included studies***

After removing duplicates, 3999 titles were checked (Figure 1). In the remaining 138 articles assessed for eligibility, 16 were included in the meta-analysis (Table 2). The studies were published between 1994 and 2019 in 10 different peer-reviewed journals. Four studies



were conducted in the USA <sup>27,34,42,68</sup>, 3 in the UK <sup>28,46,69</sup>, Australia <sup>41,44,66</sup>, and South-Africa <sup>33,40,47</sup> and 1 in Canada <sup>43</sup>, France <sup>67</sup> and New-Zealand <sup>65</sup>.

### ***Participant's characteristics***

A total of 147 endurance-trained individuals are represented among the 16 included studies, with women representing only 1% of the total sample. Mean sample size was  $9 \pm 3$  individuals per study (range 6-15). None of the included studies reported information about ethnicity. The mean age, height, body mass, body mass index,  $\dot{V}O_{2\max}$  and peak power output of the participants were respectively  $27 \pm 4$  years,  $179 \pm 2$  cm,  $73 \pm 3$  kg,  $23 \pm 1$  kg/m<sup>2</sup>,  $62 \pm 6$  mL/kg/min and  $389 \pm 39$  W.

### ***Characteristics of the exercise protocols***

Among the selected studies, 81% (n = 13) used cycling as the mode of exercise while the remaining used running (n = 3). The mean ambient temperature and relative humidity were respectively  $28 \pm 6^\circ\text{C}$  and  $48 \pm 10\%$ , with a mean wind speed of  $10 \pm 11$  km/h. The mean exercise duration and intensity were respectively  $79 \pm 27$  min (range 51-127 min) and  $65 \pm 13\%$  of  $\dot{V}O_{2\max}$ .

### ***Fluid consumption and exercise-induced dehydration levels***

Mean rates of fluid consumption in the EUH and EID conditions were respectively  $18.9 \pm 7.5$  and  $1.0 \pm 2.0$  mL/min, representing  $0.26 \pm 0.1$  and  $0.01 \pm 0.03$  mL/kg/min. The average fluid temperature was  $17 \pm 13^\circ\text{C}$ . The mean end-of-exercise body mass loss was  $0.5 \pm 0.4\%$  (range 1 to -0.3%) when EUH was attempted to be maintained, compared to  $2.3 \pm 0.5\%$

(range 1.7-3.1%) with EID, for a mean difference of  $1.7 \pm 0.7\%$  (range 0.9-2.8) between conditions. Mean dehydration rates of  $0.007 \pm 0.005$  and  $0.03 \pm 0.009\%/min$  were observed during the EUH and EID conditions, respectively.

### ***Weighted mean effect summaries***

Figure 2a depicts the changes in RPE that occurred during exercise between the EUH and EID conditions across levels of body mass losses of 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 and 3%, and for absolute values of RPE which fluctuated from  $\sim 12$  (light) to 16.5 (hard/very hard) points. Figure 2b pinpoints the weighted mean difference in RPE between the EUH and EID conditions across each of these levels of body mass losses. Results of the forest plot illustrate that, compared with EUH, EID slowly increased RPE during exercise from 0.22 points (95% CI: -0.05-0.48) when body mass loss was trivial (0.5%) to 0.60 points (95% CI: 0.29-0.92) when body mass loss was light (1.5%), up to 0.81 points (95% CI: 0.36-1.27) when body mass loss was moderate (3%). Only at 0.5 and 1% body mass losses were the differences in RPE between the EUH and EID conditions not significant. In none of the 6 weighted mean summary effects models did the removal of each study one at a time significantly and practically impacted the outcome that body mass loss has upon RPE. For each of the EID subgroups, the practical impact of body mass loss on RPE was likely or almost certainly trivial. Distribution of point estimates around each of the 6 weighted mean effect summaries was appropriate, which indicates no publication bias. Cluster analysis indicates that heterogeneity was substantial with an  $I^2$  of 72% and a Cochran's  $Q$  of 204.9,  $p < 0.01$ . At the subgroup level, substantial inconsistencies were also observed at the 0.5, 1, 1.5 and 2, but not 2.5 and 3% body mass loss levels where heterogeneity was low. When

the analyses were performed without the studies that used time-trials, results were similar, with the exception that the differences in RPE between the EUH and EID condition reached 1.2 points (95% CI: 0.61-1.80) when body mass loss was moderate (3%).

Cluster analysis indicates that EID, on average, increases RPE by 0.45 point (95% CI: 0.31-0.59, Figure 2b). Using the more intuitive approach, we observed an overall effect of 0.38 points (95% CI: 0.22-0.53,  $Q = 125.3$ ,  $p < 0.01$ ,  $I^2 = 88\%$ ). When studies that used time-trials were removed, the results were, again, extremely similar: 0.50 points (95% CI: 0.33-0.67,  $Q = 174.8$ ,  $p < 0.01$ ,  $I^2 = 77\%$ ) vs. 0.44 points (95% CI: 0.24-0.64,  $Q = 114.2$ ,  $p < 0.01$ ,  $I^2 = 90\%$ ) with the more intuitive approach.

*Figure 2 about here*

Figure 3a illustrates the slope estimates for the regression of RPE on the % body mass loss for each of the included studies. Figure 3b shows a forest plot combining the 16 slope estimates to derive a weighted mean summary effect. Results show that for each 1% body mass loss, RPE increased on average by 0.21 points (95% CI: 0.12-0.31), thereby theoretically suggesting that it is not before reaching a body mass loss of ~ 5% that EID may potentially affect RPE in a meaningful way. A sensitivity analysis revealed that the removal of each study one at a time from the model did not significantly nor practically alter the outcome of the weighted mean effect summary, with variations in the slope estimate ranging from 0.13 (95% CI: 0.06-0.20) to 0.35 points (95% CI: 0.17-0.53). Inconsistency among research observations was substantial with an  $I^2$  of 75% and a Cochran's  $Q$  of 58.99,  $p < 0.01$ . Point estimates were not equally distributed on each side

of the weighted mean summary effect, thereby suggesting publication bias. A trim and fill analysis adjusting for missing studies at the left side of the mean changed the weighted mean effect summary to 0.10 points (95% CI: 0.00-0.22). When the analyses were performed without the studies that used time-trials, results showed that for each 1% body mass loss, RPE increased on average by 0.38 points (95% CI: 0.17-0.59,  $Q = 56.2$ ,  $p < 0.01$ ,  $I^2 = 80\%$ ). Figure 3c depicts the relationship between RPE and % body mass loss while including all 59 study-specific data points, which violates the assumption of independence among data. Nevertheless, the weighted regression analysis provides a slope estimate (0.26 points, 95% CI: 0.10-0.42) which is congruent to the one built from combining all 16 slope estimates.

*Figure 3 about here*

### ***Meta-regression analyses***

Figure 4 shows the relationships between the changes in slope estimates and (a) temperature, (b) humidity level, (c) exercise duration, (d) exercise intensity, (e) aerobic capacity and (f) mean heart rate difference across the different studies. Individually, none of these variables significantly correlated to the extent of changes in RPE for each 1% in body mass loss. When all these variables were combined in a multiple meta-regression model (except heart rate), the goodness of fit reached 66%. The same picture was observed using the model derived from of all 59 study-specific data points. No significant relationships were also observed between the changes in slopes estimates and absolute humidity ( $p = 0.26$ ) or the composite score of exercise stress ( $p = 0.65$ ).

*Figure 4 about here*

## **DISCUSSION**

Despite that exercisers have access to a large and diversified arsenal of tools to monitor exercise intensity, the ability to maintain a certain speed or power output is, ultimately, tributary to RPE<sup>8-10</sup>. On the other hand, enjoyment of exercise is an important component of participation and adherence, and the more the exercise is perceived to be strenuous, the less likely the exercise behaviour is to be maintained<sup>12</sup>. In a sense, therefore, RPE can be considered as the ‘‘mastermind’’ of exercise performance or adherence. Consequently, factors susceptible to negatively impact the sense of effort during exercise should be given particular attention. Albeit the current results do show that EID increases RPE (response to question #1), the effect was shown to be below our identified threshold of 1 point, at least for the included studies where the greatest level of EID reached was 3% (response to questions #2 and #3), and not moderated by key confounders or associated with changes in heart rate (response to question #4 and #5). Therefore, our results highlight for the first time that EID < 3% of body mass has a spurious effect on RPE, contrarily to what is believed.

It has been suggested that RPE may act as a mediator of the effect of EID on endurance performance<sup>14,24</sup>. This is legitimate from a physiological perspective, as the documented impact of EID on thermoregulatory, cardiovascular and metabolic functions<sup>14,24</sup> should result in a higher perceived strain and, hence, RPE. However, our results including observations from cycling and running exercises conducted at clamped and self-paced

intensities and under different environmental conditions show that although the change in RPE statistically relates to EID, the magnitude of the effect is unlikely to be practically meaningful until a body mass of at least 3%. Of course, the design of the present meta-analysis precludes from inferencing about the repercussion of the EID-induced increase in RPE on endurance performance. Nevertheless, we are aware of no studies which have been able to establish a decisive relationship between RPE and endurance performance. That being said, if scientists agree upon the simplistic and imperfect model indirectly linking the EID-induced increase in RPE with the decline of endurance performance, the present findings clearly dispute this assertion, at least for EID < 3% of body mass.

It is proposed that EID may reduce exercise participation/adherence in recreationally active individuals because of its impact upon RPE <sup>25,81</sup>. Based on urinary indices, studies have suggested that 40-50% of recreationally active individuals begin exercise in a light hypohydration state <sup>25,82</sup> and lose ~ 0.6% of their body mass while drinking fluid *ad libitum* during freely chosen exercise sessions <sup>25</sup>. Furthermore, untrained individuals have lower sweat rate <sup>19,83</sup> and generally an easy access to water during exercise. Regarding women, they generally have a lower sweat rate than men and drink more (sometimes more than their sweat losses) during exercise <sup>84,85</sup>. Therefore, it is unlikely that those individuals will reach EID levels  $\geq 3\%$  of body mass during typical physical activities and, hence, that the EID-associated increase in RPE should not be a cause for concern. Moreover, studies have reported worsened affective response when participants begin exercise in a low hypohydration state <sup>25</sup> or when dehydration occurs progressively during exercise <sup>46</sup>. And it seems that the acute affective response to exercise more than the acute change in RPE relates to long-term adherence to exercise <sup>26,86</sup>.

Although it is agreed upon that the brain is the organ responsible for the regulation of RPE, whether it is centrally derived and largely independent of peripheral afferent signals <sup>4,87-89</sup> or results from the integration and interpretation of afferent feedback from the peripheral machinery <sup>5,90-92</sup> is debated (see <sup>6,93-95</sup> for further details). If the first theory is favoured, then it follows that EID would likely not alter the ability of the brain to produce motor forward commands, termed efference copies or corollary discharges <sup>96</sup>. It has been shown that acute EID and the associated hyperosmolality does not alter brain volume <sup>97</sup>, potentially highlighting the fact that the cerebral cortex operates close to optimally under dehydrating conditions. On the other hand, interpreting the current results within the context of the second theory would imply that EID provokes minimal homeostasis alterations, at least up to a body mass loss of 3%. This claim is reasonable given that the EID-induced increase in heart rate ( $\sim 4$  beats/min,  $n = 14$ ) and core temperature ( $\sim 0.2^{\circ}\text{C}$ ,  $n = 9$ ) (data directly extracted from the included studies of the present meta-analysis) was marginal compared with EUH.

There was substantial heterogeneity among research findings, as illustrated in Figure 3b. This is unremarkable given that studies used a variety of protocols within which factors known to influence RPE were present. Meta-regressions were conducted to examine the moderating effect of *a priori* selected confounders. They showed that, in isolation, neither humidity, exercise duration, exercise intensity, aerobic capacity nor ambient temperature significantly correlated to the extent of changes in RPE for each 1% of body mass loss. However, while aggregated into one model, those 5 variables explained 66% of the variance observed among the changes in RPE for each 1% of body mass loss. This figure is impressive and depicts the importance of the identified confounders in the overall

moderation of the relationship between EID and RPE. Hence, it cannot be excluded that the significance of several influential variables within each of the included studies masked the ability to clearly identify the independent moderating effect of some or all of the confounders.

There was a trend for the change in heart rate to be associated with the change in RPE for each 1% of body mass loss. Such an observation was to be expected because EID is known to exacerbate heart rate <sup>60</sup> and the latter has been reported to be closely related to RPE <sup>90</sup>. Indeed, the 6-20 Borg scale was initially developed in healthy individuals to correlate approximately with exercise heart rate. Roughly, our model indicates that for each increase in heart rate of 1 beat/min there should be an increase in RPE of 0.1 points for each 1% of body mass loss. Providing that the mean change in heart rate during exercise was < 10 beats/min between EUH and EID, our observation of a lack of a meaningful effect of EID on RPE makes sense. Nevertheless, it is important to bear in mind that the relationship between heart rate and RPE is only correlational in nature, not causal <sup>90</sup>. Indeed, research has shown that it is possible to dissociate the change in heart rate from the change in RPE (e.g., using pharmacological agents) <sup>98,99</sup>. Therefore, our observation of a close relationship between the changes in heart rate and RPE for a given body mass loss should not be taken as a possibility that heart rate could act as a mediator of the relationship between EID and RPE.

Results of this meta-analysis must be interpreted with the following considerations or limitations in mind. The literature search was limited to English and French citations; studies published in different languages may have been missed. Similarly, in the literature of concern, RPE is almost exclusively studied as a secondary outcome. This complicates



study identification which may have led us to miss key studies. Validity of RPE measurement depends upon the proper instructions provided to participants<sup>93</sup>; no studies reported on whether they dispensed such instructions. Little information is available regarding what represents a meaningful change in RPE; therefore, having used a different threshold may have modified our conclusions. In the present meta-analysis, women represented only 1% of the total sample. Recent evidence suggests that women may be more sensitive to the negative thermoregulatory effects of dehydration. Therefore, it could not be excluded that the relationship between EID and RPE may be different in women<sup>17,18,100</sup>. While they would have provided insight into the possible mechanisms linking EID to RPE, data such as thirst sensation, changes in plasma osmolality and volume were not considered as they were reported by too few included studies. Having studies with higher level of EID (i.e. > 3% of body mass) would have provided more information and possibly modified our conclusions. Finally, the present results apply to adults, primarily males, up to an EID level of 3% body mass and for exercise up to ~2 h in duration in thermoneutral to warm environments.

In conclusion, while from a statistical point of view, EID >1% of body mass increases RPE, the present results suggest that its effect is unlikely to be practically meaningful under running or cycling exercise conditions until a body mass loss of at least 3% is reached.

## **PERSPECTIVES**

Perceived exertion can be considered as the ‘mastermind’ of exercise performance or adherence. Exercise-induced dehydration is generally thought to increase RPE. The greater RPE associated with EID may contribute to reducing (1) exercise performance in athletes

and (2) exercise participation/adherence in recreationally active individuals. Findings of the present meta-analysis suggest that from a statistical point of view, EID >1% of body mass increases RPE. However, the effect of EID on RPE is unlikely to be practically meaningful under running or cycling exercise conditions, even at 3% of body mass loss. Thus, our results suggest that concerns about the impact of EID upon RPE and, thus, by extension, the effect of the latter on endurance performance or exercise participation/adherence seem not warranted, at least not until a body mass loss of 3%.

### **ACKNOWLEDGMENTS**

The authors wish to thank the researchers who shared experimental data and provided further information. TAD is financially supported by the Fonds de Recherche du Québec - Santé (FRQS).

### **DECLARATION OF INTEREST**

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors. The authors have no conflicts of interest relevant to this article.

### **AUTHOR CONTRIBUTIONS**

TAD designed the research, performed the data extraction, performed the statistical analyses, designed the tables and the figures, interpreted data, drafted and revised the manuscript. TP performed the data extraction, interpreted data, drafted and revised the manuscript. EDBG designed the research, performed the data extraction, performed the

statistical analyses, designed the tables and figures, interpreted data, drafted and revised the manuscript. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

## REFERENCES

1. Riebe D, Ehrman JK, Liguori G, Magal M, Medicine ACoS. *ACSM's guidelines for exercise testing and prescription*. Wolters Kluwer; 2018.
2. Borg G. Perceived exertion as an indicator of somatic stress. *Scandinavian journal of rehabilitation medicine*. 1970.
3. Borg GA. Psychophysical bases of perceived exertion. *Medicine & science in sports & exercise*. 1982.
4. Marcora S. Perception of effort during exercise is independent of afferent feedback from skeletal muscles, heart, and lungs. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md : 1985)*. 2009;106(6):2060-2062.
5. Robertson RJ, Noble BJ. Perception of physical exertion: Methods, mediators, and applications. *Exercise and sport sciences reviews*. 1997;25(1):407-452.
6. Abbiss CR, Peiffer JJ, Meeusen R, Skorski S. Role of ratings of perceived exertion during self-paced exercise: what are we actually measuring? *Sports medicine*. 2015;45(9):1235-1243.
7. Thiel C, Pfeifer K, Sudeck G. Pacing and perceived exertion in endurance performance in exercise therapy and health sports. *German Journal of Exercise and Sport Research*. 2018;48(1):136-144.
8. Noakes TD. Rating of perceived exertion as a predictor of the duration of exercise that remains until exhaustion. *British Journal of Sports Medicine*. 2008;42(7):623-624.
9. Crewe H, Tucker R, Noakes TD. The rate of increase in rating of perceived exertion predicts the duration of exercise to fatigue at a fixed power output in different environmental conditions. *European journal of applied physiology*. 2008;103(5):569.
10. Eston R, Faulkner J, St Clair Gibson A, Noakes T, Parfitt G. The effect of antecedent fatiguing activity on the relationship between perceived exertion and physiological activity during a constant load exercise task. *Psychophysiology*. 2007;44(5):779-786.
11. Ekkekakis P, Lind E. Exercise does not feel the same when you are overweight: the impact of self-selected and imposed intensity on affect and exertion. *International journal of obesity*. 2006;30(4):652-660.
12. Emad M, Neumann DL, Abel L. Attentional focus strategies used by regular exercisers and their relationship with perceived exertion, enjoyment, and satisfaction. *2017*. 2017;12(1):13.
13. Barnes KA, Anderson ML, Stofan JR, et al. Normative data for sweating rate, sweat sodium concentration, and sweat sodium loss in athletes: An update and analysis by sport. *Journal of Sports Sciences*. 2019;37(20):2356-2366.

14. Chevront SN, Kenefick RW, Montain SJ, Sawka MN. Mechanisms of aerobic performance impairment with heat stress and dehydration. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md : 1985)*. 2010;109(6):1989-1995.
15. Montain SJ, Coyle EF. Influence of graded dehydration on hyperthermia and cardiovascular drift during exercise. *Journal of applied physiology*. 1992;73(4):1340-1350.
16. Gonzalez-Alonso J, Mora-Rodriguez R, Below P, Coyle E. Dehydration reduces cardiac output and increases systemic and cutaneous vascular resistance during exercise. *Journal of Applied Physiology*. 1995;79(5):1487-1496.
17. Logan-Sprenger HM, Heigenhauser GJF, Jones GL, Spriet LL. Increase in Skeletal-Muscle Glycogenolysis and Perceived Exertion With Progressive Dehydration During Cycling in Hydrated Men. *International Journal of Sport Nutrition & Exercise Metabolism*. 2013;23(3):220-229.
18. Logan-Sprenger HM, Heigenhauser GJF, Killian KJ, Spriet LL. Effects of dehydration during cycling on skeletal muscle metabolism in females. *Medicine and science in sports and exercise*. 2012;44(10):1949-1957.
19. Merry T, Ainslie P, Cotter J. Effects of aerobic fitness on hypohydration-induced physiological strain and exercise impairment. *Acta physiologica*. 2010;198(2):179-190.
20. Goodman SP, Marino FE. Thirst perception exacerbates objective mental fatigue. *Neuropsychologia*. 2021;150:107686.
21. Armstrong LE, Ganio MS, Casa DJ, et al. Mild Dehydration Affects Mood in Healthy Young Women. *Journal of Nutrition*. 2012;142(2):382-388.
22. Ganio MS, Armstrong LE, Casa DJ, et al. Mild dehydration impairs cognitive performance and mood of men. *British Journal of Nutrition*. 2011;106(10):1535-1543.
23. Goodman SP, Moreland AT, Marino FE. The effect of active hypohydration on cognitive function: a systematic review and meta-analysis. *Physiology & behavior*. 2019;204:297-308.
24. James LJ, Funnell MP, James RM, Mears SA. Does hypohydration really impair endurance performance? Methodological considerations for interpreting hydration research. *Sports Medicine*. 2019:1-12.
25. Peacock OJ, Stokes K, Thompson D. Initial hydration status, fluid balance, and psychological affect during recreational exercise in adults. *Journal of sports sciences*. 2011;29(9):897-904.
26. Williams DM, Dunsiger S, Ciccolo JT, Lewis BA, Albrecht AE, Marcus BH. Acute affective response to a moderate-intensity exercise stimulus predicts physical activity participation 6 and 12 months later. *Psychology of sport and exercise*. 2008;9(3):231-245.
27. Below PR, Mora-Rodriguez R, Gonzalez-Alonso J, Coyle EF. Fluid and carbohydrate ingestion independently improve performance during 1 h of intense exercise. / L ' ingestion d ' hydrate de carbone et de boisson augmente independamment la performance pendant 1h dexercice physique intense. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 1995;27(2):200-210.
28. Funnell MP, Mears SA, Bergin-Taylor K, James LJ. Blinded and unblinded hypohydration similarly impair cycling time trial performance in the heat in trained

- cyclists. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md : 1985)*. 2019;126(4):870-879.
29. Ishijima T, Hashimoto H, Satou K, Muraoka I, Suzuki K, Higuchi M. The different effects of fluid with and without carbohydrate ingestion on subjective responses of untrained men during prolonged exercise in a hot environment. *Journal of nutritional science and vitaminology*. 2009;55(6):506-510.
  30. Fallowfield JL, Williams C, Booth J, Choo BH, Grows S. Effect of water ingestion on endurance capacity during prolonged running. *Journal of sports sciences*. 1996;14(6):497-502.
  31. Mudambo KSMT, Leese GP, Rennie MJ. Dehydration in soldiers during walking/running exercise in the heat and effects of fluid ingestion during and after exercise. *European Journal of Applied Physiology & Occupational Physiology*. 1997;76(6):517-524.
  32. Barr SI, Costill DL, Fink WJ. Fluid replacement during prolonged exercise: effects of water, saline, or no fluid. *Med Sci Sports Exerc*. 1991;23(7):811-817.
  33. Walsh RM, Noakes TD, Hawley JA, Dennis SC. Impaired high-intensity cycling performance time at low levels of dehydration. *Int J Sports Med*. 1994;15(7):392-398.
  34. Murray SR, Michael TJ, McClellan PD. The influence of fluid replacement rate on heart rate and RPE during exercise in a hot, humid environment. *Journal of Strength & Conditioning Research (Allen Press Publishing Services Inc)*. 1995;9(4):251-254.
  35. Adams EL, Casa DJ, Huggins RA, et al. Heat Exposure and Hypohydration Exacerbate Physiological Strain During Load Carrying. *J Strength Cond Res*. 2019;33(3):727-735.
  36. Gava Pompermayer M, Rodrigues R, Manfredini Baroni B, de Oliveira Lupion R, Meyer F, Aurélio Vaz M. Rehydration during exercise in the heat reduces physiological strain index in healthy adults. / Reidratação durante exercício no calor reduz o índice de esforço fisiológico em adultos saudáveis. *Brazilian Journal of Kineanthropometry & Human Performance*. 2014;16(6):629-637.
  37. James LJ, Moss J, Henry J, Papadopoulou C, Mears SA. Hypohydration impairs endurance performance: a blinded study. *Physiol Rep*. 2017;5(12).
  38. Wittbrodt MT, Millard-Stafford M, Sherman RA, Cheatham CC. Fluid Replacement Attenuates Physiological Strain Resulting From Mild Hypohydration Without Impacting Cognitive Performance. *Int J Sport Nutr Exerc Metab*. 2015;25(5):439-447.
  39. Bardis CN, Kavouras SA, Adams J, Geladas ND, Panagiotakos DB, Sidossis LS. Prescribed drinking leads to better cycling performance than ad libitum drinking. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2017;49(6):1244-1251.
  40. Dugas J, Oosthuizen U, Tucker R, Noakes T. Rates of fluid ingestion alter pacing but not thermoregulatory responses during prolonged exercise in hot and humid conditions with appropriate convective cooling. *European journal of applied physiology*. 2009;105(1):69.
  41. McConell GK, Stephens TJ, Canny BJ. Fluid ingestion does not influence intense 1-h exercise performance in a mild environment. *Med Sci Sports Exerc*. 1999;31(3):386-392.

42. Muñoz CX, Carney KR, Schick MK, Coburn JW, Becker AJ, Judelson DA. Effects of oral rehydration and external cooling on physiology, perception, and performance in hot, dry climates. *Scand J Med Sci Sports*. 2012;22(6):e115-124.
43. Perreault-Briere M, Beliveau J, Jeker D, Deshayes TA, Duran A, Goulet EDB. Effect of Thirst-Driven Fluid Intake on 1 H Cycling Time-Trial Performance in Trained Endurance Athletes. *Sports (Basel, Switzerland)*. 2019;7(10).
44. Ebert TR, Martin DT, Bullock N, et al. Influence of hydration status on thermoregulation and cycling hill climbing. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2007;39(2):323-329.
45. Erkmen N, Taskin H, Kaplan T, Sanioglu A. Balance performance and recovery after exercise with water intake, sport drink intake and no fluid. *Journal of Exercise Science & Fitness*. 2010;8(2):105-112.
46. Backhouse SH, Biddle SJH, Williams C. The influence of water ingestion during prolonged exercise on affect. *Appetite*. 2007;48(2):193-198.
47. Robinson TA, Hawley JA, Palmer GS, et al. Water ingestion does not improve 1-h cycling performance in moderate ambient temperatures. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 1995;71(2-3):153-160.
48. Lee M, Hammond K, Vasdev A, et al. Self-selecting fluid intake while maintaining high carbohydrate availability does not impair half-marathon performance. *International journal of sports medicine*. 2014;35(14):1216-1222.
49. Lambert GP, Lang J, Bull A, et al. Fluid restriction during running increases GI permeability. *International journal of sports medicine*. 2008;29(03):194-198.
50. Berkulo MA, Bol S, Levels K, Lamberts RP, Daanen HA, Noakes TD. Ad-libitum drinking and performance during a 40-km cycling time trial in the heat. *European journal of sport science*. 2016;16(2):213-220.
51. Dion T, Savoie FA, Asselin A, Gariepy C, Goulet ED. Half-marathon running performance is not improved by a rate of fluid intake above that dictated by thirst sensation in trained distance runners. *European journal of applied physiology*. 2013;113(12):3011-3020.
52. Ganio MS, Wingo JE, Carrolll CE, Thomas MK, Cureton KJ. Fluid ingestion attenuates the decline in VO<sub>2</sub>peak associated with cardiovascular drift. *Med Sci Sports Exerc*. 2006;38(5):901-909.
53. Hillman AR, Vince RV, Taylor L, McNaughton L, Mitchell N, Siegler J. Exercise-induced dehydration with and without environmental heat stress results in increased oxidative stress. *Applied Physiology, Nutrition & Metabolism*. 2011;36(5):698-706.
54. Hashimoto H, Ishijima T, Suzuki K, Higuchi M. The effect of the menstrual cycle and water ingestion on physiological responses during prolonged exercise at moderate intensity under hot conditions. *The Journal of sports medicine and physical fitness*. 2016.
55. Muhamed AMC, Yusof HA, Stannard SR, Mündel T, Thompson MW. The Efficacy of Ingesting Water on Thermoregulatory Responses and Running Performance in a Warm-Humid Condition. *Frontiers in physiology*. 2019;10.
56. Nuccio RP, Barnes KA, Carter JM, Baker LB. Fluid Balance in Team Sport Athletes and the Effect of Hypohydration on Cognitive, Technical, and Physical Performance. *Sports medicine (Auckland, NZ)*. 2017;47(10):1951-1982.

57. Maughan RJ, Watson P, Shirreffs SM. Implications of active lifestyles and environmental factors for water needs and consequences of failure to meet those needs. *Nutr Rev.* 2015;73 Suppl 2:130-140.
58. Chevront S, Kenefick R. Dehydration: physiology, assessment, and performance effects. *Compr Physiol* 4: 257–285. In:2014.
59. Goulet ED, Hoffman MD. Impact of ad libitum versus programmed drinking on endurance performance: A systematic review with meta-analysis. *Sports Medicine.* 2019;49(2):221-232.
60. Adams WM, Ferraro EM, Huggins RA, Casa DJ. Influence of body mass loss on changes in heart rate during exercise in the heat: a systematic review. *The Journal of Strength & Conditioning Research.* 2014;28(8):2380-2389.
61. Goulet ED. Effect of exercise-induced dehydration on time-trial exercise performance: a meta-analysis. *British journal of sports medicine.* 2011;45(14):1149-1156.
62. Backhouse SH, Bishop NC, Biddle SJ, Williams C. Effect of carbohydrate and prolonged exercise on affect and perceived exertion. *Medicine and science in sports and exercise.* 2005;37(10):1768.
63. Doherty M, Smith P. Effects of caffeine ingestion on rating of perceived exertion during and after exercise: a meta-analysis. *Scandinavian journal of medicine & science in sports.* 2005;15(2):69-78.
64. Jüni P, Witschi A, Bloch R, Egger M. The hazards of scoring the quality of clinical trials for meta-analysis. *Jama.* 1999;282(11):1054-1060.
65. Ali A, Moss C, Yoo MJY, Wilkinson A, Breier BH. Effect of mouth rinsing and ingestion of carbohydrate solutions on mood and perceptual responses during exercise. *J Int Soc Sports Nutr.* 2017;14:4.
66. Costa RJ, Camões-Costa V, Snipe RM, Dixon D, Russo I, Huschtscha Z. Impact of exercise-induced hypohydration on gastrointestinal integrity, function, symptoms, and systemic endotoxin and inflammatory profile. *Journal of Applied Physiology.* 2019;126(5):1281-1291.
67. Vallier JM, Grego F, Basset F, Lepers R, Bernard T, Brisswalter J. Effect of fluid ingestion on neuromuscular function during prolonged cycling exercise. *Br J Sports Med.* 2005;39(4):e17.
68. Wingo J, Lafrenz A, Ganio M, Edwards G, Cureton K. Cardiovascular drift is related to reduced maximal oxygen uptake during heat stress. *Medicine & Science in Sports & Exercise.* 2005;37(2):248-255.
69. Barwood MJ, Goodall S, Bateman J. The effect of hot and cold drinks on thermoregulation, perception, and performance: the role of the gut in thermoreception. *Eur J Appl Physiol.* 2018;118(12):2643-2654.
70. Maughan RJ, Shirreffs SM, Leiper JB. Errors in the estimation of hydration status from changes in body mass. *Journal of sports sciences.* 2007;25(7):797-804.
71. Baker LB, Ungaro CT, Sopeña BC, et al. Body map of regional vs. whole body sweating rate and sweat electrolyte concentrations in men and women during moderate exercise-heat stress. *Journal of Applied Physiology.* 2018;124(5):1304-1318.

72. Larose J, Boulay P, Sigal RJ, Wright HE, Kenny GP. Age-related decrements in heat dissipation during physical activity occur as early as the age of 40. *PloS one*. 2013;8(12):e83148.
73. Chapman CL, Johnson BD, Vargas NT, Hostler D, Parker MD, Schlader ZJ. Both hyperthermia and dehydration during physical work in the heat contribute to the risk of acute kidney injury. *Journal of Applied Physiology*. 2020;128(4):715-728.
74. Arney BE, Glover R, Fusco A, et al. Comparison of rating of perceived exertion scales during incremental and interval exercise. *Kinesiology*. 2019;51(2):150-157.
75. Goulet ED. Effect of exercise-induced dehydration on endurance performance: evaluating the impact of exercise protocols on outcomes using a meta-analytic procedure. *British journal of sports medicine*. 2013;47(11):679-686.
76. Peters JL, Mengersen KL. Meta-analysis of repeated measures study designs. *J Eval Clin Pract*. 2008;14(5):941-950.
77. Lamb KL, Eston RG, Corns D. Reliability of ratings of perceived exertion during progressive treadmill exercise. *British journal of sports medicine*. 1999;33(5):336-339.
78. Garcin M, Wolff M, Bejma T. Reliability of rating scales of perceived exertion and heart rate during progressive and maximal constant load exercises till exhaustion in physical education students. *International journal of sports medicine*. 2003;24(04):285-290.
79. Borenstein M, Hedges LV, Higgins JP, Rothstein HR. Introduction to meta-analysis. *West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd*. 2009.
80. Higgins J, Altman D, Sterne A. Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions. *Version*. 2011;5(0).
81. Evans G, Maughan R, Shirreffs S. Effects of an Active Lifestyle on Water Balance and Water Requirements. In: James MR, ed. *Lifestyle Medicine*. 3 ed. 2019:135-143.
82. Stover EA, Petrie HJ, Passe D, Horswill CA, Murray B, Wildman R. Urine specific gravity in exercisers prior to physical training. *Applied Physiology, Nutrition & Metabolism*. 2006;31(3):320-327.
83. Merry TL, Ainslie PN, Walker R, Cotter JD. Fitness alters fluid regulatory but not behavioural responses to hypohydrated exercise. *Physiol Behav*. 2008;95(3):348-352.
84. Baker LB, Munce TA, Kenney WL. Sex differences in voluntary fluid intake by older adults during exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2005;37(5):789-796.
85. O'Neal E, Poulos S, Bishop P. Hydration profile and influence of beverage contents on fluid intake by women during outdoor recreational walking. *European journal of applied physiology*. 2012;112(12):3971-3982.
86. Rhodes RE, Kates A. Can the affective response to exercise predict future motives and physical activity behavior? A systematic review of published evidence. *Annals of Behavioral medicine*. 2015;49(5):715-731.
87. Smirmaul Bde P. Sense of effort and other unpleasant sensations during exercise: clarifying concepts and mechanisms. *British journal of sports medicine*. 2012;46(5):308-311.



88. Cafarelli E. Peripheral contributions to the perception of effort. *Medicine and science in sports and exercise*. 1982;14(5):382-389.
89. McCloskey D. Corollary discharge and motor commands and perception. *Handbook of physiology*. 1981.
90. Hampson DB, St Clair Gibson A, Lambert MI, Noakes TD. The influence of sensory cues on the perception of exertion during exercise and central regulation of exercise performance. *Sports medicine (Auckland, NZ)*. 2001;31(13):935-952.
91. Amann M, Venturelli M, Ives SJ, et al. Peripheral fatigue limits endurance exercise via a sensory feedback-mediated reduction in spinal motoneuronal output. *Journal of applied physiology*. 2013;115(3):355-364.
92. Noble BJ. Perceived exertion. *Humankinetics, Champaign, IL*. 1996:115-117.
93. Halperin I, Emanuel A. Rating of perceived effort: Methodological concerns and future directions. *Sports Medicine*. 2020:1-9.
94. Pereira G, Souza DMd, Reichert FF, Smirmaul BPC. Evolution of perceived exertion concepts and mechanisms: a literature review. *Revista Brasileira de Cineantropometria & Desempenho Humano*. 2014;16:579-587.
95. Pageaux B. Perception of effort in exercise science: definition, measurement and perspectives. *European Journal of Sport Science*. 2016;16(8):885-894.
96. Straka H, Simmers J, Chagnaud BP. A New Perspective on Predictive Motor Signaling. *Curr Biol*. 2018;28(5):R232-r243.
97. Watson P, Head K, Pitiot A, Morris P, Maughan RJ. Effect of exercise and heat-induced hypohydration on brain volume. *Medicine and science in sports and exercise*. 2010;42(12):2197-2204.
98. Myers J, Atwood JE, Sullivan M, et al. Perceived exertion and gas exchange after calcium and beta-blockade in atrial fibrillation. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md : 1985)*. 1987;63(1):97-104.
99. Davies CT, Sargeant AJ. The effects of atropine and practolol on the perception of exertion during treadmill exercise. *Ergonomics*. 1979;22(10):1141-1146.
100. Giersch G.E.W., Morrissey M.C., Butler C.R., et al. Sex difference in initial thermoregulatory response to dehydrated exercise in the heat. *Physiol. Rep*. 2021;9:e14947.

## Tables

**Table 1.** Classification of percent body mass losses.

From	to	corresponds to
0.26	0.75%	0.5%
0.76	1.25%	1.0%
1.26	1.75%	1.5%
1.76	2.25%	2.0%
2.26	2.75%	2.5%
2.76	3.25%	3.0%

**Table 2.** Summary of characteristics of included studies.

References	Participants: n (women), age (years), $\dot{V}O_{2max}$ (mL/kg/min)	Protocol: total duration (min), exercise mode, temperature (°C), relative humidity (%), wind speed (km/h), fluid temperature (°C)	Fluid intake (mL/kg/min)	Same time of the day, familiarisation, same diet before	Body mass loss (%) <sup>s</sup> , dehydration rate (% body mass loss/min) <sup>s</sup>	RPE measurement and conclusion
<b>Studies that evaluated perceived exertion during fixed intensity exercise</b>						
Backhouse et al. (2007) <sup>46</sup>	15 (0) endurance-trained, 21, 65	90, running at 70% $\dot{V}O_{2max}$ , 20, 47, 0, 10	EUH: 0.14 EID: 0.0	Yes, no, yes	At the end of 90 min: EUH: 1.4, 0.016 EID: 2.7, 0.030 At 60 min <sup>#</sup> : EUH: 0.9 EID: 1.8	Borg 6-20 scale, reported every 20 min. No differences.
		Only 60 min included in the analysis because body mass loss >1% at 80 min in EUH <sup>#</sup> .				

Barwood et al. (2018) <sup>69</sup>	10 (0) non-heat acclimatised trained cyclists, 25, 60*	60+5, cycling at 55% P <sub>max</sub> (59% $\dot{V}O_{2max}$ ) followed by 80% P <sub>max</sub> (90% $\dot{V}O_{2max}$ ) time to exhaustion, 34, 34, 10.1, 27	EUH: 0.20 EID: 0.0	Yes, no, yes	At the end of the performance: EUH: 0.9, 0.014 EID: 2.1, 0.033	Borg 6-20 scale, reported every 15 min. No differences. Raw data provided by authors.
Below et al. (1995) <sup>27</sup>	8 (0) endurance trained, 23, 63	50+11, cycling at 80% of $\dot{V}O_{2max}$ followed by a performance test at 79% $\dot{V}O_{2max}$ , 31, 54, 12.6, 38 Same CHO intake	EUH: 0.31 EID: 0.05	Yes, yes, yes	At the end of the performance: EUH: 0.5, 0.008 EID: 1.9, 0.031	Borg 6-20 scale, reported every 10 min. RPE only significantly higher in EID at 40 and 50 min.
Costa et al. (2019) <sup>66</sup>	11 (0) competitive endurance runners, 34, 59	120, running at 70% $\dot{V}O_{2max}$ , 25, 46, 10.6, 24.7	EUH: 0.18 EID: 0.0	Yes, no, yes	EUH: 0.6, 0.005 EID: 3.1, 0.026	Borg 6-20 scale, reported every 30 min.

						RPE only significantly higher in EID at 120 min.
Ebert et al. (2007) <sup>44</sup>	8 (0) well-trained cyclists, 28, 66	120+17, cycling at 53% P <sub>max</sub> (55% $\dot{V}O_{2max}$ ) followed by cycling hill-climb time-to-exhaustion trial at 88% P <sub>max</sub> (85% $\dot{V}O_{2max}$ ), 29, 37, 15, - Same CHO intake Only 120 min included in the analysis because body mass loss >1% at the end of the performance in EUH#.	EUH: 0.28 EID: 0.05	Yes, yes, yes	At the end of the 120 min: EUH: -0.3, -0.0025 EID: 2.5, 0.021	Borg 6-20 scale, reported every 15 min No differences. Raw data provided by authors.

Funnell et al. (2019) <sup>28</sup>	7 (0) trained, non-heat acclimated cyclists/triathletes, 26, 64	120+15, cycling at 50% P <sub>max</sub> (51% $\dot{V}O_{2max}$ ) followed by a time-trial (77% $\dot{V}O_{2max}$ ), 31, 48, 21.2, 37 Only 120 min included in the analysis because body mass loss >1% at the end of the performance in EUH#.	EUH: 0.23 EID: 0.02	Yes, yes, yes	At the end of the 120 min: EUH: 0.5, 0.004 EID: 3.0, 0.025	Borg 6-20 scale, reported at 60 and 120 min. RPE only significantly higher in EID at 120 min. Raw data provided by authors.
McConnell et al. (1999) <sup>41</sup>	8 (0) well-trained cyclists and triathletes, 26, 64	45+15, cycling at 80% of $\dot{V}O_{2max}$ followed by an "all-out" performance at	EUH: 0.31 EID: 0.0	Yes, yes, yes	At the end of the performance: EUH: 0.0, 0.0 EID: 1.9, 0.032	Borg 6-20 scale, reported at 10, 30, 45 and 60 min. No differences.

		77% $\dot{V}O_{2max}$ , 21, 41, wind but speed not reported, room temperature				
Muñoz et al. (2012) <sup>42</sup>	10 (0) healthy runners, 25, 60	90+23, running at 30% $\dot{V}O_{2max}$ followed by a 5 km time-trial (72% $\dot{V}O_{2max}$ ), 33, 30, 0, 7 Only 90 min included in the analysis because body mass loss >1% at the end of the performance in EUH#.	EUH: 0.12 EID: 0.0	Yes, yes, yes	At the end of 90 min: EUH: 0.9, 0.010 EID: 1.8, 0.020	Borg 6-20 scale, reported every 5 min. No differences. Raw data provided by authors.

Murray et al. (1995) <sup>34</sup>	15 (0) trained, 29, 50	60, cycling at 50% $\dot{V}O_{2max}$ , 32, 70, 0, 5	EUH: 0.35 EID: 0.0	Yes, no, -	EUH: 0.1, 0.002 EID: 1.7, 0.028	Borg 6-20 scale, reported every 5 min. RPE significantly higher in EID than EUH (5 min condition) from 30 to 60 min. No difference between EID and EUH (10 min condition).
Vallier et al. (2005) <sup>67</sup>	8 (0) competitive trained cyclists or triathletes, 31, 63	180, cycling at 60% $\dot{V}O_{2max}$ , 20.5, 50, 9, 18.5 Only 80 min included in the analysis because body mass loss >1% at 80 min in EUH <sup>#</sup> .	EUH: 0.17 EID: 0.0	Yes, no, yes	At the end of the 180 min: EUH: 2.2, 0.012 EID: 4.1, 0.023 At 80 min <sup>#</sup> : EUH: 1.0 EID: 1.8	Borg 6-20 scale, reported every 20 min. No differences. However, the increase in RPE appears earlier in EID (100 min) compared to EUH (120 min).



Walsh et al. (1994) <sup>33</sup>	6 (0) endurance trained competitive cyclists or triathletes, 26, 61	60+8, cycling at 70% $\dot{V}O_{2max}$ followed by a time to exhaustion at 90% $\dot{V}O_{2max}$ , 30, 60, 3, 5	EUH: 0.23 EID: 0.0	Yes, no, yes	At the end of the 60 min: EUH: 0.2, 0.0033 EID: 1.8, 0.03	Borg CR10 scale, reported every 10 min. RPE higher in EID at 60 min only.
Wingo et al. (2005) <sup>68</sup>	9 (0) trained cyclists, 25, 55	45+7, cycling at 64% $\dot{V}O_{2max}$ followed by maximal test at 78% $\dot{V}O_{2max}$ , 35, 40, 0, 35	EUH: 0.47 EID: 0.0	Yes, yes, -	At the end of the performance: EUH: 0.3, 0.006 EID: 2.5, 0.049	Borg 6-20 scale, reported at 15 and 45 min. No differences. Raw data provided by authors.

**Studies that evaluated perceived exertion during self-paced intensity exercise**

Ali et al. (2017) <sup>65</sup>	9 (0) moderately trained cyclists, 33, 55	68.5, cycling time-trial at 78% $\dot{V}O_{2max}$ , 19, 48, 0, 6	EUH: 0.11 EID: 0.0	Yes, yes, yes	EUH: 0.6, 0.009 EID: 1.9, 0.028	Borg 6-20 scale, reported every 25% of exercise completed (every 17.1 min)
---------------------------------	---	--	-----------------------	---------------	------------------------------------	--

						No differences. Raw data provided by authors.
Dugas et al. (2009) <sup>40</sup>	6 (0) highly trained cyclists, 23, 77*	127, 80 km cycling time-trial at 47% P <sub>max</sub> (50% $\dot{V}O_{2max}$ ), 33, 50, 37.5, - Same CHO intake	EUH: 0.32 EID: 0.10	Yes, yes, yes	EUH: 0.5, 0.004 EID: 3.0, 0.024	Borg CR10 scale, reported at 40 and 80 km (at 63 and 127 min). No differences.
Perreault-Brière et al. (2019) <sup>43</sup>	9 (2) heat- or partially heat-acclimatized, healthy, endurance-trained competitive cyclists and triathletes, 30, 59	60, cycling time-trial at 80% $\dot{V}O_{2max}$ , 30, 49, 27.5, 5	EUH: 0.37 EID: 0.0	Yes, yes, yes	EUH: 0.6, 0.010 EID: 2.9, 0.048	Borg 6-20 scale, reported every 5 min. No differences. Raw data provided by authors.

Women tested  
during the follicular  
phase.

Robinson et al. (1995) <sup>47</sup>	8 (0) endurance-trained cyclists, 25, 66	60, cycling time-trial at 79% $\dot{V}O_{2max}$ , 20, 60, 10.8, 5	EUH: 0.32 EID: 0.0	Yes, yes, yes	EUH: 0.9, 0.016 EID: 2.3, 0.038	Borg 6-20 scale, reported every 10 min. No differences.
--------------------------------------	--	---	-----------------------	---------------	------------------------------------	--

References are listed in alphabetical order for both sections. EID: exercise-induced dehydration (experimental condition), EUH: euhydration (control condition), RPE: perceived exertion, -: missing data, \*: estimated  $\dot{V}O_{2max}$  using Hawley & Noakes (1992) equations. Value of 0 was attributed when wind speed was not provided. #: indicates the % of body mass loss taken for analysis for those studies in which body mass loss surpassed 1% in the EUH condition. \$: any positive value represents a body mass loss while negative values indicate body mass gain.

## Figure legends

### Figure 1.

Flowchart showing the selection process used for the inclusion and exclusion of studies.

### Figure 2.

(a) Changes in perceived exertion (means  $\pm$  SD) occurring during exercise between the euhydrated control condition (EUH) and the exercise-induced dehydration (EID) experimental condition across levels of exercise-induced dehydration of 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 and 3% body mass. AU: arbitrary units. EID: exercise-induced dehydration. EUH: euhydration. (b) Forest plot showing the mean differences in perceived exertion across different levels of exercise-induced dehydration. Filled diamond symbols represents the weighted mean change in perceived exertion between conditions. Size of squares is proportional to the weight of each study. AU: arbitrary units. CI: confidence interval.

### Figure 3

(a) Slope estimates for the regression of perceived exertion on the % body mass loss for each of the included studies; (b) Forest plot combining all slope estimates to derive a weighted mean summary effect; (c) Relationship between perceived exertion and % body mass loss while including all study-specific data points. AU: arbitrary units. CI: confidence interval. RPE: rating of perceived exertion.

### Figure 4

Relationships between the changes in slope estimates and (a) temperature, (b) humidity level, (c) exercise duration, (d) exercise intensity, (e) aerobic capacity ( $\dot{V}O_{2max}$ ) and mean (f) heart rate difference across the different studies included in the meta-analysis. Otherwise stated  $n = 16$ . CI: confidence interval. EID: exercise-induced dehydration

(experimental condition). EUH: euhydration (control condition). RPE: rating of perceived exertion.

## Figures

Figure 1

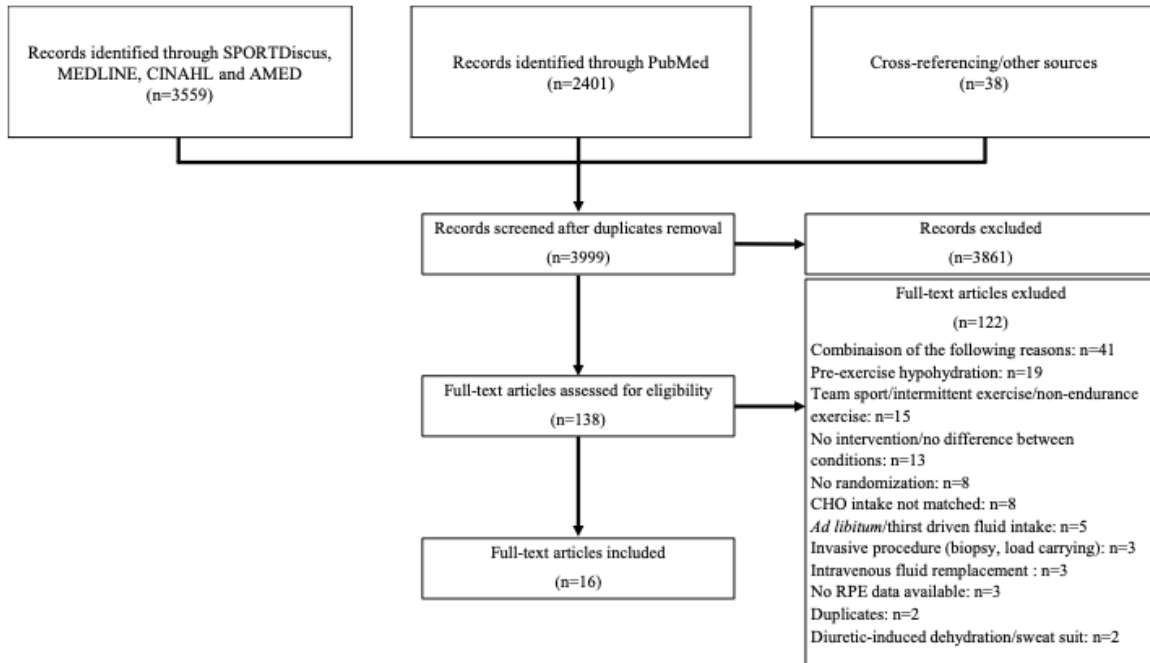
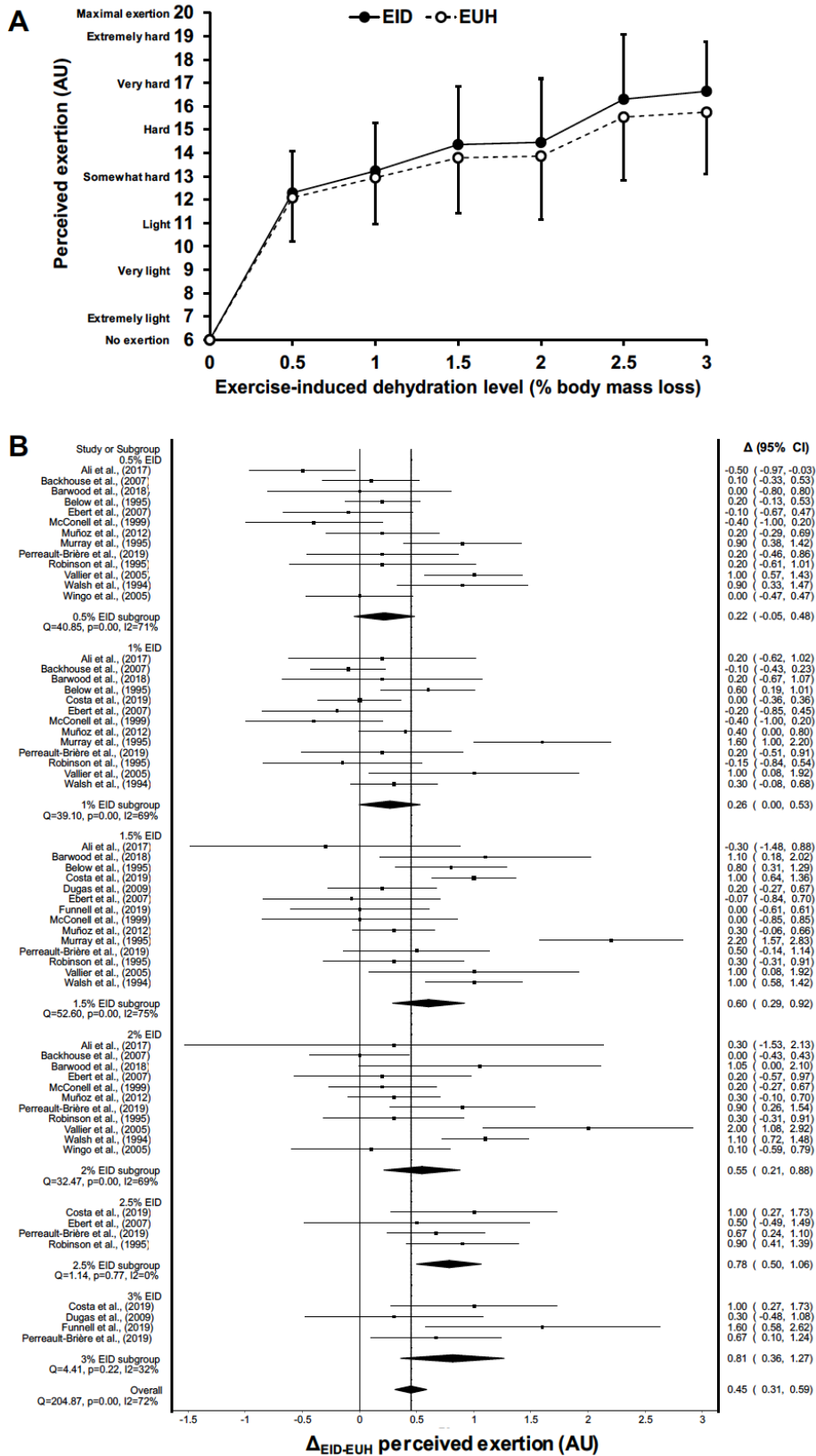
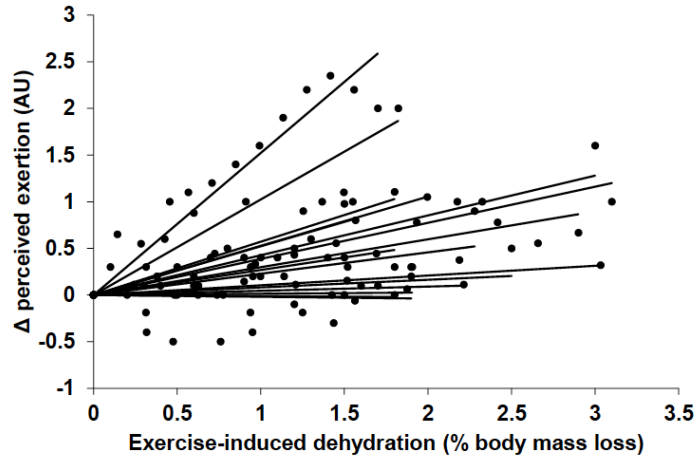


Figure 2

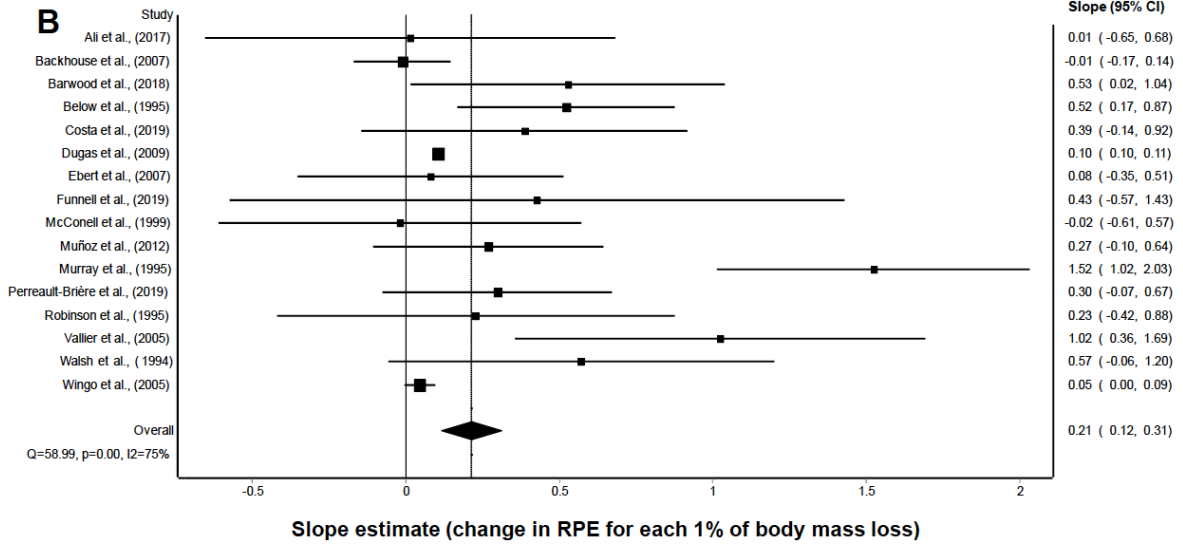


**Figure 3**

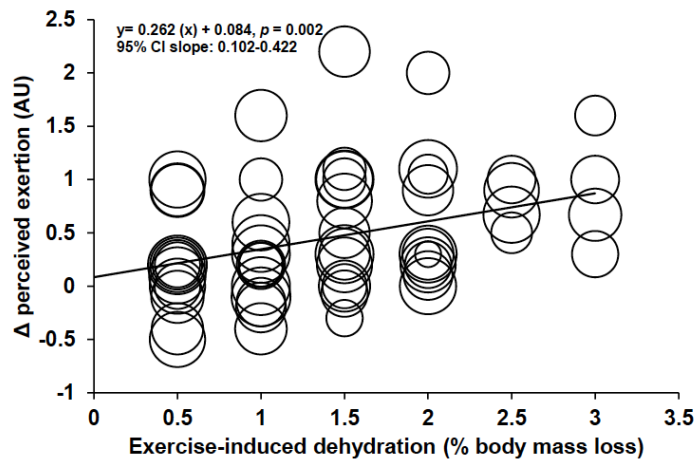
**A**



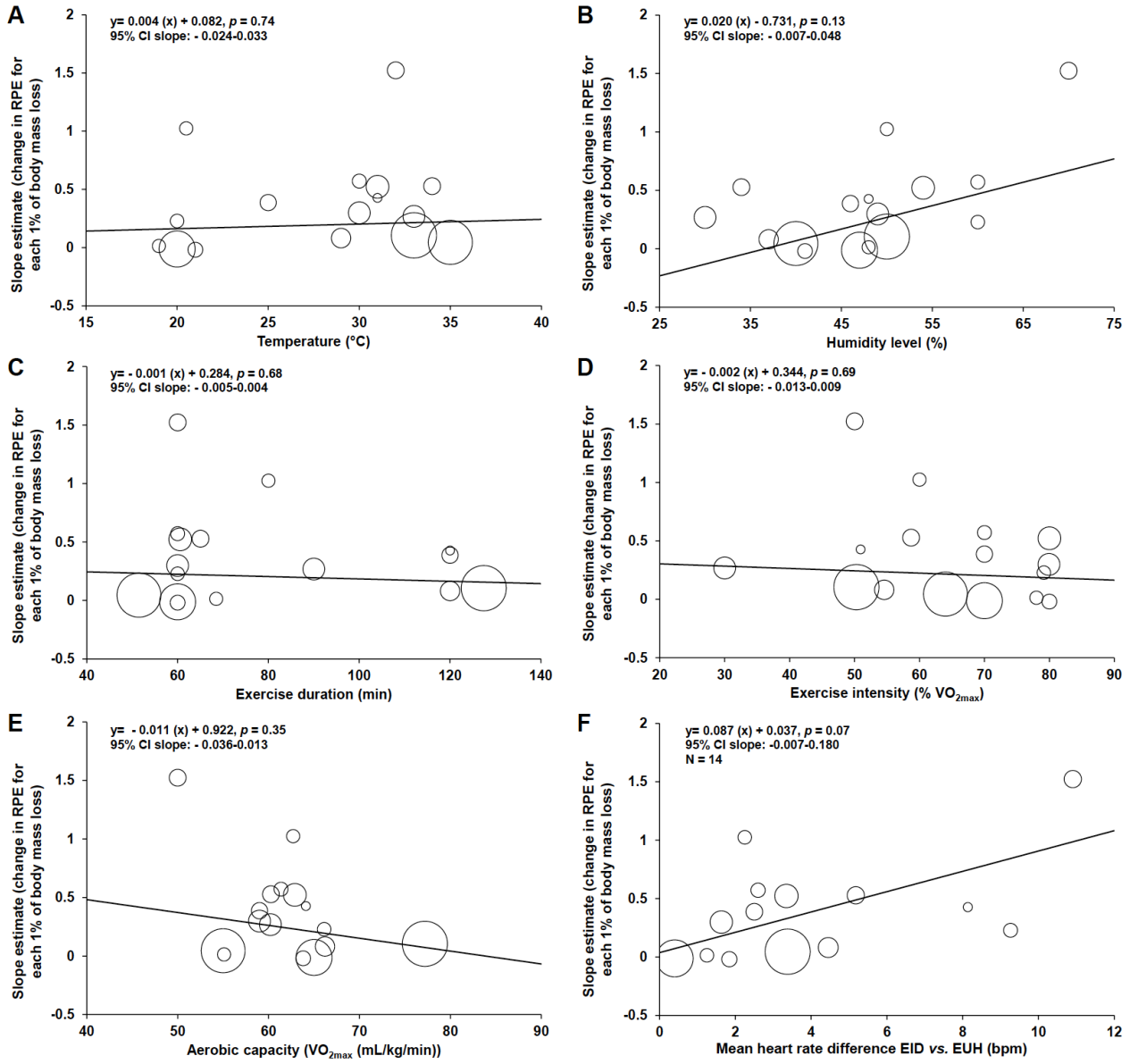
**B**



**C**



**Figure 4**





## Supplementary material

### **Impact of Exercise-induced Dehydration on Perceived Exertion During Endurance Exercise: A Systematic Review with Meta-analysis**

#### **Keywords and strategy used for the research of potential studies**

<b>Hydration (S1)</b>	Hydrat* or Dehydrat* or Hypohydrat* or Euhydrat* or fluid or drink*	Title or abstract
<b>Perceived exertion (S2)</b>	“Perceived exertion” or “Perceived effort” or “Rate of perceived exertion” or “Rating of perceived exertion” or “RPE” or percept* or exertion or effort	Title or abstract
<b>Exercise (S3)</b>	Exercise* or run* or cycl* or endurance or performance	Title or abstract
<b>Overall research</b>	S1 AND S2 AND S3	

*Note: Research has been done on EBSCO with 4 different databases: SPORTDiscus, CINAHL, AMED and MEDLINE. The same research was also done using PubMed. Last search: February 16, 2022.*

### 3.2. Impact of Repeated Acute Exposures to Low and Moderate Exercise-Induced Dehydration on Physiological and Subjective Responses and Endurance Performance

Article publié le 15 décembre 2021 dans *Nutrients*.

#### 3.2.1. Résumé

Cette étude visait à vérifier si des expositions répétées à une hypohydratation faible (2 %) ou modérée (4 % de la masse corporelle) induite par l'exercice pouvaient renverser l'effet potentiellement délétère de l'hypohydratation sur la performance d'endurance. À l'aide d'un protocole croisé randomisé, 10 volontaires (23 ans,  $\dot{V}O_{2\max}$  : 54 mL · kg<sup>-1</sup> · min<sup>-1</sup>) ont effectué deux blocs d'entraînement de 4 semaines entrecoupés d'une période de repos de 5 semaines. Lors d'un bloc, les participants remplaçaient toutes leurs pertes hydriques (EUH) tandis que dans l'autre, ils ne consommaient pas de liquide (DEH). Les participants effectuaient 3 séances d'exercice par semaine (marche/course légère, 55 %  $\dot{V}O_{2\max}$ , 40 °C) : (1) 1 heure avec apport hydrique nul ou *ad libitum*, (2) jusqu'à ce que 2 et (3) 4 % de la masse corporelle aient été perdus ou remplacés. Au cours de la première et de la quatrième semaine de chaque bloc d'entraînement, les participants effectuaient un contre-la-montre de 12 minutes immédiatement après avoir atteint 2 et 4 % de perte de masse corporelle. La durée d'exercice et la distance parcourue ( $14,1 \pm 2,7$  vs.  $6,9 \pm 1,5$  km) pendant les séances d'exercice à intensité fixe étaient plus importantes dans la condition 4 % par rapport à la condition 2 % ( $p < 0,01$ ) sans différence entre DEH et EUH. Au cours de la première semaine, la fréquence cardiaque, la température rectale et la perception de l'effort étaient plus élevées ( $p < 0,05$ ) avec DEH qu'avec EUH, et l'entraînement n'a pas modifié ces résultats. L'hypohydratation induite par l'exercice de 2 et 4 % de la masse corporelle a affecté d'une manière pratique la performance au contre-la-montre tant au début qu'à la fin du bloc d'entraînement. En conclusion, l'hypohydratation induite par l'exercice de 2 et 4 % de la masse corporelle altère la performance au contre-la-montre de marche/course de 12 minutes, et des expositions répétées à ces niveaux d'hypohydratation ne renversent pas la baisse de performance.

**Mots clés** : hypohydratation, déshydratation induite par l'exercice, répété, habituation, performance

## Article

# Impact of Repeated Acute Exposures to Low and Moderate Exercise-Induced Hypohydration on Physiological and Subjective Responses and Endurance Performance

Thomas A. Deshayes <sup>1,2</sup>, Nicolas Daigle <sup>1</sup>, David Jeker <sup>1</sup>, Martin Lamontagne-Lacasse <sup>1</sup>, Maxime Perreault-Briere <sup>1</sup>, Pascale Claveau <sup>1</sup>, Ivan L. Simoneau <sup>3</sup>, Estelle Chamoux <sup>4</sup> and Eric D.B. Goulet <sup>1,2,\*</sup>

**Citation:** Deshayes, T.A.; Daigle, N.; Jeker, D.; Lamontagne-Lacasse, M.; Perreault-Briere, M.; Claveau, P.; Simoneau, I.L.; Chamoux, E.; Goulet, E.D.B. Impact of Repeated Acute Exposures to Low and Moderate Exercise-Induced Hypohydration on Physiological and Subjective Responses and Endurance Performance. *Nutrients* **2021**, *13*, 4477. <https://doi.org/10.3390/nu13124477>

Academic Editor: William M. Adams

Received: 25 October 2021

Accepted: 23 November 2021

Published: 15 December 2021

**Publisher's Note:** MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



**Copyright:** © 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

- <sup>1</sup> Faculty of Physical Activity Sciences, University of Sherbrooke, Sherbrooke, QC J1K 2R1, Canada; thomas.deshayes@usherbrooke.ca (T.A.D.); nicolas.daigle@usherbrooke.ca (N.D.); david.jeker@usherbrooke.ca (D.J.); mllacasse@yahoo.fr (M.L.-L.); maxime.perreault-briere@usherbrooke.ca (M.P.-B.); pascale.claveau2@usherbrooke.ca (P.C.)
  - <sup>2</sup> Research Center on Aging, University of Sherbrooke, Sherbrooke, QC J1H 4C4, Canada
  - <sup>3</sup> Centre de recherche et de formation par simulation, Cegep of Sherbrooke, Sherbrooke, QC J1E 4K1, Canada; drsimoneau1@gmail.com
  - <sup>4</sup> Faculty of Arts and Science, Biological sciences, Bishop's University, Sherbrooke, QC J1M 1Z7, Canada; echamoux@ubishops.ca
- \* Correspondence: eric.goulet@usherbrooke.ca

**Abstract:** This study aimed to examine whether repeated exposures to low (2%) and moderate (4%) exercise-induced hypohydration may reverse the potentially deleterious effect of hypohydration on endurance performance. Using a randomized crossover protocol, ten volunteers (23 years,  $\dot{V}O_{2max}$ : 54 mL·kg<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>) completed two 4-week training blocks interspersed by a 5-week washout period. During one block, participants replaced all fluid losses (EUH) while in the other they were fluid restricted (DEH). Participants completed three exercise sessions per week (walking/running, 55%  $\dot{V}O_{2max}$ , 40 °C): (1) 1 h while fluid restricted or drinking *ad libitum*, (2) until 2 and (3) 4% of body mass has been lost or replaced. During the first and the fourth week of each training block, participants completed a 12 min time-trial immediately after 2 and 4% body mass loss has been reached. Exercise duration and distance completed ( $14.1 \pm 2.7$  vs.  $6.9 \pm 1.5$  km) during the fixed-intensity exercise bouts were greater in the 4 compared to the 2% condition ( $p < 0.01$ ) with no difference between DEH and EUH. During the first week, heart rate, rectal temperature and perceived exertion were higher ( $p < 0.05$ ) with DEH than EUH, and training did not change these outcomes. Exercise-induced hypohydration of 2 and 4% body mass impaired time-trial performance in a practical manner both at the start and end of the training block. In conclusion, exercise-induced hypohydration of 2 and 4% body mass impairs 12 min walking/running time-trial, and repeated exposures to these hypohydration levels cannot reverse the impairment in performance

**Keywords:** hypohydration; exercise-induced dehydration; repeated; habituation; performance

---

## 1. Introduction

Exercise-induced dehydration leading to a lower than normal body water level (i.e., hypohydration) exacerbates cardiovascular drift, core temperature strain [1,2] and glycogenolysis [3–5], reduces muscle [6] and cerebral blood flow [7], increases rating of perceived exertion [1,4,5] and thirst and alters mood. It has been reported that these responses are proportional to the level of hypohydration induced [1]. Individually or in concert, these factors may contribute to and explain the decrease in endurance performance associated with hypohydration, especially if exercise is performed in a hot/humid environment [8–10].

It has been postulated that training status, degree of heat acclimation and familiarity with hypohydration may reduce some of the physiological and performance impairments usually associated with hypohydration [11–19]. Endurance athletes are exposed to hypohydration on a daily basis [20]; in fact, they only replace approximately 50% of their sweat losses while consuming fluid *ad libitum* [21]. Several observational field studies have reported that important acute body mass losses accrued during endurance exercise, which can be taken as an imperfect, but nevertheless, accepted reflection of hypohydration, are sometimes associated with the best endurance performances [22–27]. Although not supportive of a cause and effect relationship, this observation nevertheless highlights the possibility that endurance athletes may, to a certain extent, adapt to hypohydration. However, few studies have experimentally investigated whether repeated acute exposures to hypohydration could, indeed, reduce physiological strain and protect subsequent performance while exercising with hypohydration. As with repeated exposures to altitude [28] or heat stress [29], two situations for which it is possible to adapt to a certain extent, it cannot be ruled out that an individual could potentially get used to the repeated effects of hypohydration, when specifically trained to tolerate its effects.

Several studies have examined whether consuming fluid or not during a heat acclimation protocol could influence performance while exercising at a single and common hydration level, before and after the heat acclimation protocol. With one exception [30], their results showed that whether one drinks or not during a heat acclimation protocol should have no consequence on exercise performance [19,31–34]. However, results of these studies preclude the understanding of whether one could adapt or not to the repeated effects of hypohydration as, to achieve so, experiments conducted while euhydrated and hypohydrated prior and after a habituation protocol are required. To this day, only one study has attempted to

determine whether humans could adapt to the repeated effects of hypohydration [18]. It had active individuals train on 4 occasions in a thermoneutral climate while being hypohydrated by ~2.5% of body mass. Pre- and post-training 5 km running time-trial performance was measured while athletes were hypohydrated and euhydrated. Results showed that habituation to hypohydration significantly attenuated, but did not completely reverse, the decrease in time-trial performance. Moreover, while heart rate remained higher during the hypohydrated trial after habituation, participants reported lower perceived exertion.

Results of the Fleming and James [18] study raise several questions. Indeed, would the results have been different if (1) the habituation protocol was conducted in the heat; (2) the participants were exposed to greater levels of hypohydration during the habituation protocol and; (3) the participants underwent more habituation time/exposures. Moreover, it is unknown whether exposure to two different hypohydration levels during the habituation protocol would lead to similar or different performance effects and what kind of effect would produce habituation to a moderate hypohydration level when performance is evaluated at low hypohydration level. It cannot be excluded that certain physiological adaptations may occur with repeated hypohydration exposures and result in better physiological and perceptual responses during subsequent exposures. For example, repeated exposures to hyperosmotic stress might eventually lead to reduction in perceptual outcomes such as perceived thirst and perceived exertion, two variables that can influence endurance performance [8,13,18].

Therefore, the aim of this study was to determine the extent to which low (2%) and moderate (4% body mass) hypohydration levels impact endurance performance following exercise conducted in a hot environment while not habituated to hypohydration, and whether repeated exposures to the effect of hypohydration moderate the baseline response, compared with a situation where hypohydration is prevented during exercise. It was hypothesized that endurance performance would be significantly lowered by 2 and 4% hypohydration levels prior to habituation, that after several training sessions with repeated exposures to hypohydration the decline in endurance performance would completely be reversed at the two different hypohydration levels and that the percent change in performance with the 2% hypohydration level following habituation would be superior to that of the 4% hypohydration level.

## **2. Materials and Methods**

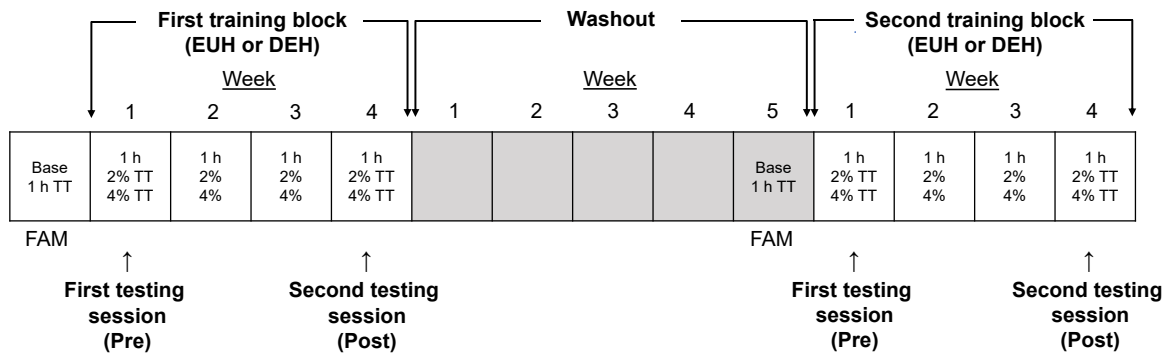
### *2.1. Participants*

Fifteen (5 women) non-heat-acclimated physically active participants were initially recruited, but ten (2 women) completed the entire study. Reasons for withdrawal included knee injury ( $n = 1$ ), fear of hypohydration ( $n = 1$ ), health reason unrelated to this study ( $n = 1$ ), unable to complete the exercise session ( $n = 1$ ) and personal

reason ( $n = 1$ ). Women were tested during the follicular phase of their menstrual cycle (period ranging from the first day of menstruation + the following 13 days). Before obtaining their informed written consent, each participant received explanations of the entire study protocol and associated risks. The CIUSSS Estrie-CHUS Ethics Committee (#2019-3081) approved all procedures. All experiments occurred from March to July in Sherbrooke, Canada.

### 2.2. Overview of This Study

Figure 1 illustrates the experimental design of this study. Using a randomized and crossover protocol (for training block (euhydrated (EUH) or dehydrated (DEH)) and condition (2 or 4% body mass loss)), all participants completed two, 4-week training blocks in the heat interspersed by a 5-week washout period. The washout period aimed to eliminate the heat stress- and potential hypohydration-related adaptations that could have occurred during the first training block. The week prior to each training block participants underwent baseline measurements and were familiarized with the time-trial performance test. Each training block included 3 exercise sessions per week where participants walked/run at a fixed intensity for a 1 h period or until a body mass of 2 or 4% had been lost (DEH) or replaced (EUH). Endurance performance assessments were completed during the testing sessions that occurred the first and fourth week of each training block, immediately following the 2 and 4% fixed-intensity exercise bouts.



**Figure 1.** Experimental design of this study. FAM = familiarization session; Base = baseline measurements; 1 h TT = 1 h exercise + 12 min time-trial; 1 h = 1 h exercise bout only; 2% TT = exercise until a loss of 2% body mass has been lost or replaced + 12 min time-trial; 4% TT = exercise until a loss of 4% body mass has been lost or replaced + 12 min time-trial; EUH = euhydrated; DEH = dehydrated.

### 2.3. Baseline Measurements

During their first visit to the laboratory, participants underwent measurements of their post-void body mass with a floor scale ( $\pm 20$  g, BX-300+, Atron Systems, West Caldwell, NJ, USA), height with a wall stadiometer, resting blood pressure and heart rate after a 3 min rest period with a digital sphygmomanometer (Welch Allyn 420 series, Skaneateles Falls, NY, USA) and body composition with dual-energy X-ray absorptiometry (Lunar Prodigy, GE Healthcare, Chicago, IL,

USA). Maximal oxygen consumption ( $\dot{V}O_{2\max}$ ) was measured on a motorized treadmill (model TMX428 Trackmaster, Newton, KS, USA) using an expired gas analysis system (Cosmed Quark CPET, Cosmed, Chicago, IL, USA) that had been calibrated with gases of known concentration. The attainment of  $\dot{V}O_{2\max}$  was confirmed using the ACSM criteria [35].

#### 2.4. Familiarization Session

The aim of this trial consisting in a 1 h exercise session followed by a time-trial was to determine the best combination of speed and grade to be used by participants during the remainder of the training block and familiarize themselves with the 12 min time-trial. After having voided, participants entered the environmental chamber (maintained at 40 °C and 20-30% relative humidity) and were instrumented with a face mask to measure  $\dot{V}O_2$ . Participants then began exercising and were told to adjust the treadmill's grades and speeds such to find the best combination eliciting 55%  $\dot{V}O_{2\max}$ . Once this was achieved and  $\dot{V}O_2$  had stabilized, the face mask removed. This entire process took 20-30 min. Immediately following the 1 h exercise bout, participants completed a 12 min self-paced time-trial, at the pre-selected grade. During the EUH training block participants could drink water *ad libitum* during the fixed-intensity exercise period, whereas during the DEH training block they were deprived from fluid consumption.

#### 2.5. Pre-Experimental Procedures

Food and fluid intakes were recorded for 24 h prior to the 2 and 4% exercise sessions of the first week of each training block. Then, participants were required to replicate food and fluid intake before all subsequent 2 and 4% exercise sessions. No such control occurred before the 1 h exercise session. Sports supplements and physical activity were restricted, respectively, for the last 24 and 12 h before each exercise session. Prior to each exercise session participants were required to consume 250 mL of water 1 h before bedtime. The same amount of water was also consumed 1 h before arrival at the laboratory, after which participants were asked to remain fast. No other instructions were provided to participants between exercise sessions.

#### 2.6. Exercise/Testing Sessions

On their arrival at the laboratory, participants emptied their bladder, collected a urine sample, were nude weighted, dressed themselves, installed a chest electrode and rectal probe and, only for the testing sessions, were instrumented with a catheter. Participants then entered the environmental chamber (40 °C and 20–30% relative humidity, wind speed:  $\sim 5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ), rested on the treadmill for 2 min (or 10 min for the testing sessions) and then started exercise, which consisted of walking or light running at the self-selected speed and grade chosen during the familiarization trial.

The first weekly exercise session always consisted in the completion of 2 × 30 min exercise bouts interspersed by a recovery period of 3 min inside the chamber. During this session, participants could (EUH) or could not (DEH) drink water *ad libitum*. Over the next 2 exercise sessions, participants completed cycles consisting of 8 min of exercise followed by 2 min of recovery inside the chamber until a sweat-induced body mass loss of either 2 or 4% was reached. During each of the 2 min recovery period subjects were requested to urinate and then were weighted. Urine losses were not considered in the cumulated loss of body mass and hence were entirely replaced during exercise. Sweat-induced body mass loss was computed with the following formula:

$$\text{SIBML} = \text{BM of the preceding weighing period (kg)} - \text{BM of the current weighing period (kg)} + \text{WC during the exercise period immediately preceding the weighing period (kg)} - \text{UP during the exercise period immediately preceding the weighing period (kg)} \quad (1)$$

Where,

SIBML is sweat-induced body mass loss;

BM is body mass;

WC is water consumed and;

UP is urine produced.

With EUH, participants were requested to consume water at whenever time they wanted over a period of 8 min at an amount corresponding to the sweat and urine losses cumulated over the prior 10 min period. With DEH, participants were fluid restricted but were allowed to rinse their mouths with water at any time. Moreover, they could pour cold water on their bodies and heads at a rate of 100 mL·h<sup>-1</sup> (both EUH and DEH). During these 2 exercise sessions,  $\dot{V}O_2$  was continuously measured during the first 10 min of exercise and treadmill speed adjusted accordingly to elicit the required intensity. On the first and fourth week of both training blocks (i.e., testing sessions), participants were requested to complete a performance test immediately following the achievement of the targeted body mass loss (i.e., 2 or 4%). The test consisted of a self-paced 12 min time-trial where participants had to cover the greatest distance possible [36] at the same grade as during the fixed-intensity period (mean: 5 ± 4%, min-max: 1–10%). Participants were given access to performance time but not speed. Participants always exercised with the same gears and testing sessions were performed at the same time of the day. Following 1 h of exercise and every 30 min thereafter, participants were requested to consume energy gels (GU Energy gel, Berkeley, CA, USA) containing 22 g of carbohydrates and 60 mg of sodium.

## 2.7. Measurements



Heart rate was measured with a Garmin chest electrode (USB ANT stick (Garmin, Olathe, Kansas, USA) + Golden Cheetah software) and rectal temperature using the reusable telemetric pill technique (CoreTemp, HQ, Palmetto, FL, USA) [37]. Rectal temperature, perceived exertion (15-point Borg scale (from 6–20); [38]), thirst (11-point scale; [39]) and thermal comfort (7-point scale; [40]) were measured every 4 min. During the self-paced 12 min time-trial, all the variables of interest were collected at min 4, 8 and 12. Percent dehydration was computed as the difference between pre- and post-exercise body mass (post-void) relative to pre-exercise body mass. Sweat loss was calculated by subtracting the post- from the pre-exercise body mass (post-void) while correcting for fluid intake and urine losses. Whole-body sweat rate was determined by dividing sweat loss by total exercise duration (fixed-intensity + 12 min time-trial). Respiratory water losses and losses of mass associated with the respiratory exchange of O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> were not considered and assumed to be similar among trials.

### *2.8. Blood Measures*

Only during the testing sessions, a flexible catheter was inserted in the antecubital vein and venous blood samples (12 mL) were taken at rest (after the 10 min stabilization phase in the chamber on the treadmill), at ~50% of the total exercise time and at the end of the fixed-intensity exercise bout. The blood was collected in either heparinized or EDTA tubes. Hemoglobin was analyzed by spectrophotometry (Alere H2 Hemopoint, Waltham, MA, USA) and hematocrit by microcentrifugation (5 min at 10,000× g). Heparinized blood was centrifuged at room temperature at 2000× g for 5 min and the extracted plasma was stored at –20 °C until analyses. Blood collected in EDTA tubes was centrifuged (2000× g, 10 min) at 4 °C and plasma was stored at –80 °C until analyses. Plasma volume changes were computed according to Dill and Costill [41], and plasma natremia was measured using the ion selective electrodes technique (Easy Electrolytes, Medica Corporation, Bedford, MA, USA), plasma osmolality the freezing point depression technique (Micro Osmometer, Osmette, Precision Systems Inc., Natick, MA, USA) and plasma aldosterone enzyme-linked immunosorbent assay commercially available kits (Cayman Chemical Company, Ann Arbor, MI, USA). Intra- and inter-assay coefficients of variation (CV) were, respectively, 8.6 and 6.9%.

### *2.9. Statistical Analyses*

All statistical analyses were performed using IBM SPSS Statistics software (version 26, New York, USA). Shapiro–Wilk tests were used to analyze data normality. Dependent t-tests or Wilcoxon *signed-rank tests* were used to compare the characteristics of the participants and to verify whether physiological changes were observed between the first and the second training block. Two and three-factor (hydration\*condition\*training) repeated-measures ANOVAs and, for variables with missing cases, linear mixed models

were used to determine the impact of, and interaction effects between, hydration (EUH vs. DEH), condition (2 vs. 4%) and training (pre (i.e., first testing session) vs. post (i.e., second testing session)). In cases where sphericity was violated, Greenhouse–Geisser correction was applied. When significant interaction effects were detected, multiple pairwise comparisons were performed and corrected with the false discovery rate procedure. Because of inter- and intra-participants differences in exercise duration, data collected at several time points are reported based on percentage of total exercise duration. Data are presented as the means  $\pm$  standard deviations (SD), with 95% confidence intervals (95% CI) for endurance performance only. Statistical significance was set at  $p \leq 0.05$ . All presented data are  $n = 10$  unless stated otherwise.

The distance completed during the 12 min self-paced time-trial test was used as the dependent variable for the sample size calculation. Based on a counterbalanced protocol, a two-tailed t-test, a test–retest CV estimated at around 1.7% [36], a coefficient  $\alpha$  of 0.05, a power of 80% and a desired minimum difference between EUH and DEH of 3.5% (twice the test–retest CV), the sample size required to detect a significant difference between conditions was of at least 7 participants.

### 3. Results

#### 3.1. Participants' Characteristics before Starting Both Training Block

Table 1 shows participants' characteristics prior to starting both training blocks. Participants started both training blocks with similar cardiorespiratory fitness and body composition levels (all  $p > 0.05$ ). Moreover, mean heart rate, rectal temperature and whole-body sweat rate maintained during the first 1 h exercise bout, as well as the 12 min time-trial time during the familiarization session, were similar during the first ( $133 \pm 8$  beats·min<sup>-1</sup>,  $38.3 \pm 0.4$  °C,  $1.3 \pm 0.3$  L·h<sup>-1</sup>, and  $2.00 \pm 0.67$  km, respectively) and the second ( $133 \pm 8$  beats·min<sup>-1</sup>,  $38.3 \pm 0.3$  °C,  $1.3 \pm 0.3$  L·h<sup>-1</sup>, and  $1.95 \pm 0.57$  km, respectively) training block (all  $p > 0.05$ ), suggesting that no training or acclimation effects were present at the beginning of the second training block.

**Table 1.** Participants' characteristics before starting each training block.

Characteristics	Before First Training Block	Before Second Training Block	<i>p</i> -Value
Age (years)	23 $\pm$ 5	23 $\pm$ 5	0.32
Height (cm)	176 $\pm$ 8	176 $\pm$ 8	0.68
Body mass (kg)	71.6 $\pm$ 11.8	71.2 $\pm$ 12.2	0.30
Body mass index (kg·m <sup>-2</sup> )	23.1 $\pm$ 2.9	22.9 $\pm$ 3.1	0.26
Relative maximal oxygen consumption (mL·kg <sup>-1</sup> ·min <sup>-1</sup> )	55 $\pm$ 7	54 $\pm$ 7	0.25
Absolute maximal oxygen consumption (mL·min <sup>-1</sup> )	3925 $\pm$ 861	3865 $\pm$ 809	0.36
Maximal heart rate (beats·min <sup>-1</sup> )	193 $\pm$ 7	191 $\pm$ 7	0.12

Fat-free mass (%)	82.4 ± 6.5	82.3 ± 5.7	0.81
Fat mass (%)	14.0 ± 6.6	14.2 ± 5.8	0.72

Data are the means ± SD. All data are  $n = 10$  except for fat-free mass and fat mass (both  $n = 9$ ).

### 3.2. Environmental Conditions during the Testing Sessions

Environmental conditions ( $40.0 \pm 0.2$  °C and  $25.7 \pm 2.1\%$  of relative humidity) remained constant through all testing sessions (all  $p > 0.05$ ), except for a condition effect for relative humidity ( $\Delta = 1.2\%$ ,  $p = 0.003$ ).

### 3.3. Hydration State Prior to the Testing Sessions

Participants started all testing sessions in a similar hydration state, as indicated by the constant pre-exercise body mass, hematocrit, heart rate and plasma osmolality across trials (Table 2, all  $p > 0.05$ ).

**Table 2.** Hydration state prior to each testing session with euhydration and dehydration.

Variables	First Testing Session		Second Testing Session	
	2% Condition	4% Condition	2% Condition	4% Condition
<b>Euhydrated</b>				
Body mass (kg)	71.6 ± 12.5	71.4 ± 12.3	71.2 ± 11.7	71.1 ± 11.6
Hematocrit (%)	44.5 ± 3.0	44.8 ± 2.2	44.1 ± 3.6	44.3 ± 3.1
Heart rate (beats·min <sup>-1</sup> )	87 ± 17	87 ± 16	82 ± 10	85 ± 14
Plasma osmolality (mOsm·kg <sup>-1</sup> )	287.2 ± 4.8	289.0 ± 3.7	292.0 ± 5.4	289.9 ± 5.0
Plasma aldosterone (pg·mL <sup>-1</sup> )	205 ± 102	166 ± 82	183 ± 102	190 ± 102
<b>Dehydrated</b>				
Body mass (kg)	71.4 ± 12.1	71.7 ± 11.9	70.9 ± 11.7	70.9 ± 11.6
Hematocrit (%)	44.2 ± 3.4	44.6 ± 3.3	44.2 ± 2.8	44.7 ± 2.7
Heart rate (beats·min <sup>-1</sup> )	87 ± 20	85 ± 11	86 ± 17	84 ± 11
Plasma osmolality (mOsm·kg <sup>-1</sup> )	288.8 ± 3.7	287.9 ± 3.7	286.4 ± 6.7	287.3 ± 5.5
Plasma aldosterone (pg·mL <sup>-1</sup> )	213 ± 121	210 ± 112	215 ± 147	217 ± 119

Values are pre-exercise values presented as the means ± SD.

### 3.4. Hydration State during the Testing Sessions

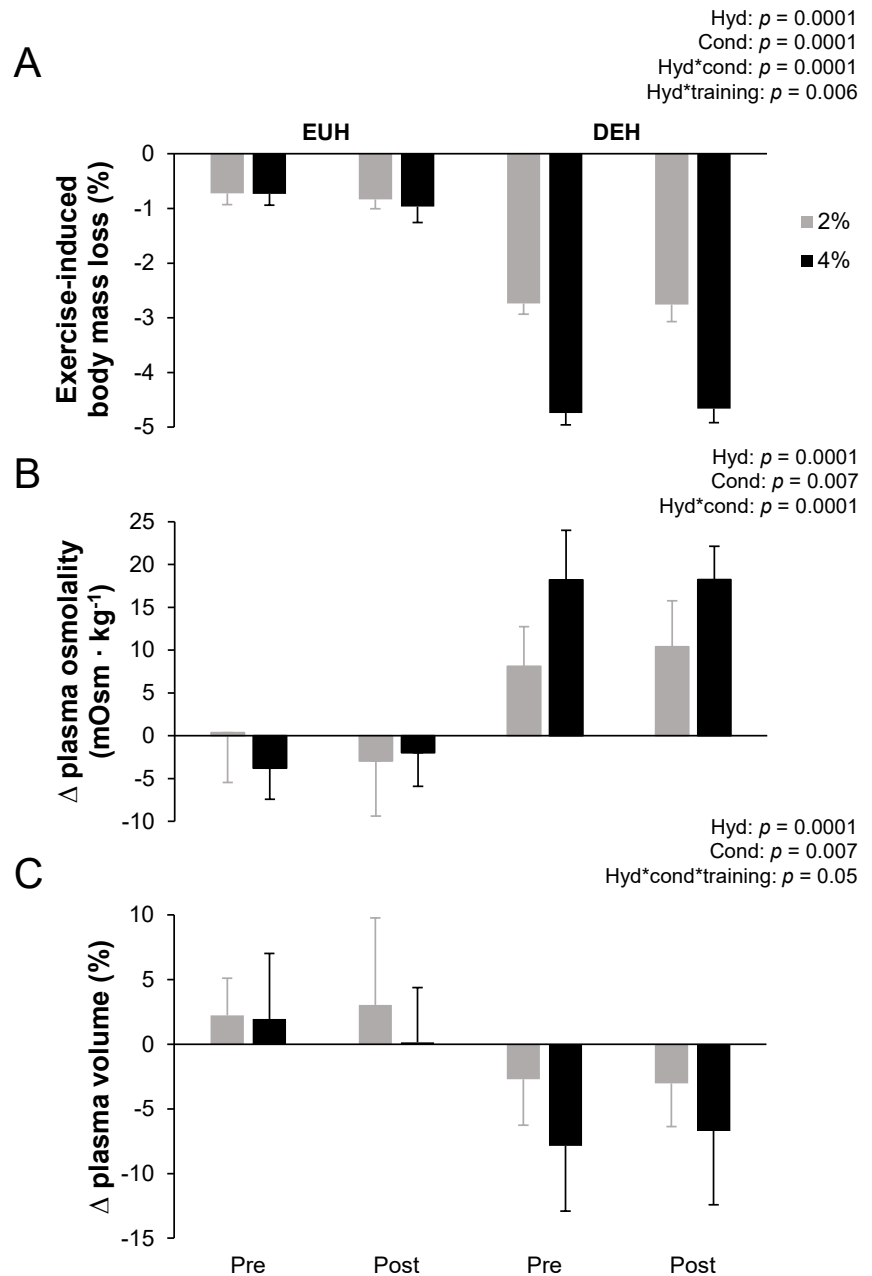
Figure 2 depicts the % body mass losses measured at the end of the 12 min time-trial (a) and changes in plasma osmolality (b) and plasma volume (c) measured at the end of the fixed-intensity exercise period during the first and second testing sessions after the replacement or loss of 2 and 4% body mass. As to be expected, exercise-induced body mass loss at the end of the 12 min time-trial was higher with DEH, with an average of  $3.7 \pm 1.0\%$ , while it remained  $< 1\%$  ( $0.8 \pm 0.2\%$ ) with EUH. There were condition, hydration\*condition and hydration\*training effects, but no other main effects (all  $p > 0.05$ ). Post hoc analyzes revealed that the condition effect was observed only with DEH ( $p = 0.0002$ ), but not

with EUH ( $p = 0.10$ ) and that the training effect was only observed with EUH ( $p = 0.005$ ) but not with DEH ( $p = 0.48$ ).

At the end of the fixed-intensity exercise bout plasma osmolality increased more with DEH than with EUH ( $13.7 \pm 2.6$  vs.  $-2.1 \pm 2.7$  mOsm $\cdot$ kg $^{-1}$ ), reaching  $301.3 \pm 6.7$  vs.  $287.4 \pm 4.9$  mOsm $\cdot$ kg $^{-1}$ , respectively, with condition and hydration\*condition effects (all  $p < 0.05$ ). Post hoc analyzes revealed that the hydration effect was present in both conditions and that the condition effect was observed only with DEH (2%:  $9.3 \pm 3.2$  vs. 4%:  $18.2 \pm 3.4$  mOsm $\cdot$ kg $^{-1}$ ,  $p = 0.0002$ ) but not with EUH (2%:  $-1.3 \pm 4.3$  vs. 4%:  $-2.9 \pm 2.9$  mOsm $\cdot$ kg $^{-1}$ ,  $p = 0.35$ ). There were also no differences in the extent of the plasma osmolality changes between the first and the second testing session as suggested by the absence of training effect ( $p = 0.86$ ).

Plasma volume at the end of the fixed-intensity exercise bout was significantly lower with DEH than with EUH, with condition and hydration\*condition\*training effects (all  $p < 0.05$ ). However, there were no differences in the extent of the plasma volume changes between the first and the second testing session. There was an absence of training effect ( $p = 0.95$ ), as well as no hydration\*condition ( $p = 0.22$ ), hydration\*training ( $p = 0.59$ ) or condition\*training ( $p = 0.66$ ) effects. Post hoc analyzes revealed that the condition effect was only observed with DEH pre (DEH post:  $p = 0.054$ ) and that the hydration effect was only present for 2% pre, 4% pre and 4% post (all  $p < 0.01$ , 2% post:  $p = 0.062$ ). Main effects of condition ( $\Delta = 0.1$  L $\cdot$ h $^{-1}$ ,  $p = 0.001$ ) and training (increase of  $\sim 0.1$  L $\cdot$ h $^{-1}$ ,  $p = 0.0001$ ) were observed for whole-body sweat rate. However, no hydration ( $p = 0.39$ ) or other interaction effects were observed (all  $p > 0.05$ ).

Pre-exercise plasma aldosterone concentrations were similar across all testing sessions ( $200 \pm 109$  pg $\cdot$ mL $^{-1}$ , all  $p > 0.05$ ). However, at the end of the preload, plasma aldosterone concentrations were higher with the 4 than the 2% condition ( $p = 0.003$ ), with hydration\*condition ( $p = 0.01$ ) but no hydration ( $p = 0.07$ ), training ( $p = 0.08$ ), condition\*training ( $p = 0.22$ ), hydration\*training ( $p = 0.19$ ) or hydration\*condition\*training ( $p = 0.054$ ) effects. Post hoc analyzes revealed that condition effect was present for both, DEH ( $p = 0.02$ ) and EUH ( $p = 0.04$ ), but that the hydration effect was only present for the 4 ( $+140 \pm 166$  pg $\cdot$ mL $^{-1}$ ,  $p = 0.03$ ) but not the 2% condition ( $+25 \pm 136$  pg $\cdot$ mL $^{-1}$ ,  $p = 0.57$ ).



**Figure 2.** Exercise-induced body mass losses at the end of the 12 min time-trial (A) and changes in plasma osmolality (B) and plasma volume (C) measured at the end of the fixed-intensity exercise periods while replacing or not 2 or 4% body mass losses, pre- and post-training.  $\Delta$  = difference. Values are the means  $\pm$  SD. EUH = euhydrated; DEH = dehydrated; Cond = condition (2 vs. 4%); Hyd = hydration (EUH vs. DEH); Training = pre vs. post. Only the significant effects are reported.

### 3.5. Exercise Duration, Distance and Intensity during the Fixed-Intensity Exercise Bout during the Testing Sessions

Exercise duration ( $129.4 \pm 16.9$  vs.  $63.8 \pm 9.5$  min) and distance completed ( $14.1 \pm 2.7$  vs.  $6.9 \pm 1.5$  km) during the fixed-intensity exercise bout were greater with the 4 than the 2% condition (both  $p = 0.0001$ ). Both decreased through training ( $p = 0.0001$  and  $0.002$ ) with a condition\*training effect ( $p = 0.02$  and  $0.04$ ). Post hoc analyzes revealed that exercise duration decreased with both conditions (2%:  $-3.5 \pm 3.7$  min,  $p = 0.01$  and 4%:  $-10.8 \pm 7.3$  min,  $p = 0.002$ ) whereas distance completed only decreased with the 4 ( $-0.8 \pm 0.7$  km,  $p = 0.007$ ) but not with the 2% condition ( $-0.2 \pm 0.4$  km,  $p = 0.11$ ). No hydration ( $p = 0.45$  and  $0.86$ ), hydration\*condition ( $p = 0.08$  and  $0.14$ ), hydration\*training ( $p = 0.07$  and  $0.13$ ) or hydration\*condition\*training ( $p = 0.15$  and  $0.13$ ) effects were observed. Overall, mean exercise intensity was  $56 \pm 2\%$   $\dot{V}O_{2\max}$  (all  $p > 0.05$ ).

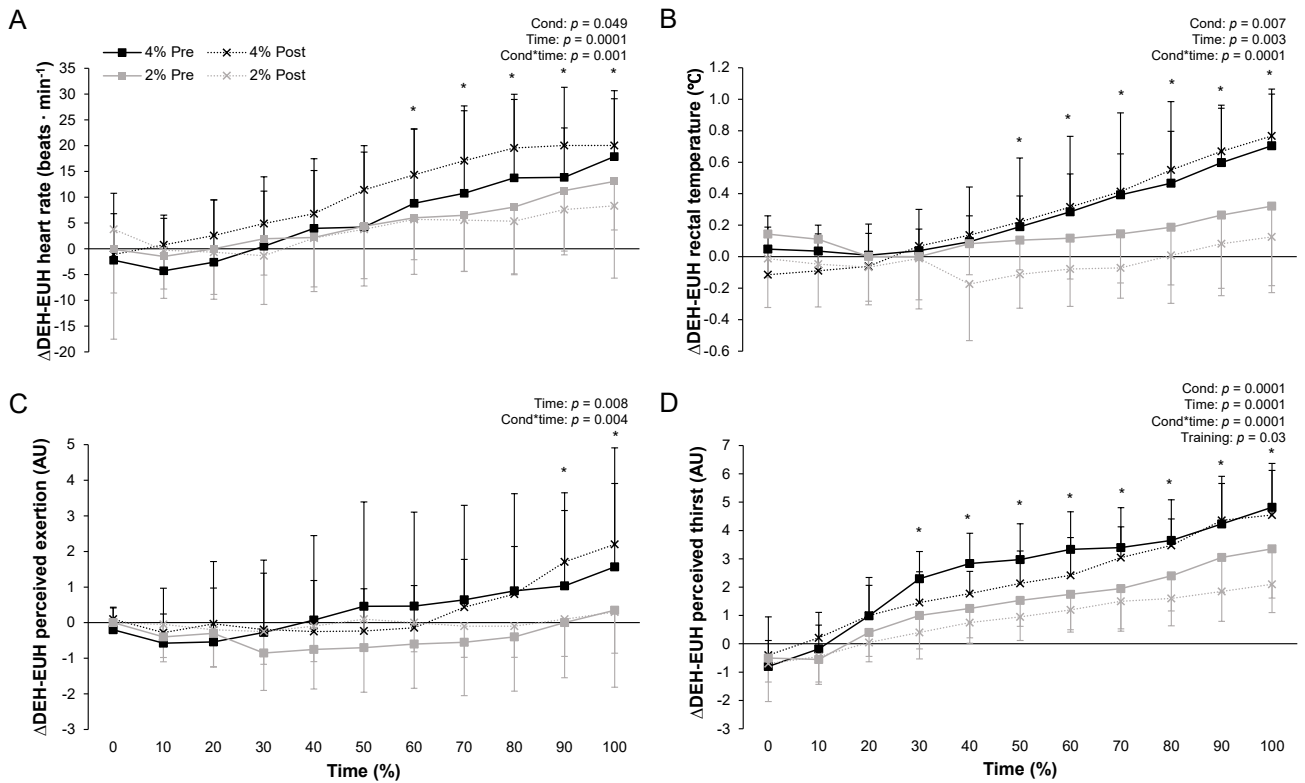
### 3.6. Physiological and Subjective Variables

#### 3.6.1. Fixed-Intensity Exercise

Figure 3 depicts heart rate (a), rectal temperature (b), perceived exertion (c) and perceived thirst (d) differences between DEH and EUH through time, pre- and post-training while replacing or not 2 or 4% body mass. Heart rate, rectal temperature and perceived exertion followed the same pattern with difference between DEH and EUH that increased through time (all  $p < 0.01$ ), with condition ( $p = 0.049$  and  $0.007$  but  $0.11$  for perceived exertion) and condition\*time (all  $p < 0.01$ ) effects. Post hoc analyzes revealed that the difference was higher with the 4 compared to the 2% condition from 60% (heart rate), 50% (rectal temperature) and 90% (perceived exertion) of the time onward. However, the negative impact of DEH upon heart rate, rectal temperature and perceived exertion remained constant even after repeated exposures as suggested by the absence of training effect ( $p = 0.57$ ,  $0.22$  and  $0.36$ ). No other effects were observed (all  $p > 0.05$ ). At the end of the fixed-intensity exercise bout mean heart rate difference between DEH and EUH reached  $11 \pm 9$  and  $19 \pm 8$  beats $\cdot$ min $^{-1}$  (both  $p < 0.01$ ) for the 2 and 4% conditions, respectively. For rectal temperature and perceived exertion, these values reached  $0.2 \pm 0.4$  ( $p = 0.10$ ) and  $0.7 \pm 0.3$  °C ( $p < 0.01$ ) and  $0 \pm 1$  ( $p = 0.46$ ) and  $2 \pm 2$  arbitrary units ( $p = 0.03$ ), respectively.

Main effects of condition and time as well as condition\*time were observed for mean difference between DEH and EUH for perceived thirst (all  $p < 0.01$ ). Post hoc analyzes revealed that the difference was higher in the 4 compared to the 2% condition from 30% of the time onward. Interestingly, the negative impact of DEH upon thirst decreased through repeated exposures as suggested by the significant training effect ( $-0.5 \pm 0.6$  arbitrary unit,  $p = 0.03$ ). However, this decrease was similar between conditions as suggested by the absence of a condition\*training effect ( $p = 0.49$ ). No other effects were observed (all  $p > 0.05$ ). At the end of the fixed-intensity

exercise bout mean difference between DEH and EUH reached  $3 \pm 1$  and  $5 \pm 1$  arbitrary units (both  $p < 0.01$ ) for the 2 and 4% conditions.



**Figure 3.** Differences between DEH and EUH during the fixed-intensity exercise periods for heart rate (A), rectal temperature (B), perceived exertion (C) and perceived thirst (D) through exercise time, while replacing or not 2 or 4% body mass losses, pre- and post-training.  $\Delta$  = difference. Values are the means  $\pm$  SD. EUH = euhydrated; DEH = dehydrated; Cond = condition (2 vs. 4%); Training = pre vs. post; Time = % of the fixed-intensity exercise completed. Only the significant effects are reported. \*  $p < 0.05$  2 vs. 4%.

### 3.6.2. The 12 min Time-Trial

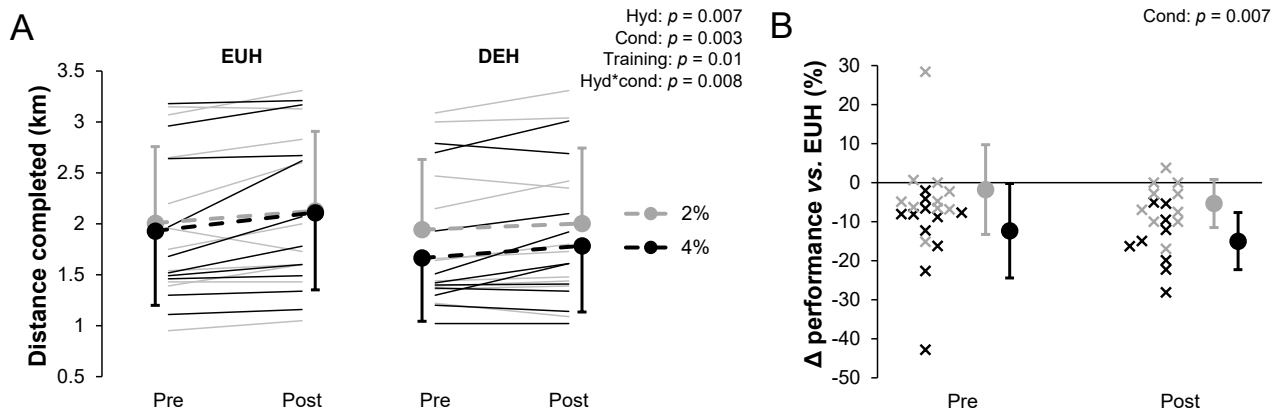
Mean heart rate maintained during the time-trial was higher with DEH compared to EUH ( $181 \pm 10$  vs.  $177 \pm 16$  beats $\cdot$ min $^{-1}$ ,  $p = 0.045$ ) with condition ( $p = 0.051$ ) but no training ( $p = 0.16$ ) or other interaction effects (all  $p > 0.05$ ). Mean rectal temperature was higher with DEH compared to EUH ( $39.5 \pm 0.5$  vs.  $39.0 \pm 0.4$   $^{\circ}$ C,  $p = 0.0001$ ) with condition ( $p = 0.0001$ ), training (decrease of  $0.1 \pm 0.3$   $^{\circ}$ C,  $p = 0.02$ ) and hydration\*condition ( $p = 0.0001$ ) effects. Post hoc analyzes revealed that values were higher with DEH compared to EUH ( $\Delta$ DEH-EUH: 2%:  $0.2 \pm 0.5$  and 4%:  $0.7 \pm 0.3$   $^{\circ}$ C), with higher values at 4% in both, EUH and DEH (all  $p < 0.05$ ).

Mean perceived exertion and thirst followed the same pattern, with higher values in DEH compared to EUH (perceived exertion:  $16 \pm 2$  vs.  $15 \pm 2$  arbitrary units,  $p = 0.02$  and thirst:  $8 \pm 2$  vs.  $4 \pm 2$  arbitrary units,  $p = 0.0001$ ), with condition ( $p = 0.01$  and  $0.002$ ) and hydration\*condition ( $p = 0.007$  and  $0.0001$ ), but no training ( $p = 0.26$  and  $0.66$ ), hydration\*training ( $p = 0.32$  and  $0.38$ ), condition\*training

( $p = 0.65$  and  $0.47$ ) or hydration\*condition\*training ( $p = 0.52$  and  $0.07$ ) effects. Post hoc analyzes revealed that perceived exertion was only higher with 4% DEH ( $p = 0.004$ ) but not 2% DEH ( $p = 0.23$ ) compared to EUH, and that no condition effect was present in EUH ( $p = 0.15$ ). Perceived thirst was higher with DEH compared to EUH at 2 and 4% ( $p < 0.01$ ), without condition effect with EUH ( $p = 0.13$ ).

### 3.7. Endurance Performance

The total mean distance completed was  $2.01 \pm 0.75$  (EUH pre),  $1.94 \pm 0.69$  (DEH pre),  $2.13 \pm 0.78$  (EUH post), and  $2.01 \pm 0.74$  km (DEH post) for the 2% condition and  $1.93 \pm 0.73$ ,  $1.66 \pm 0.62$ ,  $2.11 \pm 0.76$ , and  $1.79 \pm 0.65$  km, respectively, for the 4% condition (Figure 4a). There were hydration, condition, training, and hydration\*condition effects (all  $p < 0.05$ ). Post hoc analyzes revealed that the distance completed was significantly lower in 4% DEH compared to 4% EUH ( $-0.30 \pm 0.27$  km,  $p = 0.01$ ,  $-13.6\%$ , 95% CI  $[-20.1$  to  $-7.2\%]$ ) but not with 2% DEH compared to 2% EUH ( $-0.09 \pm 0.15$  km,  $p = 0.052$ ,  $-3.5\%$ , 95% CI  $[-9.0$  to  $1.9\%]$ ). Condition effect was only present for DEH ( $p = 0.008$ ) but not EUH ( $p = 0.21$ ). No hydration\*condition\*training effect was observed ( $p = 0.98$ ). The distance completed increased similarly throughout training for DEH and EUH for the 2 (EUH:  $0.12 \pm 0.18$  and DEH:  $0.06 \pm 0.13$  km) and the 4% condition (EUH:  $0.18 \pm 0.21$  and DEH:  $0.12 \pm 0.18$  km) as suggested by the absence of condition\*training ( $p = 0.25$ ) and hydration\*training ( $p = 0.16$ ) effects (Figure 4a). The distance completed was  $1.8 \pm 11.5\%$  (95% CI:  $-10$  to  $6.5\%$ ) lower during the 2% DEH pre than the 2% EUH pre and  $5.3 \pm 6.1\%$  (95% CI:  $-9.7$  to  $-0.9\%$ ) lower in the 2% DEH post compared to the 2% EUH post. For the 4% condition, these values reached  $12.3 \pm 12.1\%$  (95% CI:  $-20.9$  to  $-3.7\%$ ) and  $15.0 \pm 7.3\%$  (95% CI:  $-20.2$  to  $-9.7\%$ ), respectively, with condition ( $p = 0.007$ ) but not training ( $p = 0.18$ ) or condition\*training ( $p = 0.83$ ) effects (Figure 4b).



**Figure 4.** Distance completed during the 12 min time-trial (A) and percent performance difference (B) while replacing or not 2 or 4% body mass losses, pre- and post-training.  $\Delta$  = difference. Values are the means  $\pm$  SD. EUH = euhydrated; DEH = dehydrated; Cond = condition (2 vs. 4%); Hyd = hydration (EUH vs. DEH); Training = pre vs. post. Only the significant effects are reported.



#### 4. Discussion

The aims of this study were to (1) compare the impact of low (i.e., 2% body mass) and moderate (i.e., 4% body mass) exercise-induced hypohydration to euhydration on endurance performance while not being accustomed to hypohydration and later, after several training sessions; (2) verify the impact that repeated acute exposures to these exercise-induced hypohydration levels have on endurance performance, compared with repeated exposures to euhydration. Our results showed that, prior to habituation to the effect of hypohydration, low and moderate exercise-induced hypohydration impairs endurance performance in a practical manner comparatively to a situation where euhydration is maintained, and that following habituation to exercise-induced hypohydration, the observable improvement in endurance performance is independent of whether one trains while being euhydrated or to tolerate low and moderate hypohydration levels.

##### *4.1. Impact of Low and Moderate Exercise-Induced Hypohydration Levels While Not Trained to Tolerate Their Effects*

Both, hypohydration-induced physiological and endurance performance effects have been well studied. While this has been challenged [42,43], it is frequently argued that exercise-induced hypohydration  $\geq 2\%$  of body mass impairs endurance performance [8,44,45]. Hence, it is unsurprising that our study observed an hypohydration level-related effect, with a larger reduction in endurance performance ( $\sim 14\%$ ) at 4 compared to 2% of body mass loss. While from a pure statistical point of view, endurance performance was not significantly reduced by the 2% of body mass loss, from a practical point of view, the 3.5% reduction in time-trial performance is unlikely to be trivial, as it corresponds to twice the CV of our performance test [36]. Therefore, our data support the claim that, under the current exercise scenario, hypohydration  $\geq 2\%$  of body mass impairs endurance performance in a worthwhile manner [8,44,45].

At the end of the fixed-intensity exercise bout, just before the time-trial commencement, plasma volume had decreased and plasma osmolality increased in an hypohydration level-dependent fashion, which is in line with results previously observed during cycling in the heat [1] and in a thermoneutral climate [46]. However, although the impact of hypohydration upon perceived thirst and perceived exertion as well as cardiovascular and thermal drifts were higher with the 4% condition, compared with the 2% euhydration condition, rectal temperature and perceived exertion at the end of the fixed-intensity exercise were not exacerbated by the 2% hypohydration condition. Such an observation has been previously reported [1,47,48] and could partially explain the larger reduction in endurance performance observed with the 4 than the 2% body mass loss condition.

#### *4.2. Impact of Repeated Exposures to Low and Moderate Exercise-Induced Hypohydration Levels*

In the current study, we observed that despite the distance completed during the 12 min time-trial was lower with DEH, it increased relatively similarly through training within the 2 and 4% hydration conditions and this, both with EUH and DEH. This indicates that a training effect was responsible for the improvement in time-trial performance during post-testing and that consequently no adaptations to hypohydration developed with DEH that participants may have specifically benefited from during the training block conducted in a hypohydration state. Moreover, it implies that deliberate repeated exposures to hypohydration over time during exercise should not compromise the ability to benefit from the adaptations necessary to improve time-trial performance. Finally, our results indicate that undergoing repeated exposures to exercise-induced moderate levels of hypohydration is unlikely to provide any performance advantage during exercise conducted at a low hypohydration level.

Several studies [19,31–34] have investigated the impact of training while replacing or not fluid during a heat acclimation protocol and their findings generally show that the training-induced improvement in exercise performance is independent of the hydration status maintained during heat acclimation. These findings cannot be interpreted to suggest that training-induced habituation to hypohydration is, or is not possible, as baseline and post acclimation differences in exercise performance while euhydrated and hypohydrated were not assessed.

Contrary to Fleming and James [18], our results do not support the idea that habituation to hypohydration attenuates the initial decline in performance associated with being unfamiliar to a particular hypohydration level. Our observation is nevertheless similar to the one made by Adolph [11] who concluded more than 70 years ago that exercise performance does not respond more favorably after than before repeated exposures to hypohydration levels of 5–6% of body mass. Why our results differ from those of Fleming and James [18] can possibly be attributed to methodological differences. Our participants exercised at 40 °C whereas those in Fleming and James [18] study exercised at 22 °C. It is not impossible that habituation to hypohydration may develop more easily during training conditions associated with less physiological strain or be easier to detect during time-trials conducted in a thermoneutral climate. Between pre- and post-testing sessions our subjects were trained to tolerate hypohydration for 624 (i.e., 10 h), compared to 240 min (i.e., 4 h) for Fleming and James [18]. Maybe that habituation to hypohydration develops only over a precise temporal scale shorter than the one we tested. Fleming and James [18] used a combination of 24 h of fluid deprivation followed by a bout of exercise without fluid access to manipulate hypohydration state. It cannot be discarded that the time spent hypohydrated outside the training periods with low fluid intake is a major catalyst of the training-

induced habituation to hypohydration. Notwithstanding the observations by Fleming and James [18], it is important to note that our study included a control, euhydrated group. If the goal is to understand whether humans can adapt to exercise-induced hypohydration while repeatedly exposed to its effect, this is essential. In fact, with the Fleming and James [18] protocol, it cannot be discerned clearly whether the impact on exercise performance is due to the passing of time (training effect) or related to an habituation to hypohydration. Indeed, the possibility that Fleming and James [18] would have come to the same observation had their subjects trained only with euhydration cannot be discarded.

The absence of an habituation effect to repeated training-induced hypohydration exposures upon endurance performance correlates with the lack of effect we observed upon plasma volume, plasma osmolality, rectal temperature, heart rate and perceived exertion. Contrary to Fleming and James [18], we did not observe any attenuation of the negative impact of hypohydration upon perceived exertion. This could potentially explain why we did not observe an attenuation in hypohydration-induced decrements in performance after repeated exposures to hypohydration. In fact, perceived exertion is a pivotal component of endurance performance [49,50]. Perceived thirst is the only outcome that has been observed to be reduced after repeated exposures to hypohydration. This is the first study to report such an observation in the current research context; however, a recent study has reported a moderate reduction in perceived thirst after heat acclimation with *ad libitum* fluid intake [51]. Surprisingly, perceived thirst was reduced while the magnitude of change in plasma volume and plasma osmolality during exercise remained similar through training. However, such findings need to be interpreted carefully given that the magnitude of the reduction in thirst (0.5 arbitrary units) was low and, therefore, of little practical importance.

The results of the present study must be interpreted keeping the following limitations in mind. First, the 12 min time-trial was performed immediately after the fixed-intensity exercise bout aiming to manipulate the participants' hydration state. Training times to achieve 2 and 4% hypohydration were lower at post- than pre-testing. Therefore, it cannot be excluded that this may have contributed to improve time-trial performance post-testing. Certainly, however, this design increases the ecological validity of our findings. Our results apply only to non-heat-acclimated physically active participants, mainly men, training in hot temperatures. Whether the current results apply equally to women is unknown. Indeed, some evidence suggests that sex-based differences exist in hypohydration-induced thermoregulatory and cardiac strain [52]. Outside the testing periods, participants were trained to habituate to hypohydration for only a period of 2 weeks, or 8 training sessions (total of 624 min). Whether a shorter or longer training time would change the outcome is unknown.

## 5. Conclusions

Our results show that (1) acute exposures to low and moderate exercise-induced hypohydration while untrained to tolerate the hypohydration effect impairs endurance performance in the heat and; (2) these effects do not appear to be diminished nor exacerbated after 624 min (i.e., 10 h) or a total of 8 repeated exposures to low and moderate dehydration. These results have implications not only for athletes but also for individuals frequently called upon to move to and perform in hot environments where access to water is restricted, predisposing them to hypohydration. More specifically, they suggest that individuals who repeatedly expose themselves to low and moderate hypohydration levels should not expect an attenuation of the detrimental effects of dehydration on their performance.

**Author Contributions:** Conceptualization, E.D.B.G.; formal analysis, T.A.D. and E.D.B.G.; funding acquisition, E.D.B.G.; investigation, N.D., D.J., M.L.-L., M.P.-B., P.C., I.L.S. and E.C.; methodology, E.D.B.G.; project administration, E.D.B.G.; visualization, T.A.D.; writing—original draft, T.A.D.; writing—review and editing, T.A.D. and E.D.B.G. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This project was made possible through a research grant (# W7714-196896/001/SV) provided by the Canadian Government (Innovation for Defence Excellence and Security (IDEaS)).

**Institutional Review Board Statement:** This study was conducted according to the guidelines of the Declaration of Helsinki, and approved by the Institutional Review Board (or Ethics Committee) of the CIUSSS Estrie-CHUS Ethics Committee (protocol code #2019-3081, date of approval: 2019).

**Informed Consent Statement:** Informed consent was obtained from all subjects involved in this study.

**Data Availability Statement:** The data will be made available from the corresponding author upon reasonable request.

**Acknowledgments:** We must thank all the participants that dedicated time and efforts to the success of this project. T.A.D. is financially supported by the Fonds de Recherche du Québec-Santé (FRQS).

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

## References

1. Montain, S.J.; Coyle, E.F. Influence of graded dehydration on hyperthermia and cardiovascular drift during exercise. *J. Appl. Physiol.* **1992**, *73*, 1340–1350.
2. Sawka, M.N.; Young, A.J.; Francesconi, R.P.; Muza, S.R.; Pandolf, K.B. Thermoregulatory and blood responses during exercise at graded hypohydration levels. *J. Appl. Physiol.* **1985**, *59*, 1394–1401, doi:10.1152/jappl.1985.59.5.1394.
3. Hargreaves, M.; Dillo, P.; Angus, D.; Febbraio, M. Effect of fluid ingestion on muscle metabolism during prolonged exercise. *J. Appl. Physiol.* **1996**, *80*, 363–366.
4. Logan-Sprenger, H.M.; Heigenhauser, G.J.; Jones, G.L.; Spriet, L.L. Increase in skeletal-muscle glycogenolysis and perceived exertion with progressive dehydration during cycling in hydrated men. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* **2013**, *23*, 220–229.
5. Logan-Sprenger, H.M.; Heigenhauser, G.J.; Killian, K.J.; Spriet, L.L. Effects of dehydration during cycling on skeletal muscle metabolism in females. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2012**, *44*, 1949–1957.
6. González-Alonso, J.; Calbet, J.A.; Nielsen, B. Muscle blood flow is reduced with dehydration during prolonged exercise in humans. *J. Physiol.* **1998**, *513*, 895–905.

7. Trangmar, S.J.; Chiesa, S.T.; Stock, C.G.; Kalsi, K.K.; Secher, N.H.; González-Alonso, J. Dehydration affects cerebral blood flow but not its metabolic rate for oxygen during maximal exercise in trained humans. *J. Physiol.* **2014**, *592*, 3143–3160.
8. Chevront, S.N.; Kenefick, R.W.; Montain, S.J.; Sawka, M.N. Mechanisms of aerobic performance impairment with heat stress and dehydration. *J. Appl. Physiol.* **2010**, *109*, 1989–1995.
9. Galloway, S.; Maughan, R.J. Effects of ambient temperature on the capacity to perform prolonged cycle exercise in man. *Med. Sci. Sports Exerc.* **1997**, *29*, 1240–1249.
10. Maughan, R.J.; Otani, H.; Watson, P. Influence of relative humidity on prolonged exercise capacity in a warm environment. *Eur. J. Appl. Physiol.* **2012**, *112*, 2313–2321.
11. E. F. Adolph and Associates. *Physiology of Man in the Desert*. New York and London: Interscience Publishers, Inc. 1947; pp. xiii-357.
12. Cotter, J.D.; Thornton, S.N.; Lee, J.K.; Laursen, P.B. Are we being drowned in hydration advice? Thirsty for more? *Extrem. Physiol. Med.* **2014**, *3*, 18, doi:10.1186/2046-7648-3-18.
13. James, L.J.; Funnell, M.P.; James, R.M.; Mears, S.A. Does hypohydration really impair endurance performance? Methodological considerations for interpreting hydration research. *Sports Med.* **2019**, *49*, 103–114.
14. Merry, T.; Ainslie, P.; Cotter, J. Effects of aerobic fitness on hypohydration-induced physiological strain and exercise impairment. *Acta Physiol.* **2010**, *198*, 179–190.
15. Merry, T.L.; Ainslie, P.N.; Walker, R.; Cotter, J.D. Fitness alters fluid regulatory but not behavioural responses to hypohydrated exercise. *Physiol. Behav.* **2008**, *95*, 348–352.
16. Buskirk, E.; Iampietro, P.; Bass, D.E. Work performance after dehydration: Effects of physical conditioning and heat acclimatization. *J. Appl. Physiol.* **1958**, *12*, 189–194.
17. Sawka, M.N.; Toner, M.M.; Francesconi, R.P.; Pandolf, K.B. Hypohydration and exercise: Effects of heat acclimation, gender, and environment. *J. Appl. Physiol.* **1983**, *55*, 1147–1153.
18. Fleming, J.; James, L.J. Repeated familiarisation with hypohydration attenuates the performance decrement caused by hypohydration during treadmill running. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* **2014**, *39*, 124–129.
19. Garrett, A.; Goosens, N.; Rehrer, N.; Patterson, M.; Harrison, J.; Sammut, I.; Cotter, J. Short-term heat acclimation is effective and may be enhanced rather than impaired by dehydration. *Am. J. Hum. Biol.* **2014**, *26*, 311–320.
20. Fudge, B.W.; Easton, C.; Kingsmore, D.; Kiplamai, F.K.; Onywera, V.O.; Westerterp, K.R.; Kayser, B.; Noakes, T.D.; Pitsiladis, Y.P. Elite Kenyan endurance runners are hydrated day-to-day with ad libitum fluid intake. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2008**, *40*, 1171–1179, doi:10.1249/MSS.0b013e318169cdda.
21. Noakes, T.D. Fluid replacement during exercise. *Exerc. Sport Sci. Rev.* **1993**, *21*, 297–330.
22. Kao, W.-F.; Shyu, C.-L.; Yang, X.-W.; Hsu, T.-F.; Chen, J.-J.; Kao, W.-C.; Huang, Y.-J.; Kuo, F.-C.; Huang, C.-I.; Lee, C.-H. Athletic performance and serial weight changes during 12-and 24-h ultra-marathons. *Clin. J. Sport Med.* **2008**, *18*, 155–158.
23. Zouhal, H.; Groussard, C.; Minter, G.; Vincent, S.; Cretual, A.; Gratas-Delamarche, A.; Delamarche, P.; Noakes, T.D. Inverse relationship between percentage body weight change and finishing time in 643 forty-two-kilometre marathon runners. *Br. J. Sports Med.* **2011**, *45*, 1101–1105.
24. Zouhal, H.; Groussard, C.; Vincent, S.; Jacob, C.; Abderrahman, A.; Delamarche, P.; Gratas-Delamarche, A. Athletic performance and weight changes during the “Marathon of Sands” in athletes well-trained in endurance. *Int. J. Sports Med.* **2009**, *30*, 516–521.
25. Sharwood, K.; Collins, M.; Goedecke, J.; Wilson, G.; Noakes, T. Weight changes, medical complications, and performance during an Ironman triathlon. *Br. J. Sports Med.* **2004**, *38*, 718–724.
26. Tan, X.R.; Low, I.C.C.; Byrne, C.; Wang, R.; Lee, J.K.W. Assessment of dehydration using body mass changes of elite marathoners in the tropics. *J. Sci. Med. Sport* **2021**, *24*, 806–810.
27. Racinais, S.; Ihsan, M.; Taylor, L.; Cardinale, M.; Adami, P.E.; Alonso, J.M.; Bouscaren, N.; Buitrago, S.; Esh, C.J.; Gomez-Ezeiza, J. Hydration and cooling in elite athletes: Relationship with performance, body mass loss and body temperatures during the Doha 2019 IAAF World Athletics Championships. *Br. J. Sports Med.* **2021**, *55*, 1335–1341.
28. Burtscher, M.; Gatterer, H.; Burtscher, J.; Mairböurl, H. Extreme terrestrial environments: Life in thermal stress and hypoxia. A narrative review. *Front. Physiol.* **2018**, *9*, 572.
29. Périard, J.; Racinais, S.; Sawka, M.N. Adaptations and mechanisms of human heat acclimation: Applications for competitive athletes and sports. *Scand. J. Med. Sci. Sports* **2015**, *25*, 20–38.

30. Travers, G.; Nichols, D.; Riding, N.; González-Alonso, J.; Périard, J.D. Heat Acclimation with Controlled Heart Rate: Influence of Hydration Status. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2020**, *52*, 1815–1824, doi:10.1249/mss.0000000000002320.
31. Schleh, M.W.; Ruby, B.C.; Dumke, C.L. Short term heat acclimation reduces heat stress, but is not augmented by dehydration. *J. Therm. Biol.* **2018**, *78*, 227–234.
32. Haroutounian, A.; Amorim, F.T.; Astorino, T.A.; Khodiguian, N.; Curtiss, K.M.; Matthews, A.R.; Estrada, M.J.; Fennel, Z.; McKenna, Z.; Nava, R. Change in Exercise Performance and Markers of Acute Kidney Injury Following Heat Acclimation with Permissive Dehydration. *Nutrients* **2021**, *13*, 841.
33. Neal, R.A.; Corbett, J.; Massey, H.C.; Tipton, M.J. Effect of short-term heat acclimation with permissive dehydration on thermoregulation and temperate exercise performance. *Scand. J. Med. Sci. Sports* **2016**, *26*, 875–884.
34. Pethick, W.A.; Murray, H.J.; McFadyen, P.; Brodie, R.; Gaul, C.A.; Stellingwerff, T. Effects of hydration status during heat acclimation on plasma volume and performance. *Scand. J. Med. Sci. Sports* **2019**, *29*, 189–199.
35. American College of Sports Medicine. ACSM's exercise testing and prescription. Lippincott Williams & Wilkins: Philadelphia, USA, 2017.
36. Alvero-Cruz, J.; García, M.G.; Carnero, E. Reliability and accuracy of Cooper's test in male long distance runners. *Rev. Andal. Med. Deporte* **2017**, *10*, 60–63.
37. Gosselin, J.; Béliveau, J.; Hamel, M.; Casa, D.; Hosokawa, Y.; Morais, J.A.; Goulet, E.D. Wireless measurement of rectal temperature during exercise: Comparing an ingestible thermometric telemetric pill used as a suppository against a conventional rectal probe. *J. Therm. Biol.* **2019**, *83*, 112–118.
38. Borg, G.A. Psychophysical bases of perceived exertion. *Med. Sci. Sports Exerc.* **1982**, *14*, 377–381.
39. Goulet, E.D.; Rousseau, S.F.; Lamboley, C.R.; Plante, G.E.; Dionne, I.J. Pre-exercise hyperhydration delays dehydration and improves endurance capacity during 2 h of cycling in a temperate climate. *J. Physiol. Anthropol.* **2008**, *27*, 263–271.
40. Perreault-Briere, M.; Beliveau, J.; Jeker, D.; Deshayes, T.A.; Duran, A.; Goulet, E.D. Effect of Thirst-Driven Fluid Intake on 1 H Cycling Time-Trial Performance in Trained Endurance Athletes. *Sports* **2019**, *7*, 223.
41. Dill, D.B.; Costill, D.L. Calculation of percentage changes in volumes of blood, plasma, and red cells in dehydration. *J. Appl. Physiol.* **1974**, *37*, 247–248.
42. Goulet, E.D. Effect of exercise-induced dehydration on time-trial exercise performance: A meta-analysis. *Br. J. Sports Med.* **2011**, *45*, 1149–1156.
43. Goulet, E.D. Effect of exercise-induced dehydration on endurance performance: Evaluating the impact of exercise protocols on outcomes using a meta-analytic procedure. *Br. J. Sports Med.* **2013**, *47*, 679–686.
44. Sawka, M.N.; Burke, L.M.; Eichner, E.R.; Maughan, R.J.; Montain, S.J.; Stachenfeld, N.S. American College of Sports Medicine position stand. Exercise and fluid replacement. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2007**, *39*, 377–390, doi:10.1249/mss.0b013e31802ca597.
45. Chevront, S.; Kenefick, R. Dehydration: Physiology, assessment, and performance effects. *Compr. Physiol.* **2014**, *4*, 257–285.
46. McConell, G.; Burge, C.; Skinner, S.; Hargreaves, M. Influence of ingested fluid volume on physiological responses during prolonged exercise. *Acta Physiol. Scand.* **1997**, *160*, 149–156.
47. McConell, G.K.; Stephens, T.J.; Canny, B.J. Fluid ingestion does not influence intense 1-h exercise performance in a mild environment. *Med. Sci. Sports Exerc.* **1999**, *31*, 386–392, doi:10.1097/00005768-199903000-00006.
48. Backhouse, S.H.; Biddle, S.J.H.; Williams, C. The influence of water ingestion during prolonged exercise on affect. *Appetite* **2007**, *48*, 193–198.
49. Crewe, H.; Tucker, R.; Noakes, T.D. The rate of increase in rating of perceived exertion predicts the duration of exercise to fatigue at a fixed power output in different environmental conditions. *Eur. J. Appl. Physiol.* **2008**, *103*, 569.
50. Noakes, T.D. Rating of perceived exertion as a predictor of the duration of exercise that remains until exhaustion. *Br. J. Sports Med.* **2008**, *42*, 623–624.
51. Sekiguchi, Y.; Benjamin, C.L.; Dion, S.O.; Manning, C.N.; Struder, J.F.; Dierickx, E.E.; Morrissey, M.C.; Filep, E.M.; Casa, D.J. Changes in Hydration Factors Over the Course of Heat Acclimation in Endurance Athletes. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* **2021**, *31*, 406–411.
52. Wickham, K.A.; McCarthy, D.G.; Spriet, L.L.; Cheung, S.S. Sex differences in the physiological responses to exercise-induced dehydration: Consequences and mechanisms. *J. Appl. Physiol.* **2021**, *131*, 504–510

### **3.3. Cognitive Performance Before and Following Habituation to Exercise-Induced Hypohydration of 2 and 4% Body Mass in Physically Active Individuals**

Article publié le 22 février 2022 dans *Nutrients*.

#### 3.3.1. Résumé

Nous avons étudié l'effet d'expositions répétées à l'hypohydratation sur les performances cognitives. En utilisant un devis croisé randomisé, 10 adultes physiquement actifs ont effectué deux blocs d'entraînement de 4 semaines, l'un où ils maintenaient l'euhydratation (EUH) et l'autre où ils étaient restreints en eau (DEH) pendant la marche/course à 55 %  $\dot{V}O_{2max}$ , 40 °C. Trois séances par semaine ont été effectuées : (1) 1 heure d'exercice, (2) exercice jusqu'à ce que 2 % ou (3) 4 % de la masse corporelle ait été perdue ou remplacée. Limité à la première et à la quatrième semaine d'entraînement, un contre-la-montre de marche/course de 12 minutes a été réalisé après les périodes d'exercice de 2 et 4 %. Les tests suivants ont été effectués immédiatement après le contre-la-montre : *Trail Making Test*, tri des cartes du Wisconsin, inhibition de la réponse, temps de réaction visuelle simple et blocs de Corsi. La perte de masse corporelle a été maintenue < 1 % avec EUH et a atteint 2,7 et 4,7 % avec DEH après le contre-la-montre. À l'exception d'un pourcentage inférieur de réponses correctes (% de précision) lors du test de tri des cartes du Wisconsin ( $p < 0,05$ ) avec DEH par rapport à EUH, aucune baisse statistiquement significative des performances cognitives n'a été induite par des niveaux d'hypohydratation faibles et modérés. Par rapport à la semaine 1, aucune différence statistique dans les réponses cognitives n'a été observée après des expositions répétées à l'hypohydratation (tous les  $p > 0,05$ ). D'un point de vue pratique, les gains de performance cognitive à la suite d'une exposition répétée à l'hypohydratation étaient pour la plupart peu clairs, mais dans certaines circonstances, ils étaient plus importants que lorsque EUH était maintenu. Sur la base de la batterie de tests cognitifs utilisés dans la présente étude, nous concluons que les individus physiquement actifs soient habitués ou non à ses effets, l'hypohydratation induite par l'exercice de 2 et 4 % n'a, en général, aucun impact ou un impact incertain sur les performances cognitives immédiatement après l'exercice. Ces résultats encouragent de nouvelles recherches dans ce domaine.

**Mots clés :** déshydratation induite par l'exercice, hypohydratation, performance cognitive, fonctions exécutives



Article

# Cognitive Performance Before and Following Habituation to Exercise-Induced Hypohydration of 2 and 4% Body Mass in Physically Active Individuals

Thomas A. Deshayes <sup>1</sup>, Nicolas Daigle <sup>1</sup>, David Jeker <sup>1</sup>, Martin Lamontagne-Lacasse <sup>1</sup>, Maxime Perreault-Briere <sup>1</sup>, Pascale Claveau <sup>1</sup>, Ivan L. Simoneau <sup>3</sup>, Estelle Chamoux <sup>4</sup>, Eric D.B. Goulet <sup>1,2\*</sup>

**Citation:** Deshayes, T.A.; Daigle, N.; Jeker, D.; Lamontagne-Lacasse, M.; Perreault-Briere, M.; Claveau, P.; Simoneau, I.L.; Chamoux, E.; Goulet, E.D.B. Cognitive Performance Before and Following Habituation to Exercise-Induced Hypohydration of 2 and 4% Body Mass in Physically Active Individuals. *Nutrients* **2022**, *14*, 935. <https://doi.org/10.3390/nu14050935>

Academic Editor: William M. Adams

Received: 25 November 2021

Accepted: 18 February 2022

Published: 22 February 2022

**Publisher's Note:** MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



**Copyright:** © 2022 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

- <sup>1</sup> Faculty of Physical Activity Sciences, University of Sherbrooke, Sherbrooke, QC J1K 2R1, Canada; thomas.deshayes@usherbrooke.ca (T.A.D.); nicolas.daigle@usherbrooke.ca (N.D.); david.jeker@usherbrooke.ca (D.J.); mllacasse@yahoo.fr (M.L.-L.); maxime.perreault-briere@usherbrooke.ca (M.P.-B.); pascale.claveau2@usherbrooke.ca (P.C.)
  - <sup>2</sup> Research Center on Aging, University of Sherbrooke, Sherbrooke, QC J1H 4C4, Canada
  - <sup>3</sup> Centre de recherche et de formation par simulation, Cegep of Sherbrooke, Sherbrooke, QC J1E 4K1, Canada; drsimoneau1@gmail.com
  - <sup>4</sup> Faculty of Arts and Science, Biological sciences, Bishop's University, Sherbrooke, QC J1M 1Z7, Canada; echamoux@ubishops.ca
- \* Correspondence: eric.goulet@usherbrooke.ca

**Abstract:** We investigated the effect of repeated exposures to hypohydration upon cognitive performance. In a randomized crossover design, ten physically active adults completed two 4-week training blocks, one where they maintained euhydration (EUH) and the other where they were water-restricted (DEH) during walking/running at 55%  $\dot{V}O_{2max}$ , 40 °C. Three sessions per week were performed: (1) 1-h of exercise; (2) exercise until 2% or (3) 4% of body mass has been lost or replaced. Limited to the first and fourth training week, a 12-min walking/running time-trial was completed following the 2 and 4% exercise bouts. Trail making, Wisconsin card sort, Stop signal task, Simple visual reaction time and Corsi block-tapping tests were performed immediately following the time-trials. Body mass loss was maintained < 1% with EUH and reached 2.7 and 4.7% with DEH following the time-trials. Except for a lower percentage of correct responses (%accuracy) during the Wisconsin card sort test ( $p < 0.05$ ) with DEH compared to EUH, no statistically significant decline in cognitive performance was induced by low and moderate levels of hypohydration. Compared to week 1, no statistical differences in cognitive responses were observed after repeated exposures to hypohydration (all  $p > 0.05$ ). From a practical perspective, the gains in cognitive performance following training to DEH were mostly unclear, but under certain circumstances, were greater than when EUH was maintained. Based on the battery of cognitive tests used

in the current study, we conclude that whether physically active individuals are habituated or not to its effect, exercise-induced hypohydration of 2 and 4% has, in general, no or unclear impact on cognitive performance immediately following exercise. These results encourage further research in this area.

**Keywords:** exercise-induced dehydration, hypohydration, cognitive performance, executive functions

---

## 1. Introduction

Heat stress challenges physiological functions [1,2], increases perceived exertion and enhances overall discomfort, the combination of which can lead to an impairment in cognitive performance [3,4]. The extent of impairment appears to be influenced by the severity of heat stress, the duration of exposure, and the complexity of the task to be performed [4].

Humans have developed coping mechanisms for environmental stressors such as heat stress. Heat acclimation/acclimatization is a strategy that has been shown to mitigate, but not completely prevent, heat-induced cognitive performance decrements [5,6]. Moreover, factors associated with, and superimposed to heat stress could also potentially contribute to affect cognitive performance.

Sweat losses are accelerated by heat stress exposure and, therefore, if not adequately balanced by fluid intake, progressively lead to hypohydration. Although conflicting findings have been observed about the impact of hypohydration on cognitive performance [7,8], research shows that the effect, if any, should be relatively small and mainly observed for high-order cognitive processing (i.e. executive function) and motor coordination [7]. Notwithstanding, when present, this physiological state could potentially contribute to worsening the cognitive impairment already associated with heat stress *per se*. However, it cannot be ruled out that habituation to the impact of hypohydration might contribute to lessen its impact upon cognitive performance.

Few studies provide answers as to whether humans can adapt to repeated exposures to hypohydration. Garrett, *et al.* [9] demonstrated that exposures to low (~ 2% body mass) hypohydration levels during five consecutive days contribute to improve rather than impair some heat acclimatization-related adaptations. Nonetheless, more recently, these findings were not replicated [10-14]. On the other hand, Fleming and James [15] have shown that four exposures to a low (~ 2.5% body mass) level of hypohydration attenuate the decrease in exercise performance and perceived exertion. While Garrett, *et al.* [9] and Fleming and James [15] studies did not assess cognitive performance, they nevertheless highlight the possibility that the decline in cognitive performance associated with heat stress-induced hypohydration could be

somewhat mitigated by the habituation to the repeated effects of hypohydration.

High-order cognitive processing, including executive functions, is essential, especially when tactical and vital decisions must be taken. Indeed, individuals such as military, medical services, firefighters, and in some cases, athletes, must maintain high-level of cognitive performance while exposed to hot environments, where access to water is restricted, predisposing them to hypohydration. Therefore, understanding the factors or strategies that could help reduce the effect of hypohydration on cognitive performance under heat stressful conditions is important from a health and security standpoint [4].

Therefore, the goal of this study was to determine the extent to which low (~ 2%) and moderate (~ 4% body mass) hypohydration levels impact cognitive performance following exercise conducted in hot environment while not habituated to hypohydration, and whether repeated exposures to the effect of hypohydration over 4 weeks moderate the baseline response, compared with a situation where hypohydration is prevented during exercise. It was hypothesized that cognitive performance would be marginally but significantly attenuated by hypohydration while not habituated to its effect, but that after several training sessions with repeated exposures to hypohydration, cognitive performance would be similar whether adequate hydration is being maintained or not during exercise.

## **2. Materials and Methods**

### *2.1. Participants*

Fifteen (5 women) non-heat acclimated physically active participants [16] were initially recruited but ten (2 women) completed the study. Reasons for withdrawal were: knee injury (n = 1), fear of exercising while hypohydrated (n = 1), health problems (n = 1), lack of fitness (n = 1) and personal reason (n = 1). Women underwent cognitive assessment during the follicular phase of their menstrual cycle (first day of menstruation + the following 13 days, estimated via self-report). Before obtaining their informed written consent, each participant received explanations of the study protocol and associated risks and benefits. The CIUSSS Estrie-CHUS Ethics Committee (#2019-3081) approved all procedures.

### *2.2. Overview of This Study*

Both the experimental design of the study and the methods have already been thoroughly detailed elsewhere [17]. Therefore, the following sections will provide only a brief overview of the protocol and readers are referred to the initial publication for more details. In a randomized and crossover fashion, participants completed two 4-week training blocks (one with fluid access (EUH), one without fluid access (DEH)) interspersed by a 5-week washout period. Before each training block, baseline measurements and familiarization with the cognitive tests and exercise procedures were performed. For a given

training block, participants completed a total of 12 exercise sessions (three per week interspersed by 2 or 3 days). For a given week this included a 1-h exercise bout that always occurred first followed by two other bouts where participants exercised until 2 or 4% body mass had been lost (DEH training block) or replaced (EUH training block). Exercise sessions always occurred at the same time of the day. Cognitive functions were evaluated immediately following exercise during the first (pre) and last (post) training week of each block (testing sessions). Participants were restricted to perform physical activity and to consume sports supplements respectively 12 and 24 h prior to their arrival at the laboratory. They were required to standardize their food and fluid intake 24 h prior to their arrival at the laboratory. More specifically, participants were asked to keep a dietary log for 24 h prior to the 2 and 4% exercise sessions of the first week of each training block and then to replicate food and fluid intake before all subsequent 2 and 4% exercise sessions. Participants were also required to consume 250 mL of water 1 h before bedtime and 1 h before their arrival at the laboratory, after which they remained fast.

### 2.3. Baseline Measurements

After post-void body mass was taken (BX-300+, Atron Systems, West Caldwell, NJ, USA), height, resting blood pressure, heart rate (Welch Allyn 420 series, Skaneateles Falls, NY, USA) and body composition (DXA, Lunar Prodigy, GE Healthcare, Chicago, IL, USA) were measured. Then participants underwent a treadmill maximal oxygen consumption ( $\dot{V}O_{2max}$ ) test using an expired gas analysis system (Cosmed Quark CPET, Cosmed, Chicago, IL, USA) that had been calibrated with gases of known concentration.

### 2.4. Familiarization with Cognitive Tests

Overall participants underwent three familiarization sessions per training block. Two were performed on separate days the week prior to starting the training block. During the first, participants came to the laboratory and performed all cognitive tests twice. During the second, participants completed a 1-h walking/light running exercise bout at 55%  $\dot{V}O_{2max}$  followed by a 12-min self-paced time-trial, after which they performed all cognitive tests once. This exercise session was performed while subjects could consume (EUH) or not (DEH) water *ad libitum* (same ambient conditions as during all exercise and testing sessions). The last familiarization session was performed in the fourth week of each training block immediately following the 1-h exercise bout.

### 2.5. Exercise and Testing Sessions

After they emptied their bladder and collected a urine sample for measurement of urine specific gravity (PAL-10S, Atago, Bellevue, WA, USA) and osmolality (Micro Osmometer, Osmette, Precision Systems Inc., Natick, MA, USA), participants were nude weighted ( $\pm$  50 g, MyWeight HD-300, HBI Technologies, Phoenix, AZ, USA),

dressed themselves, installed a heart rate chest electrode (Garmin™, Olathe, KS, USA) and inserted a rectal probe (CoreTemp, HQ, Palmetto, FL, USA). They then entered the environmental chamber ( $40 \pm 0.2$  °C and  $26 \pm 2\%$  relative humidity, wind speed:  $\sim 5$  km·h<sup>-1</sup>, solar radiation:  $0$  W·m<sup>-2</sup>), and, after an equilibration period of 2 (exercise sessions only) or 10 min (testing sessions only), started walking/light running at an intensity of 55%  $\dot{V}O_{2max}$ . The required intensity was adjusted in the first 10 min of exercise, where O<sub>2</sub> consumption was continuously measured. Except for the 1-h exercise bout (2 x 30 min interspersed by 3 min rest inside the chamber), participants completed exercise/recovery cycles of 8/2 min until a sweat-induced body mass loss of either 2 or 4% was reached (DEH) or replaced (EUH). Participants were requested to drink water served at room temperature (*ad libitum* intake for the 1-h exercise bout and every 10 min to replace all the sweat and urine losses for the 2 and 4% conditions). Participants could rinse their mouths with water at any time and could pour cold water on their bodies and heads at a rate of 100 mL·h<sup>-1</sup>. After 1 h of exercise and every 30 min thereafter, energy gels (22 g of carbohydrates and 60 mg of sodium, GU Energy gel, Berkeley, CA, USA) were consumed. Heart rate, rectal temperature, perceived exertion (6-20 RPE Borg scale [18]) and thirst (1-11 scale [19]) were measured every 4 min. Only for the testing sessions, participants performed a 12 min time-trial immediately after the fixed-intensity exercise bout. No water was provided during the 12-min time-trial. Immediately following the performance test, participants remove their equipment, towed themselves, urinated, were weighted and then were transferred to a quiet room ( $\sim 23$  °C) to perform cognitive tests ( $\sim 10$  min from the end of exercise). Hypohydration level (%) was computed as the difference between pre- and post-exercise body mass (post-void) relative to pre-exercise body mass.

## 2.6. Cognitive Tests

Cognitive tasks were selected to assess executive functions and consisted in the (1) Trail-making test (TMT), (2) Wisconsin card sort test (WCST), (3) Stop signal task (SST), (4) Simple visual reaction time test (SVRT), and (5) Corsi block-tapping test (CBT). The tests were always administered in the same order. The cognitive tests (from Millisecond Test Library, Inquisit, Millisecond software, Seattle, WA, USA) were performed using a desktop computer (Windows® 10) with a 19" diagonal screen (Dell, model 1907FP) and with participants wearing headphones (model MDR-ZX110, Sony Corporation of America, NY, USA) when needed in a closed and quiet room.

### 2.6.1. Trail Making Test

The TMT is a test of visual attention and task switching that provides information about the speed of processing, visual search speed, scanning, mental flexibility, and executive function [20]. It consists of two parts: A (psychomotor speed) and B (switching

abilities). In the former, participants are asked to connect in a sequential order 25 points (black circled numbers) presented on a white screen background as quickly as possible using the mouse. In the latter, participants have to connect the points in an alternative order between numbers and letters (e.g., 1, A, 2, B, 3, C, until 13, L). Feedback is automatically provided when an error is made (a yellow halo is presented over the correct circle). A practice block was always performed before the start. Total completion time was taken as the measure of performance.

#### 2.6.2. Wisconsin Card Sort Test

The WCST is a test of set-shifting that provides information about the speed of processing and mental flexibility [21]. A card is presented at the top of the white screen background. Four different cards are presented at the bottom of the screen. Participants are asked to classify the cards presented at the top of the screen (2 decks of 24 cards, maximum number of trials = 48) accordingly to 3 different criteria: color of cards' symbols (green, yellow, blue, red), shape of the symbols (triangle, plus, circle, star), or the number of shapes (1 to 4), using the mouse. The only feedback that is provided to the participants is whether the classification is correct or wrong. An unannounced rule change occurs after 10 consecutive correct responses for a category. Performance was taken as the sum of perseverative errors adjusted relative to the total number of trials (% perseverative errors). Accuracy (% correct responses) was also computed as follow:  $(\text{total number of correct responses} / \text{total number of trials}) \times 100$ .

#### 2.6.3. Stop Signal Task

The SST test measures response inhibition that provides information about impulse control (inhibition ability) [22,23]. Participants are asked to respond to the direction of a white circled arrow (right or left; half the arrows in each trial pointed left) presented on a black screen background by pressing the appropriate key on the keyboard. If an audio tone is heard (no go signal), participants have to inhibit their response. The stop signal response time (SSRT) is an estimate of the response time of the participants to the inhibition of the response, i.e., the time it takes to react to the stop signal by inhibiting the response to the go signal. A longer SSRT indicates more difficulty to stop the go-process and *vice versa*. The SSRT was estimated by the mean method. The test included 64 trials, of which 16 contained a tone. A tracking procedure was used to obtain a broad range of stop-signal delays. The latter ranged from 50 to 1150 ms, with adjustment steps of 50 ms depending on the performance. A practice block was always performed before the start. As highlighted by Verbruggen et al., (2008) [24], for participants who inhibit significantly more or less than 50% of the time the mean method to calculate SSRT should not be used. In such a situation, data were excluded from the analyses.

#### 2.6.4. Simple Visual Reaction Time Test

The SVRT test measures the reaction time of participants to respond to a visual target. A fixed black cross is placed on the center of a white screen background. A visual stimulus covers the fixed cross after varying time intervals. The participants have to press the spacebar as soon as the target stimulus appears. Two blocks of 20 trials were completed. The mean reaction time was taken as the measure of performance.

#### 2.6.5. Corsi Block-Tapping Test

The CBT measures the visuospatial short-term working memory, which represents the capacity of storage and temporary management of information [25,26]. Participants are presented with nine blue boxes scattered across the black screen background. The boxes are lighted in yellow in a predetermined order. Afterward, the participants must click on the boxes in the same order they are lit on using the mouse. The length of the sequence starts with 2 and can go up to 9 lit boxes. Participants are provided with 2 trials for each sequence; at least one needs to be completed successfully otherwise the test ends. A practice block was always performed before the start. The length of the last correctly recalled sequence was measured and taken as the measure of performance.

#### 2.7. Statistical Analyses

All statistical analyses were performed using IBM SPSS Statistics software (version 26, New York, USA). Shapiro-Wilk tests were used to analyze data normality. Dependent t-tests or Wilcoxon signed-rank tests were used to compare the characteristics of the participants before each training blocks. Three-factors (hydration\*condition\*training) repeated measures ANOVAs and, for variables with missing cases linear mixed models (with maximum likelihood estimation and scale identity), were used to determine the impact of, and interaction effect between, hydration (EUH *vs.* DEH), conditions (2 *vs.* 4%) and training (pre *vs.* post). Data are presented as mean  $\pm$  standard deviation (SD). Statistical significance was set at  $p \leq 0.05$ . This study reports cognitive-related data collected during a larger scale study whose goals were to determine the physiological, perceptual and performance adaptations associated with repeated exposures to exercise-induced hypohydration. Because cognitive-related data were taken as secondary outcomes, no *a priori* power analysis had been performed. However, *a posteriori* power analysis based on a within participant standard deviation of 37.2 ms for repeated measurements on the simple visual reaction time test reveals a probability of 80% that the study would detect a hydration condition effect at a two-sided 0.05 significance level, if the true difference between interventions is 56.17 ms [27].

To better understand and interpret the results from a practical perspective, data from the second to the third familiarization were used to determine the day-to-day variability for each cognitive test.

The practical significance of findings was then determined using the second-generation  $p$ -value technique as previously described [28].

To obtain the day-to-day variability for each cognitive test, first, the performance data collected during the second familiarization session were subtracted from that obtained during the third familiarization session and then, the means and associated standard deviations were computed. The smallest worthwhile change in performance for any given cognitive tests was taken as the product of the day-to-day SD  $\times$  0.2 (small effect size, [29]). A 95% confidence interval (CI) (i.e.  $[-0.2 \times \text{SD}$  to  $+0.2 \times \text{SD}]$ ) was then built. If the statistically derived CI fell completely within this CI, the effect was considered trivial. If it fell completely outside this CI, the data were considered to support a worthwhile negative or positive effect. If the CIs overlapped, the probabilities that the true effect could be declared practically positive, negative or trivial were determined, according to the % overlap. Results were interpreted according to the following descriptors: <1%, almost certainly not; 1-5%, very unlikely; 5-25%, unlikely; 25-75%, possibly; 75-95%, likely; 95-99%, very likely; >99%, almost certainly [30,31]. Worthwhile negative or positive changes in cognitive performance were considered to be outside  $[-1.08$  to  $1.08\%$ ],  $[-1.36$  to  $1.36\%$ ],  $[-5.08$  to  $5.08$  ms],  $[-0.38$  to  $0.38]$  and  $[-2.33$  to  $2.33$  sec] respectively for the % perseverative errors during the WCST, %accuracy during the WCST, mean reaction time during the SVRT, length of the last correctly recalled sequence during the CBT and the total completion time during the TMT. Such analysis could not be performed for the SST due to computer-related problems.

### 3. Results

#### 3.1. Participants Characteristics at Baseline and Prior to Starting the Second Training Block

At baseline, mean age, height, body mass, body mass index, maximal oxygen consumption, maximal heart rate, fat-free mass and fat mass were respectively of  $23 \pm 5$  years,  $176 \pm 8$  cm,  $71.6 \pm 11.8$  kg,  $23.1 \pm 2.9$  kg·m<sup>-2</sup>,  $55 \pm 7$  mL·kg<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>,  $193 \pm 7$  beats·min<sup>-1</sup>,  $82.4 \pm 6.5\%$ , and  $14.0 \pm 6.6\%$ . Comparison of baseline values show that body mass ( $\Delta_{\text{block2-block1}} = -0.4 \pm 1.2$  kg), body mass index ( $\Delta = -0.15 \pm 0.4$  kg·m<sup>-2</sup>),  $\dot{V}O_{2\text{max}}$  ( $\Delta = -1.0 \pm 2.6$  mL·kg<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>), fat-free mass ( $\Delta = -0.15 \pm 1.8\%$ ), and fat mass ( $\Delta = 0.2 \pm 1.6\%$ ) were not significantly different before the first and second training block (all  $p > 0.05$ ).

#### 3.2. Baseline Hydration Status

Participants started all testing sessions in a well-hydrated state. Indeed, as demonstrated in Table 1, plasma natremia and urine specific gravity and osmolality were within the physiological range and did not differ among trials. However, there was a hydration (both  $p < 0.01$ ) effect for pre-exercise urine specific gravity and urine osmolality, with no other main or interaction effects (all  $p > 0.05$ ). Moreover, pre-exercise body mass (maximum difference across all trials: 0.8 kg, corresponding to < 1% of body mass variation, data not shown,) and plasma osmolality (average of  $288.5 \pm 5.0$  mOsm·kg<sup>-1</sup>,



data not shown) did not differ among trials and were suggestive of adequate hydration.

**Table 1.** Pre-exercise plasma natremia, urine osmolality and specific gravity data between the euhydrated and dehydrated state through conditions and training.

Variables	First Testing Session		Second Testing Session	
	2% condition	4% condition	2% condition	4% condition
<b>Euhydrated</b>				
Plasma natremia (mmol·L <sup>-1</sup> )	136.4 ± 3.0	137.8 ± 1.7	135.8 ± 4.4	137.8 ± 1.9
Urine osmolality (mOsm·kg <sup>-1</sup> )	573 ± 374	589 ± 374	675 ± 376	503 ± 363
Urine specific gravity (g·mL <sup>-1</sup> )	1.014 ± 0.010	1.016 ± 0.011	1.019 ± 0.009	1.014 ± 0.010
<b>Dehydrated</b>				
Plasma natremia (mmol·L <sup>-1</sup> )	137.4 ± 2.9	138.4 ± 4.3	137.4 ± 2.5	136.6 ± 3.8
Urine osmolality (mOsm·kg <sup>-1</sup> ) *	441 ± 312	339 ± 302	373 ± 324	346 ± 361
Urine specific gravity (g·mL <sup>-1</sup> ) *	1.012 ± 0.008	1.011 ± 0.009	1.010 ± 0.009	1.009 ± 0.009

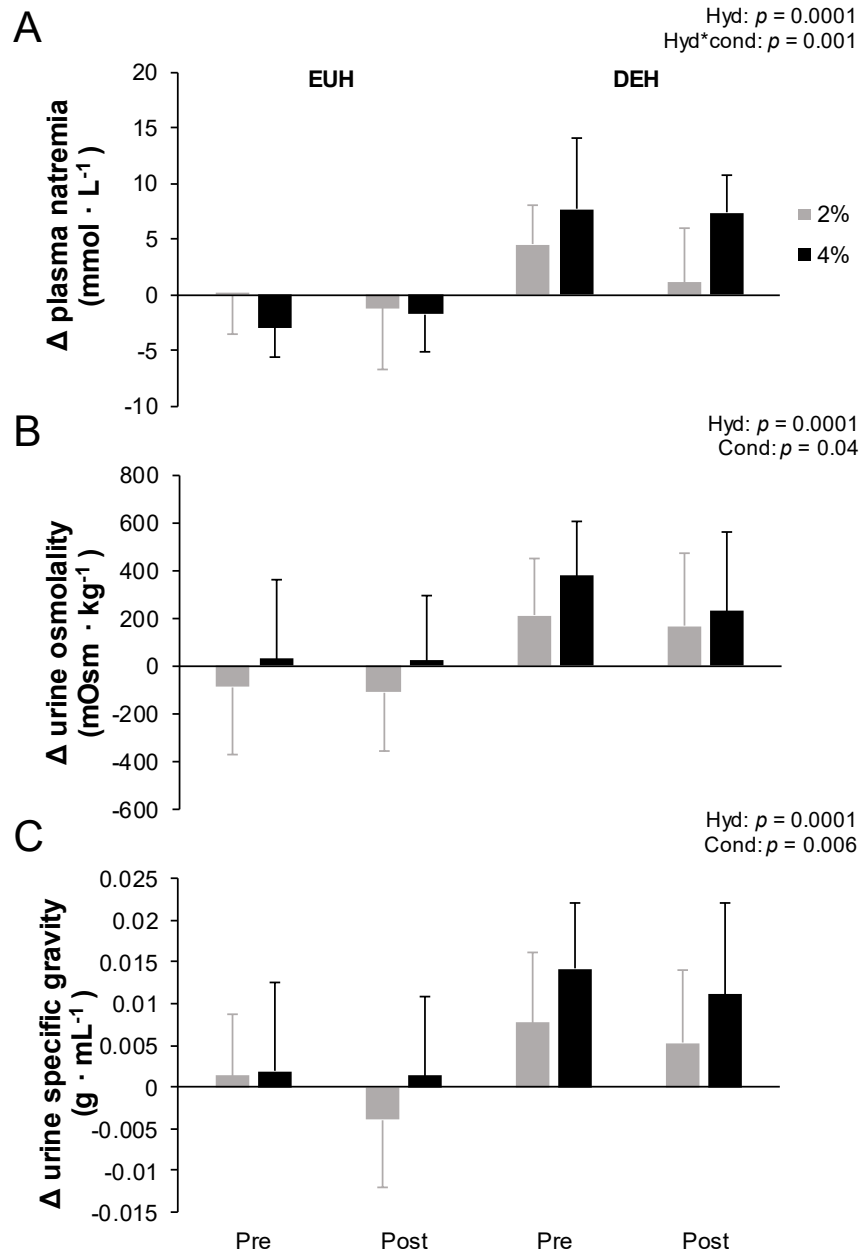
Values are means ± SD. \*:  $p \leq 0.05$  between EUH and DEH (hydration effect).

### 3.3. Exercise Duration

Total exercise duration (fixed-intensity exercise bout + 12 min self-paced time-trial) reached  $75.8 \pm 9.5$  and  $141.4 \pm 16.9$  min with the 2 and the 4% conditions, respectively ( $p = 0.0001$ ), without difference between EUH and DEH ( $p = 0.45$ ) nor hydration\*condition effect ( $p = 0.08$ ). Total exercise duration decreased through training, in both conditions, and was significantly lower during the second testing session ( $-7 \pm 4$  min,  $p = 0.0001$ ). No hydration\*condition\*training effect was observed ( $p = 0.15$ ). The overall mean exercise intensity during the fixed-intensity exercise bout was  $56 \pm 2\% \dot{V}O_{2max}$  (all  $p > 0.05$ ).

### 3.4. Fluid Balance during Exercise

At the end of the 12 min time-trial, body mass losses remained  $< 1\%$  with EUH ( $0.8 \pm 0.2\%$ ) and reached  $2.7 \pm 0.2\%$  and  $4.7 \pm 0.2\%$  with DEH with the 2 and the 4% conditions, respectively. Figure 1 depicts changes in plasma natremia from pre- to post-exercise measured at the end of the fixed-intensity exercise period (A) and urine osmolality (B) and urine specific gravity (C) measured at the end of the 12 min time-trial while replacing or not 2 or 4% body mass losses, pre- and post-training. Accordingly, plasma natremia increased more with DEH than EUH ( $p = 0.0001$ ) with hydration\*condition ( $p = 0.001$ ) but no other effects (all  $p > 0.05$ ). Post-hoc analyzes revealed that hydration effect was present for both conditions (both  $p < 0.01$ ) but that a condition effect was only present with DEH ( $p = 0.0008$ ) but not EUH ( $p = 0.17$ ). Similarly, at the end of the 12 min self-paced time-trial urine osmolality ( $250 \pm 234$  vs.  $-53 \pm 224$  mOsm·kg<sup>-1</sup> respectively) and specific gravity ( $0.010 \pm 0.008$  vs.  $0.000 \pm 0.007$  g·mL<sup>-1</sup> respectively) increased more with DEH than EUH (both  $p = 0.0001$ ), with condition ( $p = 0.04$  and  $0.006$ ) but no other main or interaction effects (all  $p > 0.05$ ).

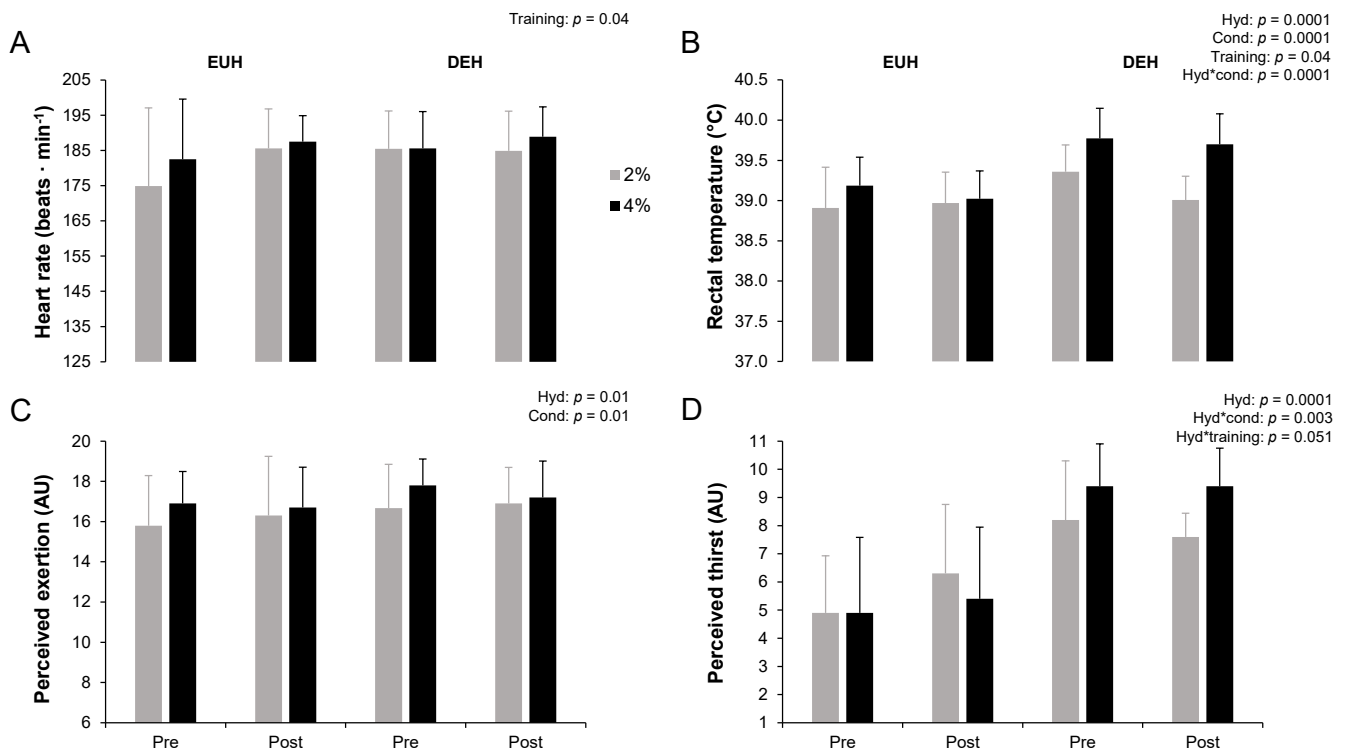


**Figure 1.** Changes from pre- to post-exercise in plasma natremia measured at the end of the fixed-intensity exercise period (**A**) and urine osmolality (**B**) and urine specific gravity (**C**) measured at the end of the 12 min time-trial while replacing or not 2 or 4% body mass losses, pre- and post-training. Values are means  $\pm$  SD.  $\Delta$  = difference. EUH = euhydrated; DEH = dehydrated; Cond = condition (2 vs. 4%); Hyd = hydration (EUH vs. DEH). Only the significant effects are reported.

### 3.5. End of Performance Physiological and Perceptual Responses

Physiological and perceptual responses have been published elsewhere [17]. The overall mean exercise heart rate maintained during the 12 min time-trial was  $179 \pm 14$  beats·min<sup>-1</sup>, representing  $93 \pm 7\%$  of maximal heart rate. End of performance rectal temperature, perceived exertion and perceived thirst (all  $p < 0.05$ ) but not heart rate ( $p = 0.11$ ) were significantly higher with DEH compared to EUH

(Figure 2). Hydration\*condition effects were observed for rectal temperature and perceived thirst. Post-hoc analyzes revealed that condition effect was present with EUH ( $p = 0.03$ ) and DEH ( $p = 0.0001$ ) for rectal temperature but only with DEH for perceived thirst ( $p = 0.001$ ). Values were higher with DEH compared to EUH in the 2% condition (rectal temperature:  $+0.2 \pm 0.4$  °C,  $p = 0.005$ ; perceived thirst:  $+2 \pm 3$ ,  $p = 0.0001$ ) as well as in the 4% condition (rectal temperature:  $+0.6 \pm 0.3$  °C; perceived thirst:  $+4 \pm 2$ , both  $p = 0.0001$ ). End of performance heart rate ( $+4 \pm 13$  beats·min<sup>-1</sup>) and rectal temperature ( $-0.1 \pm 0.3$  °C) respectively increased and decreased through training (both  $p = 0.04$ ), similarly between EUH and DEH as suggested by the absence of hydration\*training effect ( $p = 0.16$  and  $0.17$  respectively). No hydration\*training effect was observed for perceived thirst ( $p = 0.051$ ). However, post-hoc analyzes revealed that thirst perception was higher with DEH compared to EUH pre and post training ( $p < 0.05$ ). Interestingly, perceived thirst at the end of performance increased through training with EUH ( $+1 \pm 2$ ,  $p = 0.048$ ) but remained stable with DEH ( $-0.3 \pm 2$ ,  $p = 0.50$ ). No other effects were observed (all  $p > 0.05$ ).



**Figure 2.** Heart rate (A), rectal temperature (B), perceived exertion (C) and perceived thirst (D) at the end of the 12 min time-trial while replacing or not 2 or 4% body mass losses, pre- and post-training. Values are means  $\pm$  SD. EUH = euhydrated; DEH = dehydrated; Cond = condition (2 vs. 4%); Hyd = hydration (EUH vs. DEH); Training (pre vs post); AU: arbitrary units. Only the significant effects are reported.

### 3.6. Cognitive Performance

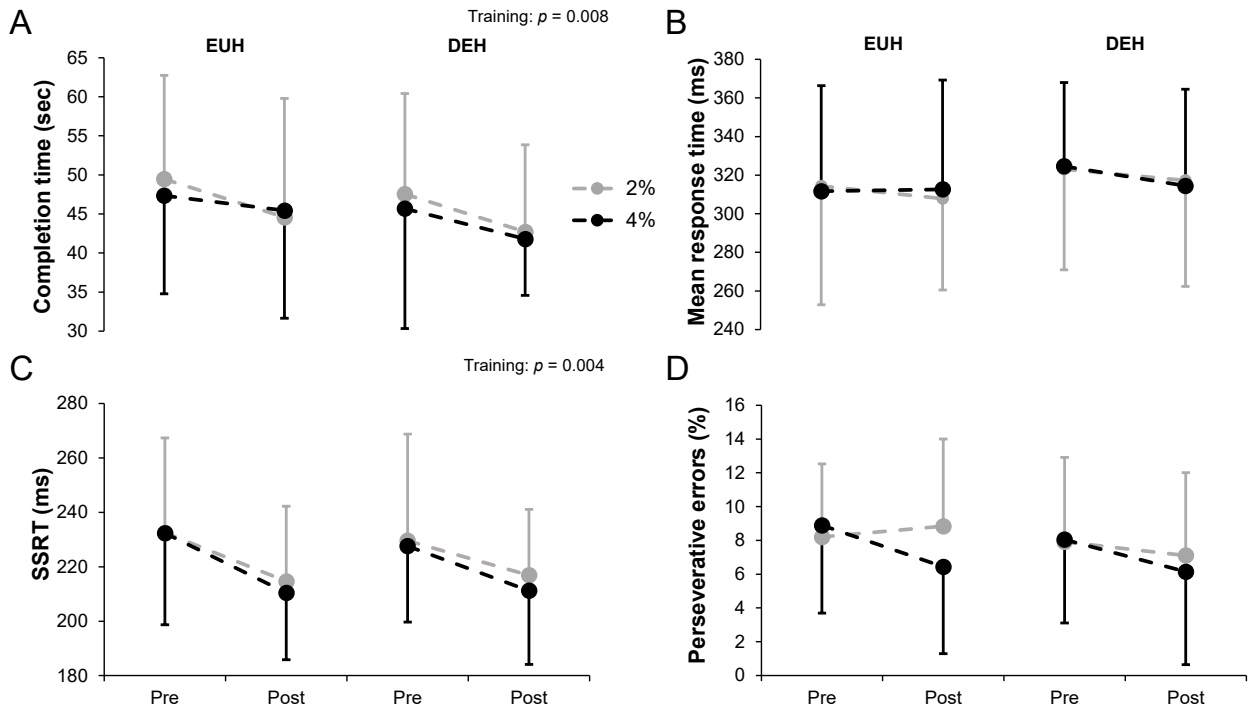
Overall, cognitive performance was not affected by low and moderate level of hypohydration. Compared to baseline, no differences were observed after repeated exposures to hypohydration. The mean duration to complete the five cognitive tests remained constant throughout trials ( $23 \pm 1$  min, all  $p > 0.05$ ).

Figure 3 shows the changes in cognitive performance for the TMT (A), SVRT (B), SST (C) and WCST (D) tests while replacing or not 2 or 4% body mass losses, pre- and post-training. On average, participants completed the TMT with a mean duration time of  $46.71 \pm 13.35$  sec with EUH and  $44.39 \pm 11.67$  sec with DEH ( $p = 0.25$ ), without condition ( $p = 0.73$ ) nor hydration\*condition ( $p = 0.97$ ) effects. The average time to complete the TMT decreased with training ( $p = 0.008$ ), without hydration\*training ( $p = 0.56$ ) nor condition\*training ( $p = 0.74$ ) effects. No hydration\*condition\*training was observed ( $p = 0.54$ ). While no hydration effect was observed overall, interpreting data from part A and B depicts a different conclusion (data not shown). No main, neither interaction effects (all  $p > 0.05$ ) were observed in part A (training,  $p = 0.08$ ). However, the time to complete the part B was significantly lower with DEH compared to EUH ( $22.32 \pm 6.74$  vs.  $25.05 \pm 8.41$  sec,  $p = 0.02$ ), with training ( $p = 0.007$ ) but no other effects (all  $p > 0.05$ ). For the SVRT, a slightly but non significantly longer mean reaction time was observed with DEH compared to EUH ( $319.8 \pm 48.5$  vs.  $311.6 \pm 53.2$  ms,  $p = 0.09$ ). No other main nor interaction effects were observed (all  $p > 0.05$ ). The mean SSRT during the SST slightly decreased with training ( $p = 0.004$ ) from  $230.5 \pm 32.8$  (pre) to  $213.4 \pm 24.7$  ms (post), without hydration ( $p = 0.70$ ), condition ( $p = 0.56$ ) nor any interaction effects (all  $p > 0.05$ ).

No main nor interaction effects (all  $p > 0.05$ ) were observed for percent perseverative errors during the WCST (training,  $p = 0.07$ ). However, hydration ( $p = 0.001$ ) and hydration\*training ( $p = 0.03$ ), but no other main or interaction effects (all  $p > 0.05$ ) were observed for accuracy (percent correct responses, data not shown). Post-hoc analyzes revealed that hydration effect was only observed in post (EUH:  $79 \pm 18$  vs. DEH:  $72 \pm 26\%$ ,  $p = 0.004$ ) but not in pre (EUH:  $76 \pm 16$  vs. DEH:  $75 \pm 20\%$ ,  $p = 0.38$ ), without training effect neither with EUH nor with DEH (both  $p > 0.05$ ). For the CBT (data not shown), the lengths of the last correctly recalled sequence were  $7.3 \pm 0.7$  (EUH pre),  $7.2 \pm 0.9$  (DEH pre),  $7.3 \pm 0.7$  (EUH post) and  $7.3 \pm 1.1$  (DEH post) with the 2% condition. These values reached  $7.3 \pm 0.8$ ,  $7.4 \pm 1.1$ ,  $7.3 \pm 0.9$  and  $7.4 \pm 0.8$  respectively with the 4% condition. No main as well as no interaction effects were observed (all  $p > 0.05$ ).

Table 2. reports the observations derived from the second-generation  $p$ -value analyses. Regarding the training effect (i.e. change in cognitive performance from pre- to post- training with the 2 or the 4% hypohydration), a 64% chance of worthwhile effect with DEH compared to EUH was observed in the 4% condition for the SVRT. Similarly, a 54% (2% condition) and 57% (4% condition) chance of worthwhile effect with DEH compared to EUH was observed for the WCST and the TMT, respectively. In other words, such results highlight that, for these tests, the gains in cognitive

performance following training to hypohydration have been observed to be possibly greater than when EUH was maintained. Conversely, regarding %accuracy during the WCST, a practical advantage with EUH has been observed, with improved %accuracy from pre- to post-training with EUH training (2%: 69%; 4%: 100%) while it decreased with DEH. Other effects were trivial or unclear.



**Figure 3.** Changes in the total time to complete the Trail Making Test (A), mean response time during the simple visual reaction time (B), mean stop signal response time during the stop signal task (C) and perseverative errors during the Wisconsin Card Sorting Test (D) while replacing or not 2 or 4% body mass losses, pre- and post-training. Values are means  $\pm$  SD. EUH = euhydrated; DEH = dehydrated; Training (pre vs post); SSRT: stop signal response time. Only the significant effects are reported.

**Table 2.** Practical analysis of the changes in cognitive performance from pre- to post- training with the 2 or the 4% condition.

Cognitive test	Condition	Conclusion*	Interpretation
WCST (% perseverative errors)	2%	Practically positive: 54% Practically negative: 23% Trivial: 23%	<b>DEH possibly beneficial</b>
	4%	Practically positive: 29% Practically negative: 43% Trivial: 28%	Unclear
WCST (%accuracy)	2%	Practically positive: 9% Practically negative: 69% Trivial: 21%	<b>EUH possibly beneficial</b>

	4%	Practically positive: 0% Practically negative: 100% Trivial: 0%	<b>EUH is almost certainly beneficial</b>
SVRT (mean reaction time in ms)	2%	Practically positive: 42% Practically negative: 44% Trivial: 14%	Unclear
	4%	Practically positive: 64% Practically negative: 11% Trivial: 24%	<b>DEH possibly beneficial</b>
CBT (length of the last correctly recalled sequence)	2%	Practically positive: 36% Practically negative: 26% Trivial: 39%	Unclear
	4%	Practically positive: 22% Practically negative: 22% Trivial: 57%	<b>DEH possibly trivial effect</b>
TMT (Total completion time in sec)	2%	Practically positive: 32% Practically negative: 33% Trivial: 35%	Unclear
	4%	Practically positive: 57% Practically negative: 23% Trivial: 20%	<b>DEH possibly beneficial</b>

EUH = euhydrated; DEH = dehydrated; \* = compared with EUH; WCST: Wisconsin Card Sort Test; SVRT: Simple Visual Reaction Time Test; CBT: Corsi Block-Tapping Test; TMT: Trail Making Test.

#### 4. Discussion

The aims of this study were to (1) determine the impact of low and moderate hypohydration levels on cognitive performance while not habituated to hypohydration and (2) whether repeated exposures to the effect of hypohydration moderate the baseline response. While previous studies were specifically designed to verify whether repeated exposures to hypohydration could lessen its negative impact upon endurance performance or physiological functions, this is the first one to investigate whether habituation to hypohydration could mitigate the potential cognitive impairment associated with hypohydration immediately following exercise. The main findings of this study were: in physically active individuals, immediately following exercise and compared with euhydration, (1) low and moderate exercise-induced hypohydration do not impair cognitive performance, (2) repeated exposure to exercise-induced hypohydration over a 4-week period do not change these outcomes from a statistical perspective, and (3) from a practical perspective, the impact of repeated exposure to exercise-induced hypohydration is mainly unclear, highlighting that more studies on this area are necessary.

Contrary to our first hypothesis, our results indicate that exercise-induced hypohydration ranging from to 2-4% of body mass

does not impair cognitive performance following exercise when unhabituated to being exposed to its multifaceted effects. Therefore, the current findings do not support the reported claim that fluid loss  $\geq 2\%$  body mass [7,32] negatively affects cognitive performance, more specifically, the executive functions, which play a critical role in the ability of a person to navigate easily through everyday life situations. We are not the first study to observe an absence of statistically significant effect of hypohydration on cognitive performance. Indeed, several previous studies [33,34], including a recent meta-analysis [8], have come to the conclusion that exercise-induced hypohydration does not lower cognitive performance, compared with when euhydration is maintained during exercise. This observation holds true irrespective of the cognitive domain being assessed [8], or when body mass loss reaches up to 4-5% [35,36].

It is frequently argued that symptoms associated with hypohydration, including but not limited to thirst, mental fatigue and impaired mood [36-38], may potentially act as a distraction and thus reduce cognitive performance [39]. In this regard, an hyperosmotic stimulus [40], and the associated triggering of the thirst response [41,42] have been previously shown to alter mood, exacerbate mental fatigue and decrease cognitive performance. We did not observe such a cognitive decrement with hypohydration in spite of the higher, and expected, natremia level and thermal (i.e., rectal temperature), cardiovascular (i.e., heart rate) and perceptual (i.e., thirst and perceived exertion) strains. Furthermore, no cognitive performance decrement was observed despite an average rectal temperature  $> 39^\circ\text{C}$  at the end of the time-trial with DEH, a threshold at which hyperthermia-associated cognitive impairments typically occurs [43]. Indeed, Schmit et al., [43] reported an inverted U relationship between hyperthermia and cognitive impairment, with a threshold fixed at  $\sim 39^\circ\text{C}$  for cognitive impairments.

Our second hypothesis was that repeated exposures to low and moderate exercise-induced hypohydration would moderate, in a positive manner, the baseline response. More specifically, we proposed that there would be no difference in cognitive efficiency between EUH and DEH at post-testing, implying that the degree of improvement in cognitive performance through training would be more important with DEH than EUH. Because no hypohydration-related cognitive decrements were observed at baseline between EUH and DEH following exercise, while participants were not familiar with the effect of hypohydration, unfortunately, our results prevent answering the question of whether or not the brain can develop, while submitted to repeated bouts of hypohydration, specific adaptations to reestablish cognitive functions to a euhydrated-associated baseline level. That being said, we could have observed that the cumulative effect of repeated exposures to low and moderate hypohydration induces mental fatigue over time and, as a result, lessen cognitive performance at post-testing. However, such a trend was not observed and repeated exposures to hypohydration

did not worsen the baseline response. In other words, no cognitive impairments were observed with repeated exposures to low and moderate hypohydration beyond exercise-induced EUH. This observation is particularly important for firefighters [44], military personnel [45] or individuals that are exposed to hot environments with limited access to hydration over long or consecutive shifts/days. In fact, it suggests that limited access to fluids for 3 days per week over a period of several weeks is unlikely to be detrimental to cognitive performance, compared with the maintenance of euhydration during exercise. We previously reported that the impact of repeated exposures to hypohydration upon endurance performance remains quite similar through training [17]. Such an observation is congruent with the *statu quo* observed in cognitive performance through training in the present study.

In addition to the classical statistical approach, we performed a practical analysis using the second-generation *p*-value. The latter aimed to provide a clearer perspective on the practical implication of the present findings. Regarding the changes in cognitive performance from pre- to post- training, at 2% hypohydration, the overall effect seems uncertain since 3 of the 5 results were unclear and a contradiction was observed between the other two (Table 2). At 4% hypohydration, a practical advantage was observed with DEH for 2 of the 5 results, 1 in advantage to EUH, 1 trivial and 1 unclear. Thus, the overall effect seems also unclear. Taken together, our results do not demonstrate that attempting to train to tolerate hypohydration could bring gains in cognitive performance lower than when EUH is maintained, but that in certain circumstances the gains in cognitive performance following training to hypohydration could be greater than when EUH is maintained. However, such a constance remains uncertain, and encourages more studies in this area.

Various methodological reasons may explain why we observed statistically insignificant or unclear effects of hypohydration on cognition. Participants completed several familiarization trials with the cognitive tests. Moreover, the tests were always performed in the same sequence. It is not impossible that this combination of factors may have contributed to our inability to observe an effect of hypohydration on cognitive performance. Another explication may be related to the overall difficulty of the tasks that participants had to complete, or to the overall task time, which may not have been long enough to pick up mental fatigue. Indeed, it has been recognized that at least 30 min of engagement in difficult and demanding cognitive tasks are necessary to induce mental fatigue, and thus a possible cognitive impairment [46]. Exercise *per se* is known to enhance cognitive performance. Indeed, it has previously been demonstrated that aerobic exercise has a small but beneficial effect on cognitive performance, and more specially on executive functions, attention and information processing [47,48]. This effect may last for up to 20 min after exercise completion [47]. Because ~ 10 min separated the end of the exercise period from the cognitive assessment phase, it cannot be excluded that exercise may have



counteracted any potential deleterious impact of hypohydration. However, the residual impact of exercise on cognitive functions appears to be more pronounced in children and the elderly compared to adults [49]. Moreover, Wittbrodt and Millard-Stafford [7] and others [50,51] have concluded that the method used to achieve hypohydration (i.e., exercise alone, exercise + heat stress, water restriction) does not influence how hypohydration impacts cognitive performance. There is the possibility that physically active individuals can inherently possess a good tolerance to the impact of hypohydration upon cognitive performance compared with sedentary individuals. To this effect, Wittbrodt and Millard-Stafford [7] showed a negative impact of hypohydration on cognitive performance that is nearly twofold lower in highly fit individuals compared to their recreationally fit counterparts. Or, alternately, these individuals may show more resilience to the influence of water loss on cognitive abilities. In this regard, Kempton, *et al.* [52] observed a higher neuronal activity during the execution of a cognitive task in hypohydrated adolescents. Had we worked with a population of a lower fitness level it cannot be excluded that a different outcome would have been observed. It cannot be excluded that our inability to systematically observe interaction effects between hydration and training may be due to a lack of sensitivity of some of the tests we used or a lack of statistical power. However, it must be borne in mind that, collectively, the battery of cognitive tests used was associated with several significant differences, including a hydration\*training effect for the WCST (%accuracy), as well as practical effects according to the second-generation *p*-value analyses. Not only the latter approach to data interpretation provides a clearer perspective on the practical implication of the present findings but also and importantly, it improves the robustness of our findings. Irrespective of the reasons why we could not witness an impact of hypohydration on cognitive functions, our observations highlight the fact that cognitive and physical performance may be dissimilarly deranged by hypohydration. Nonetheless, such results are explorative and more research on this topic is greatly necessary before to make robust conclusions.

## 5. Conclusions

From a statistical perspective, whether a physically active individual has never been or repeatedly been exposed to low (2%) and moderate (4%) exercise-induced hypohydration under hot ambient conditions, based on the battery of cognitive tests we used, our results indicate that, immediately following exercise, it will not impact his or her ability to provide a cognitive performance that is similar to when these body losses are fully replaced through water consumption. From a practical perspective, although the gains in cognitive performance following training to DEH were mostly unclear, under certain circumstances, they were greater than when euhydration was maintained. Further studies in this research area are required.

**Author Contributions:** Conceptualization, Eric D.B. Goulet; Formal analysis, Thomas A. Deshayes and Eric D.B. Goulet; Funding acquisition, Eric D.B. Goulet; Investigation, Nicolas Daigle, David Jeker, Martin Lamontagne-Lacasse, Maxime Perreault-Briere, Pascale Claveau, Ivan L. Simoneau and Estelle Chamoux; Methodology, Eric D.B. Goulet; Project administration, Eric D.B. Goulet; Visualization, Thomas A. Deshayes; Writing – original draft, Thomas A. Deshayes; Writing – review & editing, Thomas A. Deshayes and Eric D.B. Goulet. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This project was made possible through a research grant (# W7714-196896/001/SV) provided by the Canadian Government (Innovation for Defence Excellence and Security (IDEaS)).

**Institutional Review Board Statement:** The study was conducted according to the guidelines of the Declaration of Helsinki, and approved by the Institutional Review Board (or Ethics Committee) of the CIUSSS Estrie-CHUS Ethics Committee (protocol code #2019-3081, date of approval: 2019).

**Informed Consent Statement:** Informed consent was obtained from all subjects involved in the study.

**Data Availability Statement:** The data will be made available from the corresponding author upon reasonable request.

**Acknowledgments:** We must thank all the participants that dedicated time and efforts to the success of this project. Thomas A. Deshayes is financially supported by the Fonds de Recherche du Québec - Santé (FRQS).

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

## References

1. González-Alonso, J.; Crandall, C.G.; Johnson, J.M. The cardiovascular challenge of exercising in the heat. *The Journal of physiology* 2008, 586, 45-53.
2. Périard, J.D.; Cramer, M.N.; Chapman, P.G.; Caillaud, C.; Thompson, M.W. Cardiovascular strain impairs prolonged self-paced exercise in the heat. *Experimental physiology* 2011, 96, 134-144.
3. Hancock, P.A.; Vasmatazidis, I. Effects of heat stress on cognitive performance: the current state of knowledge. *International Journal of Hyperthermia* 2003, 19, 355-372.
4. Martin, K.; McLeod, E.; Périard, J.; Rattray, B.; Keegan, R.; Pyne, D.B. The impact of environmental stress on cognitive performance: a systematic review. *Human factors* 2019, 61, 1205-1246.
5. Racinais, S.; Wilson, M.G.; Gaoua, N.; Périard, J.D. Heat acclimation has a protective effect on the central but not peripheral nervous system. *Journal of Applied Physiology* 2017, 123, 816-824.
6. Radakovic, S.S.; Maric, J.; Surbatovic, M.; Radjen, S.; Stefanova, E.; Stankovic, N.; Filipovic, N. Effects of acclimation on cognitive performance in soldiers during exertional heat stress. *Military medicine* 2007, 172, 133-136.
7. Wittbrodt, M.T.; Millard-Stafford, M. Dehydration impairs cognitive performance: a meta-analysis. *Med Sci Sports Exerc* 2018, 50, 2360-2368.
8. Goodman, S.P.; Moreland, A.T.; Marino, F.E. The effect of active hypohydration on cognitive function: A systematic review and meta-analysis. *Physiology & behavior* 2019, 204, 297-308.
9. Garrett, A.; Goosens, N.; Rehrer, N.; Patterson, M.; Harrison, J.; Sammut, I.; Cotter, J. Short-term heat acclimation is effective and may be enhanced rather than impaired by dehydration. *American journal of human biology* 2014, 26, 311-320.
10. Haroutounian, A.; Amorim, F.T.; Astorino, T.A.; Khodiguian, N.; Curtiss, K.M.; Matthews, A.R.; Estrada, M.J.; Fennel, Z.; McKenna, Z.; Nava, R. Change in Exercise Performance and Markers of Acute Kidney Injury Following Heat Acclimation with Permissive Dehydration. *Nutrients* 2021, 13, 841.

11. Travers, G.; Nichols, D.; Riding, N.; González-Alonso, J.; Périard, J.D. Heat acclimation with controlled heart rate: influence of hydration status. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 2020, 52, 1815-1824.
12. Pethick, W.A.; Murray, H.J.; McFadyen, P.; Brodie, R.; Gaul, C.A.; Stellingwerff, T. Effects of hydration status during heat acclimation on plasma volume and performance. *Scandinavian journal of medicine & science in sports* 2019, 29, 189-199.
13. Schleh, M.W.; Ruby, B.C.; Dumke, C.L. Short term heat acclimation reduces heat stress, but is not augmented by dehydration. *Journal of thermal biology* 2018, 78, 227-234.
14. Neal, R.A.; Corbett, J.; Massey, H.C.; Tipton, M.J. Effect of short-term heat acclimation with permissive dehydration on thermoregulation and temperate exercise performance. *Scandinavian journal of medicine & science in sports* 2016, 26, 875-884.
15. Fleming, J.; James, L.J. Repeated familiarisation with hypohydration attenuates the performance decrement caused by hypohydration during treadmill running. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism* 2014, 39, 124-129.
16. McKay, A. K.; Stellingwerff, T.; Smith, E. S.; Martin, D. T.; Mujika, I.; Goosey-Tolfrey, V. L.; Sheppard, J.; Burke, L. M. Defining Training and Performance Caliber: A Participant Classification Framework. *International Journal of Sports Physiology and Performance* 2022, 17, 317-331.
17. Deshayes, T.A.; Daigle, N.; Jeker, D.; Lamontagne-Lacasse, M.; Perreault-Briere, M.; Claveau, P.; Simoneau, I.L.; Chamoux, E.; Goulet, E.D.B. Impact of repeated acute exposures to low and moderate exercise-induced hypohydration on physiological and subjective responses and endurance performance. *Nutrients* 2021, 13, 4477.
18. Borg, G.A. Psychophysical bases of perceived exertion. *Medicine & science in sports & exercise* 1982.
19. Goulet, E.D.; Rousseau, S.F.; Lamboley, C.R.; Plante, G.E.; Dionne, I.J. Pre-exercise hyperhydration delays dehydration and improves endurance capacity during 2 h of cycling in a temperate climate. *Journal of physiological anthropology* 2008, 27, 263-271.
20. Tombaugh, T.N. Trail Making Test A and B: normative data stratified by age and education. *Archives of clinical neuropsychology* 2004, 19, 203-214.
21. Heaton, R.K.; Chelune, G.J.; Talley, J.L.; Kay, G.G.; Curtis, G.; Curtiss, G.; Heaton, R.; Chelune, G.; Talley, J.; Kay, G. Wisconsin Card Sorting Test (WCST)—manual revised and expanded. 1993.
22. Verbruggen, F.; Aron, A.R.; Band, G.P.; Beste, C.; Bissett, P.G.; Brockett, A.T.; Brown, J.W.; Chamberlain, S.R.; Chambers, C.D.; Colonius, H. A consensus guide to capturing the ability to inhibit actions and impulsive behaviors in the stop-signal task. *Elife* 2019, 8, e46323.
23. Verbruggen, F.; Logan, G.D. Response inhibition in the stop-signal paradigm. *Trends in cognitive sciences* 2008, 12, 418-424.
24. Verbruggen, F.; Logan, G.D.; Stevens, M.A. STOP-IT: Windows executable software for the stop-signal paradigm. *Behavior research methods* 2008, 40, 479-483.
25. Berch, D.B.; Krikorian, R.; Huha, E.M. The Corsi block-tapping task: Methodological and theoretical considerations. *Brain and cognition* 1998, 38, 317-338.
26. Kessels, R.P.; Van Zandvoort, M.J.; Postma, A.; Kappelle, L.J.; De Haan, E.H. The Corsi block-tapping task: standardization and normative data. *Applied neuropsychology* 2000, 7, 252-258.
27. Woods, D.L.; Wyma, J.M.; Yund, E.W.; Herron, T.J.; Reed, B. Factors influencing the latency of simple reaction time. *Front. Hum. Neurosci.* 2015, 9, 131.
28. Deshayes, T.A.; Jeker, D.; Goulet, E.D.B. Impact of Pre-exercise Hypohydration on Aerobic Exercise Performance, Peak Oxygen Consumption and Oxygen Consumption at Lactate Threshold: A Systematic Review with Meta-analysis. *Sports Medicine* 2020, 50, 581–596.
29. Cohen, J. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences* (2nd ed.). New York: Academic Press, 1988.
30. Batterham, A.M.; Hopkins, W.G. The Problems with "The Problem with 'Magnitude-Based Inference'". *Med Sci Sports Exerc* 2019, 51, 599.
31. Hopkins, W.G.; Marshall, S.W.; Batterham, A.M.; Hanin, J. Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. *Med Sci Sports Exerc* 2009, 41, 3-13.
32. Sawka, M.N.; Burke, L.M.; Eichner, E.R.; Maughan, R.J.; Montain, S.J.; Stachenfeld, N.S. American College of Sports Medicine position stand. Exercise and fluid replacement. *Med Sci Sports Exerc* 2007, 39, 377-390, doi:10.1249/mss.0b013e31802ca597.
33. Wittbrodt, M.T.; Millard-Stafford, M.; Sherman, R.A.; Cheatham, C.C. Fluid Replacement Attenuates Physiological Strain Resulting From Mild Hypohydration Without Impacting Cognitive Performance. *Int J Sport Nutr Exerc Metab* 2015, 25, 439-447, doi:10.1123/ijsnem.2014-0173.

34. Goodman, S.P.; Moreland, A.T.; Marino, F.E. Maintaining Euhydration Preserves Cognitive Performance, But Is Not Superior to Hypohydration. *Journal of Cognitive Enhancement* 2019, 3, 338-348.
35. Van Den Heuvel, A.M.; Haberley, B.J.; Hoyle, D.J.; Taylor, N.A.; Croft, R.J. The independent influences of heat strain and dehydration upon cognition. *European journal of applied physiology* 2017, 117, 1025-1037.
36. Ely, B.R.; Sollanek, K.J.; Chevront, S.N.; Lieberman, H.R.; Kenefick, R.W. Hypohydration and acute thermal stress affect mood state but not cognition or dynamic postural balance. *European journal of applied physiology* 2013, 113, 1027-1034.
37. Ganio, M.S.; Armstrong, L.E.; Casa, D.J.; McDermott, B.P.; Lee, E.C.; Yamamoto, L.M.; Marzano, S.; Lopez, R.M.; Jimenez, L.; Le Bellego, L. Mild dehydration impairs cognitive performance and mood of men. *British Journal of Nutrition* 2011, 106, 1535-1543.
38. Armstrong, L.E.; Ganio, M.S.; Casa, D.J.; Lee, E.C.; McDermott, B.P.; Klau, J.E.; Jimenez, L.; Le Bellego, L.; Chevillotte, E.; Lieberman, H.R. Mild Dehydration Affects Mood in Healthy Young Women. *Journal of Nutrition* 2012, 142, 382-388.
39. Chevront, S.; Kenefick, R. Dehydration: physiology, assessment, and performance effects. *Compr Physiol* 4: 257-285. 2014.
40. Suh, H.; Lieberman, H.R.; Jansen, L.T.; Colburn, A.T.; Adams, J.; Seal, A.D.; Butts, C.L.; Kirkland, T.M.; Melander, O.; Vanhaecke, T.; Dolci, A.; Lemetais, G.; Perrier, E.T.; Kavouras, S.A. Cellular dehydration acutely degrades mood mainly in women: a counterbalanced, crossover trial. *British Journal of Nutrition* 2021, 125, 1092-1100.
41. Goodman, S.P.J.; Marino, F.E. Thirst perception exacerbates objective mental fatigue. *Neuropsychologia* 2020, 10.1016/j.neuropsychologia.2020.107686, 107686, doi:10.1016/j.neuropsychologia.2020.107686.
42. Edmonds, C.J.; Crombie, R.; Gardner, M.R. Subjective thirst moderates changes in speed of responding associated with water consumption. *Frontiers in human neuroscience* 2013, 7, 363, doi:10.3389/fnhum.2013.00363.
43. Schmit, C.; Hausswirth, C.; Le Meur, Y.; Duffield, R. Cognitive functioning and heat strain: performance responses and protective strategies. *Sports Medicine* 2017, 47, 1289-1302.
44. Cvirn, M.A.; Dorrian, J.; Smith, B.P.; Vincent, G.E.; Jay, S.M.; Roach, G.D.; Sargent, C.; Larsen, B.; Aisbett, B.; Ferguson, S.A. The effects of hydration on cognitive performance during a simulated wildfire suppression shift in temperate and hot conditions. *Applied ergonomics* 2019, 77, 9-15.
45. Lieberman, H.R.; Bathalon, G.P.; Falco, C.M.; Kramer, F.M.; Morgan III, C.A.; Niro, P. Severe decrements in cognition function and mood induced by sleep loss, heat, dehydration, and undernutrition during simulated combat. *Biological psychiatry* 2005, 57, 422-429.
46. Pageaux, B.; Lepers, R. The effects of mental fatigue on sport-related performance. *Progress in brain research* 2018, 240, 291-315.
47. Chang, Y.-K.; Labban, J.D.; Gapin, J.I.; Etnier, J.L. The effects of acute exercise on cognitive performance: a meta-analysis. *Brain research* 2012, 1453, 87-101.
48. Lambourne, K.; Tomporowski, P. The effect of exercise-induced arousal on cognitive task performance: a meta-regression analysis. *Brain research* 2010, 1341, 12-24.
49. Ludyga, S.; Gerber, M.; Brand, S.; Holsboer-Trachsler, E.; Pühse, U. Acute effects of moderate aerobic exercise on specific aspects of executive function in different age and fitness groups: A meta-analysis. *Psychophysiology* 2016, 53, 1611-1626.
50. Cian, C.; Koulmann, N.; Barraud, P.; Raphel, C.; Jimenez, C.; Melin, B. Influences of variations in body hydration on cognitive function: Effect of hyperhydration, heat stress, and exercise-induced dehydration. *Journal of Psychophysiology* 2000, 14, 29.
51. Cian, C.; Barraud, P.A.; Melin, B.; Raphel, C. Effects of fluid ingestion on cognitive function after heat stress or exercise-induced dehydration. *International journal of psychophysiology : official journal of the International Organization of Psychophysiology* 2001, 42, 243-251, doi:10.1016/s0167-8760(01)00142-8.
52. Kempton, M.J.; Ettinger, U.; Foster, R.; Williams, S.C.; Calvert, G.A.; Hampshire, A.; Zelaya, F.O.; O'Gorman, R.L.; McMorris, T.; Owen, A.M., et al. Dehydration affects brain structure and function in healthy adolescents. *Human brain mapping* 2011, 32, 71-79, doi:10.1002/hbm.20999.

## CHAPITRE IV. DISCUSSION ET CONCLUSION

Ce chapitre sera l'occasion de répondre aux quatre questions centrales de cette thèse initialement présentées dans la section 2.6 et de discuter des résultats et des retombées de recherche non abordés dans les trois articles qui la composent.

### 4.1. Rappel des questions de recherche et résultats principaux

Avant toute chose, il semble, à ce stade, important de rappeler les quatre questions auxquelles cette thèse visait à répondre :

- 1) Quel est l'impact de la déshydratation induite par l'exercice sur la perception de l'effort?
- 2) Quel est l'impact de la déshydratation faible (2 %) et modérée (4 % de la masse corporelle) sur la réponse cardiovasculaire, thermique et subjective, lorsque non habitué à cette dernière?
- 3) Quel est l'impact de l'hypohydratation faible et modérée sur la performance d'endurance et cognitive lorsque non habitué à cette dernière?
- 4) Une exposition répétée à la l'hypohydratation faible et modérée peut-elle permettre d'en réduire les impacts néfastes sur les variables précédemment mentionnées dans les questions (1), (2) et (3)?

Brièvement, nos travaux ont démontré que :

- 1) Bien que d'un point de vue statistique elle augmente la perception de l'effort, il est peu probable que la déshydratation  $< 3$  % de la masse corporelle ait un effet cliniquement pratique (c.-à-d. une différence  $> 1$  point). Par conséquent, nos résultats démontrent pour la première fois que la déshydratation faible a un effet trivial sur la perception de l'effort, contrairement à ce qui est fréquemment mis de l'avant dans la littérature.
- 2) Comparativement à une situation où l'euhydration est maintenue pendant l'exercice, la déshydratation modérée augmente significativement le stress cardiovasculaire, thermique et subjectif, dont la perception de l'effort et de la soif.

En revanche, seuls le stress cardiovasculaire et la perception de la soif sont significativement augmentés avec la déshydratation faible.

- 3) L'hypohydratation modérée réduit significativement la performance d'endurance. En revanche, d'un point de vue statistique, la performance d'endurance n'est pas affectée par l'hypohydratation faible. Concernant la performance cognitive, ni l'hypohydratation faible ni même l'hypohydratation modérée n'affectent les fonctions exécutives selon la batterie de tests utilisée.
- 4) Les effets sur les variables physiologiques et subjectives ainsi que sur la performance d'endurance et cognitive demeurent constants malgré les expositions répétées à ces niveaux d'hypohydratation. Autrement dit, nos résultats suggèrent que les personnes qui s'exposent de manière répétée à des niveaux d'hypohydratation faibles et modérés ne doivent pas s'attendre à une atténuation des effets néfastes sur leurs performances. Enfin, nos résultats démontrent que dans certaines circonstances, les gains de performance cognitive à la suite d'un entraînement à la déshydratation pourraient être plus grands que lorsque le même entraînement est réalisé euhydraté.

#### **4.2. Déshydratation et perception de l'effort : un effet dose-réponse ?**

Concernant les deux premières questions, il est intéressant de constater que non seulement nos résultats (1) confirment ceux obtenus dans la méta-analyse, c.-à-d. une absence d'effet sur la perception de l'effort lorsque la déshydratation est faible (2 %), mais aussi et surtout, (2) confirment que l'effet est davantage présent pour des niveaux de déshydratation plus importants (4 % de la masse corporelle). Effectivement, nous observons un effet statistique et clinique sur la perception de l'effort à 4 %, mais pas à 2 % d'hypohydratation. D'ailleurs, en nous basant sur nos prédictions, il était possible d'anticiper cet effet. Si la perception de l'effort augmente de 0,38 point pour chaque diminution de 1 % de la masse corporelle lors de l'exercice à intensité fixe (1<sup>er</sup> article, section 3.1), cela donne une augmentation de 1,5 point à 4 %. Dans l'étude originale, cette différence est très proche de celle estimée, atteignant 1,9 point à 4 % (2<sup>e</sup> article, section 3.2). Ceci permet de renforcer un constat qui ne pouvait pas être établi dans notre méta-analyse, autrement dit l'effet de la déshydratation > 3 % de la masse corporelle, puisque comme souligné dans les limites, aucune étude avec

des niveaux de déshydratation plus importants ( $\geq 4\%$ ) n'a été incluse. Ce manque s'explique par la moins grande disponibilité d'études ayant investigué de tels niveaux de déshydratation (voir tableaux 2 à 5 dans Périard et al., (2021) pour plus de détails), mais aussi et surtout parce que ces dernières n'étudiaient pas nécessairement la perception de l'effort ou la rapportaient de manière incomplète. Il est évident que de telles études auraient permis d'améliorer le modèle que nous avons établi dans la méta-analyse.

Si nous partons du principe que la perception de l'effort joue un rôle clé dans la relation entre la déshydratation et la performance d'endurance, alors nos travaux, qui soutiennent une absence d'effet de la déshydratation  $< 3-4\%$  de la masse corporelle, peuvent en partie contribuer à expliquer pourquoi la performance d'endurance lors d'un exercice de type contre-la-montre est généralement bien maintenue, et ce même jusqu'à des niveaux de déshydratation modérés (Goulet, 2011; 2013; Périard et al., 2021). Dans le même ordre d'idée, contrairement à Fleming & James (2014) et Funnell (2019), nous n'avons pas observé d'atténuation de l'impact négatif de l'hypohydratation sur la perception de l'effort. Cela pourrait potentiellement expliquer pourquoi, contrairement à eux, nous n'avons pas observé une atténuation des effets néfastes de l'hypohydratation sur la performance d'endurance à la suite des expositions répétées à l'hypohydratation. Une autre raison qui pourrait possiblement expliquer pourquoi nos résultats divergent de ceux de Fleming & James (2014) réside dans le fait que les performances étaient effectuées à la chaleur. D'ailleurs, cet aspect peut expliquer, en plus des raisons mentionnées dans les limitations du 3<sup>e</sup> article (section 3.3), l'absence d'effet de l'hypohydratation sur les fonctions exécutives comparativement à la condition contrôle (euhydratée). Il ne peut être exclu que l'effet de la chaleur ait été plus important que celui de l'hypohydratation et que les fonctions exécutives ont été affectées mais que cet effet n'a pas été détecté puisque la condition contrôle (EUH) était elle aussi conduite à la chaleur. Le fait que la température rectale à la fin de la performance d'endurance soit  $\geq 39\text{ °C}$ <sup>18</sup> dans les deux conditions (EUH :  $39,0\text{ °C}$  et DEH :  $39,5\text{ °C}$ ), juste avant les tests cognitifs, soutient en partie cet

---

<sup>18</sup> Ceci constitue le seuil à partir duquel la performance cognitive est généralement réduite. Modèle en U inversé de Schmit et al., (2017).

argument. Cependant, ceci n'élimine pas le fait que l'hypohydratation n'a pas accentué les effets de la chaleur et de l'hyperthermie.

#### **4.3. S'entraîner à la déshydratation : pas de bénéfices supplémentaires, mais pas moins de bénéfices pour autant**

Dans l'ensemble, nos résultats démontrent que tenter d'entraîner des individus à tolérer l'hypohydratation n'apporte pas de bénéfices supplémentaires comparativement à un entraînement classique. Cependant, dans certaines circonstances, les gains de performances cognitives à la suite d'un entraînement à l'hypohydratation pourraient être plus grands que lorsque le même entraînement est réalisé euhydraté.

Il aurait été possible de croire que s'exposer fréquemment à des niveaux d'hypohydratation modérés pourrait au moins apporter des bénéfices lors d'un exercice subséquent réalisé à un niveau d'hypohydratation plus faible. Toutefois nos résultats ne soutiennent pas ce point. Dans le même ordre d'idée, à l'inverse de nos hypothèses, il aurait pu être possible d'imaginer un effet délétère de l'effet cumulatif des expositions répétées à la déshydratation, comme cela a été démontré chez les modèles animaux, avec des niveaux d'hypohydratation élevés (Schwimmer et al., 2004, Schwimmer et al., 2006, Horowitz et al., 1999). Dans un tel cas, il aurait donc été envisageable d'observer de moins bonnes adaptations à l'entraînement, c.-à-d., une moins bonne amélioration des performances d'endurance et cognitives à la suite de l'entraînement à la déshydratation, principalement à cause de la fatigue physique et mentale inhérente. Or, dans les deux situations, nos travaux démontrent que ce n'est pas le cas, et que les améliorations sont indépendantes du statut hydrique maintenu, voire que certaines améliorations cognitives sont même plus importantes à la suite de l'entraînement à la déshydratation comparativement à lorsque l'euhydratation est maintenue. Il est aussi intéressant de constater que le protocole de 12 séances en 4 semaines semble avoir apporté des bénéfices en termes d'acclimatation à la chaleur (réduction de la température rectale de repos, hausse du taux de sudation à l'exercice, réduction des concentrations de sodium dans la sueur à l'exercice). Ces changements étaient similaires qu'une bonne hydratation soit maintenue ou non pendant les entraînement (c.-à-d. effet d'entraînement sans interaction entraînement\*hydratation).



Ceci rejoint les récentes observations montrant qu'en général, les adaptations induites par l'acclimatation à la chaleur et ses effets sur la performance d'endurance sont indépendantes du statut hydrique maintenu pendant les séances (Sekiguchi et al., 2020). Ces données sont donc de grand intérêt pour les entraîneurs et les physiologistes de l'exercice et démontrent que la déshydratation de 2 à 4 % de la masse corporelle n'altère par les adaptations à l'entraînement, du moins d'un point de vue de la performance. Par extension, ces conclusions sont également essentielles pour les militaires et les pompiers qui, dans certains cas, sont fréquemment exposés à la déshydratation lors de leurs entraînements, mais aussi de leurs interventions qui, parfois, peuvent s'étaler sur plusieurs jours (feux de forêt en Australie à la saison 2019-2020, feux de forêt dans l'Ouest américain et canadien en 2020).

L'intérêt croissant de cette question de recherche, c.-à-d. de savoir si l'humain peut s'habituer à la déshydratation en s'y exposant fréquemment, contraste fortement avec les nombreuses données transversales et longitudinales récentes qui démontrent une association entre la sous-hydratation chronique et le développement de certains problèmes de santé. En effet, de plus en plus d'évidences épidémiologiques s'accumulent et suggèrent une association entre un faible apport hydrique sur une base quotidienne et la formation de calculs rénaux, la récurrence d'infections urinaires, le développement de maladies métaboliques et rénales (Perrier et al., 2021). Selon les hypothèses actuelles, les grandes concentrations sanguines d'ADH sur une base régulière pourraient expliquer cette relation. En revanche, les effets à long terme d'expositions répétées à la déshydratation sur la santé sont peu connus. Bien que s'exposer volontairement à l'hypohydratation pour tenter de s'y habituer ne rime pas avec sous-hydratation chronique, cela souligne l'importance qu'il faut accorder au remplacement des liquides perdus entre les séances d'habituation. Dans une perspective plus large, et dépassant les frontières du domaine des sciences de l'activité physique, ce constat est alarmant d'un point de vue de la santé publique, puisqu'il est estimé que l'accès à l'eau sera de plus en plus difficile dans certaines régions du monde dû aux changements climatiques, et ce, même en Amérique du Nord.

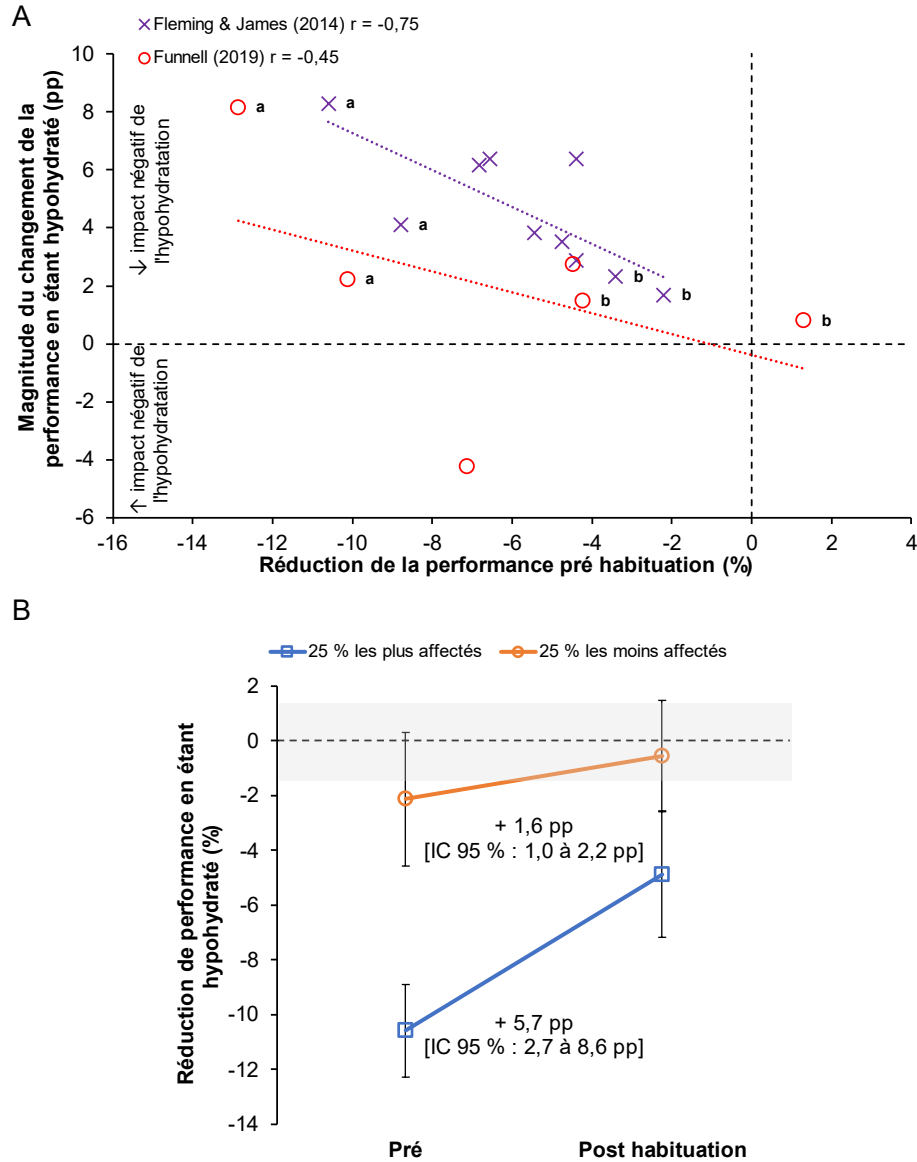
Une autre possibilité persiste : il ne peut être exclu que certaines personnes puissent bénéficier d'une exposition répétée à la déshydratation. En effet, s'il existe une grande variabilité interindividuelle concernant l'impact de l'hypohydratation sur la performance d'endurance et cognitive, il est alors légitime de penser que le constat est similaire lors d'une exposition répétée à l'hypohydratation. Autrement dit, il est possible de croire que certains individus pourraient en bénéficier plus que d'autres, principalement ceux qui, à la base, sont les plus impactés par la déshydratation/l'hypohydratation. Si tel est le cas, une approche plus ciblée pourrait être envisagée et peut-être s'avérer plus adéquate qu'une approche *one size fits all*.

#### **4.4. S'entraîner à la déshydratation : vers une approche plus ciblée ?**

À cet égard, cibler les personnes qui tolèrent moins bien l'hypohydratation pour tenter de les amener à mieux la tolérer serait une stratégie plus appropriée. Cela pourrait être également étudié de manière très spécifique par rapport au contexte auquel les individus doivent faire face. Autrement dit, la tâche à effectuer et les niveaux d'hypohydratation auxquels s'exposer pourraient ne pas être les mêmes entre des athlètes, des militaires ou des pompiers.

Une réanalyse des données disponibles dans les articles de Fleming & James (2014) et la thèse de Funnell (2019) (Figure 15a), illustre cette possibilité et permet justement de constater une relation négative entre l'impact initial de l'hypohydratation et la magnitude de l'amélioration à la suite d'un protocole d'habituation à la déshydratation faible (2-2,5 % de la masse corporelle). Autrement dit, il semblerait que ceux qui sont les plus affectés par l'hypohydratation initialement soient également ceux qui observent plus de bénéfices après le protocole d'habituation (Figure 15a et b). Bien qu'une forte différence interindividuelle soit aussi présente dans nos données (certains voient un fort bénéfice de l'habituation à la déshydratation tandis que d'autres non), tant à 2 qu'à 4 %, les individus qui s'améliorent le plus sont aussi ceux qui subissent les plus gros impacts de l'hypohydratation. En combinant toutes les valeurs de Fleming & James (2014) et Funnell (2019), les 25 % de ceux ayant la plus grande diminution de la performance initiale en étant hypohydratés s'améliorent de  $6 \pm 3$  points de pourcentage, comparativement aux 25 % de

ceux ayant la moins grande diminution de la performance, qui, eux, s'améliorent de seulement  $2 \pm 1$  points de pourcentage. La différence est donc de 4 points de pourcentage (IC 95 % : -1 à 9 points de pourcentage ;  $p = 0,07$ , taille d'effet important selon Cohen).



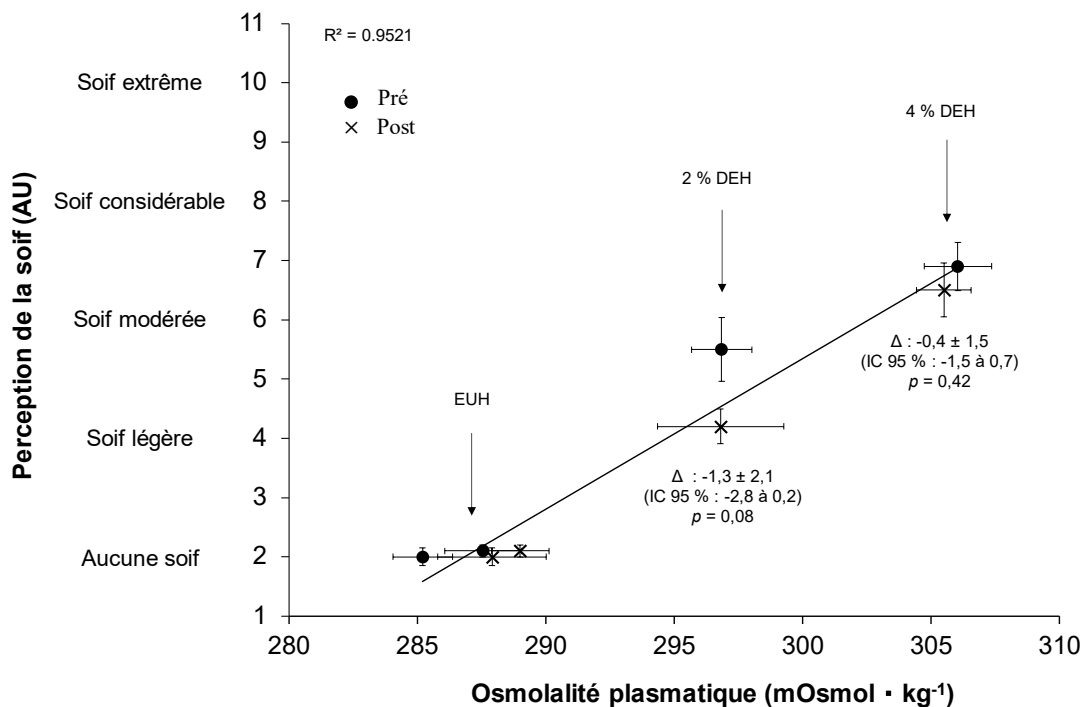
**Figure 15.** Relation entre l'impact initial de l'hypohydratation et la magnitude du changement de la performance en étant hypohydraté à la suite d'un protocole d'habituation<sup>19</sup>. Légende : a indique les 25 % de ceux les plus impactés par l'hypohydratation; b indique les 25 % de ceux les moins impactés. Zone grise : coefficient normal d'une performance d'endurance fixée à 1,5 %. IC 95 % = intervalle de confiance à 95 %, pp = points de pourcentage.

<sup>19</sup> Créé à partir des données accessibles dans les articles de Fleming & James (2014) et la thèse de Funnell (2019).

Cet aspect ouvre donc une nouvelle opportunité de recherche. Au lieu de vérifier s'il est possible d'atténuer les effets de l'hypohydratation sur la performance humaine en s'y entraînant spécifiquement, il pourrait être plus judicieux de s'intéresser à cette question et donc de la vérifier chez ceux qui sont, à la base, les plus impactés par l'hypohydratation. Toutefois, la question de l'effet nocébo se pose ici. En effet, il ne peut pas être exclu que les individus qui ont le plus de craintes et une perception exagérée de l'hypohydratation et de ses effets soient ceux qui s'améliorent le plus puisqu'ils apprennent à en avoir moins peur au fil des expositions.

#### **4.5. Exposition répétée : un effet sur la perception de la soif qui est à approfondir**

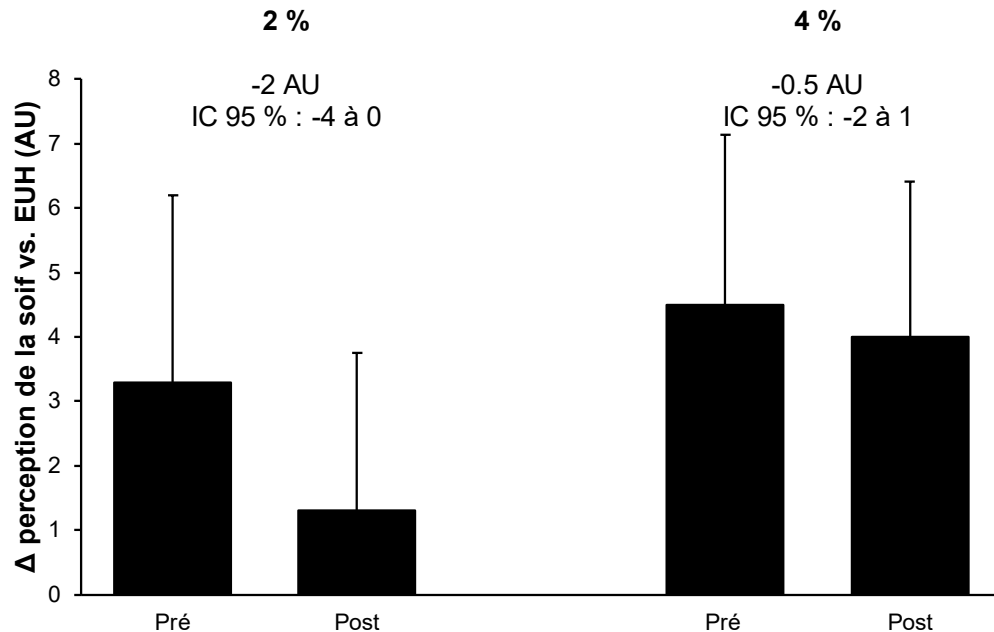
Concernant les effets d'une exposition répétée à ces niveaux d'hypohydratation, nos données démontrent que les effets sur l'osmolalité et le volume plasmatique sont très similaires. Puisque ces deux paramètres ont un impact sur la réponse cardiovasculaire, thermique et subjective lors de la réalisation d'un exercice déshydraté, il n'est donc pas surprenant qu'aucun changement n'ait été constaté sur ces variables clés après le protocole d'habituation. Toutefois, et de manière intéressante, nos données démontrent une légère réduction de la sensation de la soif, et ce, malgré l'absence de changement concernant l'osmolalité plasmatique et le volume plasmatique (voir Figure 16 pour plus de détails).



**Figure 16.** Relation entre osmolalité plasmatique et perception de la soif. AU = unité arbitraire, IC 95 % = intervalle de confiance à 95 %, EUH = euhydraté, DEH = déshydraté. Les valeurs présentées sont les valeurs d'osmolalité plasmatique et de soif récoltées à la fin de la période d'exercice à intensité fixe, juste avant le contre-la-montre.

Ceci a été peu discuté dans les articles originaux. Récemment, Sekiguchi et al., (2021) ont observé une perception de la soif plus faible (1 point, échelle de 1 à 9, soit un effet cliniquement trivial) après 5 séances d'acclimatation à la chaleur, et ce, malgré une perte de masse corporelle plus élevée (2,7 vs. 3 % de la masse corporelle) en raison d'un taux de sudation plus élevé (et donc par extension un niveau de déshydratation plus important). Plus proche de notre contexte, Funnell (2019) a également observé une diminution de 1,5 point (échelle de 1 à 11, similaire à la nôtre) après un protocole d'habituation à la déshydratation faible (2 % de la masse corporelle) de 4 séances ( $p = 0,07$ ). Bien que ces résultats n'aient, à ce jour, pas encore été publiés, et doivent donc être interprétés prudemment, ils concordent avec nos observations. Fait intéressant, à 2 %, nous observons également une diminution de 1,3 point ( $p = 0,08$ ), et ce, malgré une osmolalité plasmatique identique ( $297 \text{ mOsmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) (Figure 16). Bien que cette diminution soit relativement faible et donc cliniquement triviale, il ne peut être exclu qu'une exposition sur une plus longue période puisse induire un effet plus important. À la fin de la performance contre-la-

montre le constat est similaire comme démontré dans la Figure 17. Bien que non statistiquement significatif, l'augmentation de la perception de la soif est réduite de 2 points après le protocole d'habituation dans la condition 2 % mais pas dans la condition 4 %.



**Figure 17.** Augmentation de la soif à la fin du contre-la-montre en étant hypohydraté selon la condition et le temps. AU = unité arbitraire, IC 95 % = intervalle de confiance à 95 %, EUH = euhydraté.

L'acclimatation à la chaleur peut influencer la perception de la soif (Périard et al., 2015; 2021; Sekiguchi et al., 2021). L'exposition répétée à la déshydratation peut-elle modifier le seuil de déclenchement de la soif ? Autrement dit, s'exposer fréquemment au stress hypovolémique hyperosmotique peut-il repousser le seuil de déclenchement de la soif pour des valeurs d'osmolalité plus importantes, et donc, par extension, pour des niveaux de déshydratation plus importants ? Cette question mérite d'être étudiée davantage, d'autant plus que certaines évidences suggèrent que la soif peut être modifiée lors de la phase développementale des mammifères, mais aussi au cours de l'existence, comme c'est le cas chez les aînés (Kenney & Chiu, 2001) et les femmes enceintes (Davison et al., 1985). Par exemple, chez ces dernières, un recalibrage des osmorécepteurs peut survenir (*osmoreceptor reset* ou *reset osmostat*), se traduisant par une diminution des seuils osmotiques de déclenchement de l'ADH et de la soif (Davison et al., 1985). Un tel

recalibrage du seuil de déclenchement de l'ADH a également été observé chez le modèle animal à la suite d'une exposition prolongée à l'hypovolémie (Iwasaki et al., 1995). Comme souligné par Funnell (2019), il ne peut pas être exclu qu'un tel mécanisme, bien que spéculatif à ce jour, puisse survenir lors d'expositions répétées à un état d'hyperosmolalité, comme c'est le cas avec une exposition répétée à la déshydratation.

Des études animales ainsi que chez l'humain suggèrent que la disponibilité en eau au niveau *in utero* affecte le développement des mécanismes de régulation hydrique, notamment la sensation de soif. Par exemple, chez le modèle animal, les rats qui ont été exposés à une restriction en eau *in utero* présentent un seuil de déclenchement de la soif retardé (à des niveaux d'osmolalité plus importants) (Perillan et al., 2008; Ross & Desai, 2005). Concernant l'humain, Rosinger et al., (2021) ont observé que les Daasanach (Kenya) nés pendant la saison des pluies (et donc qui étaient *in utero* pendant la saison de sécheresse, c.-à-d. moins grande disponibilité en eau) rapportent un plaisir de boire de l'eau lorsqu'il fait chaud qui est significativement plus faible par rapport à ceux nés pendant la saison sèche (et donc *in utero* lors de la saison des pluies, c.-à-d. plus grande disponibilité en eau). Bien que d'autres études soient essentielles pour confirmer ces observations, cela suggère que le seuil de déclenchement de la soif, et plus largement certains mécanismes de régulation de l'équilibre hydrique, peuvent être influencés par l'environnement. Cela pourrait en partie expliquer les différences interindividuelles concernant le seuil de déclenchement de l'ADH et de la soif et la raison pour laquelle certaines personnes tolèrent davantage d'importants niveaux d'hypohydratation. Or, la question reste de savoir si ces changements peuvent aussi survenir au cours d'une vie, et non pas seulement lors de la phase développementale du fœtus.

Les individus entraînés en endurance ont une augmentation atténuée des concentrations d'ADH lorsque hypohydratés pendant l'exercice (Merry et al., 2008 ; Mudambo et al., 1997). Pour rappel, Merry et al., (2008), ont observé que les individus entraînés en endurance (et qui, par extension sont probablement fréquemment exposés à la déshydratation) ont une réponse neuroendocrine atténuée lorsque hypohydratés. Concrètement, cela se traduit par une plus faible sensibilité dans la relation osmolalité

plasmatique/ADH (les concentrations d'ADH augmentent moins pour une augmentation d'une unité de l'osmolalité plasmatique, comparativement aux individus non entraînés). Toutefois, ce modèle est imparfait, car s'il est raisonnable de penser que les individus entraînés sont, par leurs entraînements, plus fréquemment exposés à la déshydratation, il est impossible, hors de tout doute, d'affirmer que ces observations sont le fruit d'un phénomène d'habituation à la déshydratation *per se*. À cet égard, il serait pertinent d'investiguer si les seuils de déclenchement de l'ADH et de la soif ainsi que la sensibilité sont similaires chez des personnes fréquemment exposées à la déshydratation, comparativement à celles qui sont peu exposées à un manque d'eau, et ce, indépendamment du niveau d'entraînement. Dans un contexte d'adaptation aux effets des changements climatiques et compte tenu des expositions plus fréquentes à des environnements extrêmes causés par le réchauffement climatique et l'insécurité liée à l'eau, ces questions se doivent d'être étudiées davantage.

#### **4.6. Conclusion générale**

Globalement, bien que la déshydratation puisse augmenter la perception de l'effort, cet effet est plutôt observé à partir d'une hypohydratation modérée ( $\geq 4$  % de la masse corporelle). L'effet de l'hypohydratation sur le stress cardiovasculaire, thermique et subjectif ainsi que sur la performance d'endurance est davantage présent lors de l'hypohydratation modérée comparativement à l'hypohydratation faible. Concernant la performance cognitive, nos résultats ne démontrent globalement pas d'effets néfastes de l'hypohydratation sur les fonctions exécutives. Enfin, et surtout, nos résultats suggèrent que les personnes qui s'exposent de manière répétée à des niveaux d'hypohydratation faibles et modérés ne doivent pas s'attendre à une atténuation des effets néfastes de la déshydratation sur leurs performances. Dans certaines circonstances, les gains de performance cognitive à la suite d'un entraînement à la déshydratation pourraient même être plus grands que lorsque le même entraînement est réalisé euhydraté.

Bien que ce domaine de recherche en soit à ses balbutiements, les évidences suggèrent, à ce stade, qu'il est peu probable de mieux tolérer la déshydratation en s'y exposant fréquemment. De plus, d'autres évidences suggèrent une relation entre un faible apport



hydrique chronique (c.-à-d. sous-hydratation) et le développement de maladies métaboliques. Ainsi, ces constats, combinés aux impacts estimés des changements climatiques sur l'accès à l'eau potable, encouragent plus que fortement à limiter drastiquement l'impact de notre mode de vie sur le climat pour minimiser les effets sur les réserves en eau (atténuation) et à trouver des moyens de minimiser la vulnérabilité des populations (adaptation) face au risque plus accru de manque d'eau potable (quantité et qualité).

## RÉFÉRENCES

- Abbiss, C. R., Peiffer, J. J., Meeusen, R., & Skorski, S. (2015). Role of ratings of perceived exertion during self-paced exercise: what are we actually measuring? *Sports Medicine*, *45*(9), 1235-1243.
- Adam, G., Carter, R., Chevront, S., Merullo, D., Castellani, J., Lieberman, H., & Sawka, M. (2008). Hydration effects on cognitive performance during military tasks in temperate and cold environments. *Physiology & behavior*, *93*, 748-756.
- Adams, E. L., Casa, D. J., Huggins, R. A., DeMartini-Nolan, J. K., Stearns, R. L., Kennedy, R. M., Bosworth, M. M., DiStefano, L. J., Armstrong, L. E., & Maresh, C. M. (2019). Heat Exposure and Hypohydration Exacerbate Physiological Strain During Load Carrying. *J Strength Cond Res*, *33*(3), 727-735.
- Adams, J., Myatich, A. I., & McCullough, A. S. (2020). Thirst as an ingestive behavior: A brief review on physiology and assessment. *Nutrition and health*, *26*(3), 271-274.
- Adams, J., Scott, D. M., Brand, N. A., Suh, H. G., Seal, A. D., McDermott, B. P., Ganio, M. S., & Kavouras, S. A. (2019). Mild hypohydration impairs cycle ergometry performance in the heat: a blinded study. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, *29*(5), 686-695.
- Adams, J., Sekiguchi, Y., Suh, H.-G., Seal, A. D., Sprong, C. A., Kirkland, T. W., & Kavouras, S. A. (2018). Dehydration impairs cycling performance, independently of thirst: a blinded study. *Med Sci Sports Exerc*, *50*(8), 1697-1703.
- Adams, W. M., Ferraro, E. M., Huggins, R. A., & Casa, D. J. (2014). Influence of body mass loss on changes in heart rate during exercise in the heat: a systematic review. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, *28*(8), 2380-2389.
- Adams, W. M., Vandermark, L. W., Belval, L. N., & Casa, D. J. (2019). The utility of thirst as a measure of hydration status following exercise-induced dehydration. *Nutrients*, *11*(11), 2689.
- Adan, A. (2012). Cognitive performance and dehydration. *Journal of the American College of Nutrition*, *31*(2), 71-78.
- Adolph, E. (1947). Life in deserts. *Physiology of Man in the Desert*. New York, NY: Interscience, 326-341.
- Adolph, E. F. (1947). Physiology of Man in the Desert. *Physiology of Man in the Desert*.

- Akerman, A. P., Lucas, S. J., Katare, R., & Cotter, J. D. (2017). Heat and dehydration additively enhance cardiovascular outcomes following orthostatically-stressful calisthenics exercise. *Frontiers in physiology*, 8, 756.
- Alberti-Dufort, A., Bourduas Crouhen, V., Demers-Bouffard, D., Hennigs, R., Legault, S., Cunningham, J., Larrivée, C. et Ouranos. (2022). Québec; Chapitre 2 dans *Le Canada dans un climat en changement : Le rapport sur les Perspectives régionales*, (éd.) F.J. Warren, N. Lulham, D.L. Dupuis et D.S. Lemmen; Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario).
- Andreoli, T. E., Reeves, W. B., & Bichet, D. G. (2010). Endocrine control of water balance. *Comprehensive Physiology*, 530-569.
- Armstrong, L. E. (2005). Hydration assessment techniques. *Nutrition reviews*, 63(suppl\_1), S40-S54.
- Armstrong, L. E. (2007). Assessing hydration status: the elusive gold standard. *Journal of the American College of Nutrition*, 26(sup5), 575S-584S.
- Armstrong, L. E., Ganio, M. S., Casa, D. J., Lee, E. C., McDermott, B. P., Klau, J. E., Jimenez, L., Le Bellego, L., Chevillotte, E., & Lieberman, H. R. (2012). Mild Dehydration Affects Mood in Healthy Young Women. *Journal of Nutrition*, 142(2), 382-388.
- Armstrong, L. E., & Kavouras, S. A. (2019). Thirst and drinking paradigms: evolution from single factor effects to brainwide dynamic networks. *Nutrients*, 11(12), 2864.
- Armstrong, L. E., & Maresh, C. M. (1991). The induction and decay of heat acclimatisation in trained athletes. *Sports Medicine*, 12(5), 302-312.
- Augustine, V., Lee, S., & Oka, Y. (2020). Neural control and modulation of thirst, sodium appetite, and hunger. *Cell*, 180(1), 25-32.
- Backhouse, S. H., Biddle, S. J. H., & Williams, C. (2007). The influence of water ingestion during prolonged exercise on affect. *Appetite*, 48(2), 193-198.
- Baker, L. B. (2019). Physiology of sweat gland function: The roles of sweating and sweat composition in human health. *Temperature*, 6(3), 211-259.
- Baker, L. B., Barnes, K. A., Anderson, M. L., Passe, D. H., & Stofan, J. R. (2016). Normative data for regional sweat sodium concentration and whole-body sweating rate in athletes. *J Sports Sci*, 34(4), 358-368.
- Baker, L. B., De Chavez, P. J. D., Ungaro, C. T., Sopena, B. C., Nuccio, R. P., Reimel, A. J., & Barnes, K. A. (2019). Exercise intensity effects on total sweat electrolyte

- losses and regional vs. whole-body sweat  $[Na^+]$ ,  $[Cl^-]$ , and  $[K^+]$ . *European journal of applied physiology*, 119(2), 361-375.
- Bankir, L., Bichet, D. G., & Morgenthaler, N. G. (2017). Vasopressin: physiology, assessment and osmosensation. *Journal of internal medicine*, 282(4), 284-297.
- Bardis, C. N., Kavouras, S. A., Adams, J. D., Geladas, N. D., Panagiotakos, D. B., & Sidossis, L. S. (2017, Jun). Prescribed Drinking Leads to Better Cycling Performance than Ad Libitum Drinking. *Med Sci Sports Exerc*, 49(6), 1244-1251.
- Bardis, C. N., Kavouras, S. A., Kosti, L., Markousi, M., & Sidossis, L. S. (2013, Sep). Mild hypohydration decreases cycling performance in the heat. *Med Sci Sports Exerc*, 45(9), 1782-1789.
- Barr, S. I., Costill, D. L., & Fink, W. J. (1991, Jul). Fluid replacement during prolonged exercise: effects of water, saline, or no fluid. *Med Sci Sports Exerc*, 23(7), 811-817.
- Barry, H., Gendron, P., Gagnon, C., Bherer, L., & Gagnon, D. (2022). Passive heat acclimation does not modulate processing speed and executive functions during cognitive tasks performed at fixed levels of thermal strain. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 47(3), 261-268.
- Becker, C. A., Flaisch, T., Renner, B., & Schupp, H. T. (2017). From thirst to satiety: the anterior mid-cingulate cortex and right posterior insula indicate dynamic changes in incentive value. *Front Hum Neurosci*, 11, 234.
- Below, P. R., Mora-Rodriguez, R., Gonzalez-Alonso, J., & Coyle, E. F. (1995). Fluid and carbohydrate ingestion independently improve performance during 1 h of intense exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 27(2), 200-210.
- Berkulo, M. A., Bol, S., Levels, K., Lamberts, R. P., Daanen, H. A., & Noakes, T. D. (2016). Ad-libitum drinking and performance during a 40-km cycling time trial in the heat. *Eur J Sport Sci*, 16(2), 213-220.
- Bernard, P., Chevance, G., Kingsbury, C., Baillot, A., Romain, A.-J., Molinier, V., Gadais, T., & Dancause, K. N. (2021). Climate change, physical activity and sport: a systematic review. *Sports Medicine*, 1-19.
- Bijlani, R., & Sharma, K. (1980). Effect of dehydration and a few regimes of rehydration on human performance. *Indian journal of physiology and pharmacology*, 24(4), 255-266.
- Booth, R. E., Johnson, J. P., & Stockand, J. D. (2002). Aldosterone. *Advances in physiology education*, 26(1), 8-20.

- Borg, G. A. (1982). Psychophysical bases of perceived exertion. *Medicine & Science in Sports & Exercise*.
- Bright, F. M., Clark, B., Jay, O., & Periard, J. D. (2021). The effect of minimal differences in the skin-to-air vapor pressure gradient at various dry-bulb temperatures on self-paced exercise performance. *Journal of Applied Physiology*, 131(3), 1176-85.
- Buono, M. J., Claros, R., DeBoer, T., & Wong, J. (2008). Na<sup>+</sup> secretion rate increases proportionally more than the Na<sup>+</sup> reabsorption rate with increases in sweat rate. *Journal of Applied Physiology*, 105(4), 1044-1048.
- Burtscher, M., Gatterer, H., Burtscher, J., & Mairbäurl, H. (2018). Extreme terrestrial environments: life in thermal stress and hypoxia. A narrative review. *Frontiers in physiology*, 9, 572.
- Bush, E. and Lemmen, D.S., editors (2019): Canada's Changing Climate Report; Government of Canada, Ottawa, ON. 444 p.
- Buskirk, E., Iampietro, P., & Bass, D. E. (1958). Work performance after dehydration: effects of physical conditioning and heat acclimatization. *Journal of Applied Physiology*, 12(2), 189-194.
- Capitán-Jiménez, C., & Aragón-Vargas, L. F. (2022). Post-exercise voluntary drinking cessation is associated with the normalization of plasma osmolality and thirst perception, but not of urine indicators or net fluid balance. *Nutrients*, 14(19), 4188.
- Carlson, H., Pietroniro, A., Gober, P., Leger, W., et Merrill, S. (2021) : Ressources en eau; Chapitre 4 dans Le Canada dans un climat en changement : Rapport sur les enjeux nationaux, (éd.) F.J. Warren et N. Lulham; gouvernement du Canada, Ottawa, Ontario.
- Casa, D. J., Stearns, R. L., Lopez, R. M., Ganio, M. S., McDermott, B. P., Walker Yeargin, S., Yamamoto, L. M., Mazerolle, S. M., Roti, M. W., & Armstrong, L. E. (2010). Influence of hydration on physiological function and performance during trail running in the heat. *Journal of Athletic Training*, 45(2), 147-156.
- Chapman, C. L., Johnson, B. D., Vargas, N. T., Hostler, D., Parker, M. D., & Schlader, Z. J. (2020). Both hyperthermia and dehydration during physical work in the heat contribute to the risk of acute kidney injury. *Journal of applied physiology*, 128(4), 715–28.
- Che Muhamed, A. M., Atkins, K., Stannard, S. R., Mündel, T., & Thompson, M. W. (2016). The effects of a systematic increase in relative humidity on thermoregulatory and circulatory responses during prolonged running exercise in the heat. *Temperature*, 3(3), 455-64.

- Cheuvront, S. N., Carter III, R., Castellani, J. W., & Sawka, M. N. (2005). Hypohydration impairs endurance exercise performance in temperate but not cold air. *Journal of Applied Physiology*, *99*(5), 1972-76.
- Cheuvront, S. N., Carter III, R., & Sawka, M. N. (2003). Fluid balance and endurance exercise performance. *Current sports medicine reports*, *2*(4), 202-8.
- Cheuvront, S. N., & Haymes, E. M. (2001). Ad libitum fluid intakes and thermoregulatory responses of female distance runners in three environments. *Journal of sports sciences*, *19*(11), 845-854.
- Cheuvront, S. N., & Haymes, E. M. (2001). Thermoregulation and marathon running: biological and environmental influences. *Sports Med*, *31*(10), 743-762.
- Cheuvront, S. N., Haymes, E. M., & Sawka, M. N. (2002). Comparison of sweat loss estimates for women during prolonged high-intensity running. *Med Sci Sports Exerc*, *34*(8), 1344-1350.
- Cheuvront, S. N., & Kenefick, R. W. (2014). Dehydration: physiology, assessment, and performance effects. *Compr Physiol*, *4*(1), 257-285.
- Cheuvront, S. N., Kenefick, R. W., Montain, S. J., & Sawka, M. N. (2010). Mechanisms of aerobic performance impairment with heat stress and dehydration. *Journal of applied physiology*, *109*(6), 1989-1995.
- Cheuvront, S. N., & Montain, S. J. (2017). Myths and methodologies: Making sense of exercise mass and water balance. *Exp Physiol*, *102*(9), 1047-1053.
- Cheuvront, S. N., & Sawka, M. N. (2005). Hydration assessment of athletes. *Sports Sci Exchange*, *18*(2), 1-6.
- Cheuvront, S. N., Carter, R., Montain, S. J., & Sawka, M. N. (2004). Daily body mass variability and stability in active men undergoing exercise-heat stress. *International journal of sport nutrition and exercise metabolism*, *14*(5), 532-540.
- Cian, C., Barraud, P., Melin, B., & Raphel, C. (2001). Effects of fluid ingestion on cognitive function after heat stress or exercise-induced dehydration. *International Journal of Psychophysiology*, *42*(3), 243-251.
- Cian, C., Koulmann, N., Barraud, P., Raphel, C., Jimenez, C., & Melin, B. (2000). Influences of variations in body hydration on cognitive function: Effect of hyperhydration, heat stress, and exercise-induced dehydration. *Journal of Psychophysiology*, *14*(1), 29.

- Ciura, S., Liedtke, W., & Bourque, C. W. (2011). Hypertonicity sensing in organum vasculosum lamina terminalis neurons: a mechanical process involving TRPV1 but not TRPV4. *Journal of Neuroscience*, 31(41), 14669-14676.
- Claveau, P., Deshayes, T. A., Jeker, D., Pancrate, T., & Goulet, E. D. (2022). Provision of instructions to drink ad libitum or according to thirst sensation: impact during 120 km of cycling in the heat in men. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 47(1), 83-90.
- Clark, Dylan G., Ryan Ness, Dena Coffman, & Dale Beugin. 2021. The Health Costs of Climate Change: How Canada Can Adapt, Prepare, and Save Lives. Canadian Institute for Climate Choices. Ottawa, ON.
- Costa, R. J., Camões-Costa, V., Snipe, R. M., Dixon, D., Russo, I., & Huschtscha, Z. (2019). Impact of exercise-induced hypohydration on gastrointestinal integrity, function, symptoms, and systemic endotoxin and inflammatory profile. *Journal of Applied Physiology*, 126(5), 1281-1291.
- Cotter, J. D., Thornton, S. N., Lee, J. K., & Laursen, P. B. (2014). Are we being drowned in hydration advice? Thirsty for more? *Extreme physiology & medicine*, 3(1), 1-16.
- Crewe, H., Tucker, R., & Noakes, T. D. (2008). The rate of increase in rating of perceived exertion predicts the duration of exercise to fatigue at a fixed power output in different environmental conditions. *European journal of applied physiology*, 103(5), 569.
- Cuddy, J. S., Hailes, W. S., & Ruby, B. C. (2014). A reduced core to skin temperature gradient, not a critical core temperature, affects aerobic capacity in the heat. *Journal of thermal biology*, 43, 7-12.
- Currell, K., & Jeukendrup, A. E. (2008). Validity, reliability and sensitivity of measures of sporting performance. *Sports medicine*, 38(4), 297-316.
- D'anci, K. E., Mahoney, C. R., Vibhakar, A., Kanter, J. H., & Taylor, H. A. (2009). Voluntary dehydration and cognitive performance in trained college athletes. *Perceptual and motor skills*, 109(1), 251-269.
- Danziger, J., & Zeidel, M. L. (2015). Osmotic homeostasis. *Clinical Journal of the American Society of Nephrology*, 10(5), 852-862.
- Davison, J. M., Gilmore, E. A., Durr, J., Robertson, G. L., & Lindheimer, M. D. (1984). Altered osmotic thresholds for vasopressin secretion and thirst in human pregnancy. *American Journal of Physiology-Renal Physiology*, 246(1), F105-F109.

- de Korte, J. Q., Bongers, C. C., Hopman, M. T., & Eijsvogels, T. M. (2021). Exercise Performance and Thermoregulatory Responses of Elite Athletes Exercising in the Heat: Outcomes of the Thermo Tokyo Study. *Sports Medicine*, 1-14.
- de Oliveira, E. P., Burini, R. C., & Jeukendrup, A. (2014). Gastrointestinal complaints during exercise: prevalence, etiology, and nutritional recommendations. *Sports Medicine*, 44(1), 79-85.
- Denton, D., Shade, R., Zamarippa, F., Egan, G., Blair-West, J., McKinley, M., Lancaster, J., & Fox, P. (1999). Neuroimaging of genesis and satiation of thirst and an interoceptor-driven theory of origins of primary consciousness. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96(9), 5304-5309.
- Denton, D. A., McKinley, M. J., Farrell, M., & Egan, G. F. (2009). The role of primordial emotions in the evolutionary origin of consciousness. *Consciousness and cognition*, 18(2), 500-514.
- Deshayes, T. A., Jeker, D., & Goulet, E. D. (2020). Impact of pre-exercise hypohydration on aerobic exercise performance, peak oxygen consumption and oxygen consumption at lactate threshold: A systematic review with meta-analysis. *Sports Medicine*, 50(3), 581-596.
- Dickson, J. M., Weavers, H. M., Mitchell, N., Winter, E. M., Wilkinson, I. D., Van Beek, E. J. R., ... & Griffiths, P. D. (2005). The effects of dehydration on brain volume-preliminary results. *International journal of sports medicine*, 26(06), 481-85.
- Dion, T., Savoie, F. A., Asselin, A., Gariépy, C., & Goulet, E. D. (2013). Half-marathon running performance is not improved by a rate of fluid intake above that dictated by thirst sensation in trained distance runners. *European journal of applied physiology*, 113(12), 3011-3020.
- Dugas, J., Oosthuizen, U., Tucker, R., & Noakes, T. (2009). Rates of fluid ingestion alter pacing but not thermoregulatory responses during prolonged exercise in hot and humid conditions with appropriate convective cooling. *European journal of applied physiology*, 105(1), 69.
- Ebert, T. R., Martin, D. T., Bullock, N., Mujika, I., Quod, M. J., Farthing, L. A., Burke, L. M., & Withers, R. T. (2007). Influence of hydration status on thermoregulation and cycling hill climbing. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 39(2), 323-329.
- Edmonds, C. J., Crombie, R., & Gardner, M. R. (2013). Subjective thirst moderates changes in speed of responding associated with water consumption. *Front Hum Neurosci*, 7, 363.
- EFSA. (2010). Scientific opinion on dietary reference values for water. *EFSA journal*, 8(3), 1459.



- Ely, B. R., Sollanek, K. J., Chevront, S. N., Lieberman, H. R., & Kenefick, R. W. (2013). Hypohydration and acute thermal stress affect mood state but not cognition or dynamic postural balance. *European journal of applied physiology*, 113(4), 1027-1034.
- Ely, B. R., Ely, M. R., Chevront, S. N., Kenefick, R. W., DeGroot, D. W., & Montain, S. J. (2009). Evidence against a 40 C core temperature threshold for fatigue in humans. *Journal of Applied Physiology*, 107(5), 1519-25.
- Erkmen, N., Taskin, H., Kaplan, T., & Sanioglu, A. (2010). Balance performance and recovery after exercise with water intake, sport drink intake and no fluid. *Journal of Exercise Science & Fitness*, 8(2), 105-112.
- Eston, R., Faulkner, J., St Clair Gibson, A., Noakes, T., & Parfitt, G. (2007). The effect of antecedent fatiguing activity on the relationship between perceived exertion and physiological activity during a constant load exercise task. *Psychophysiology*, 44(5), 779-786.
- Evans G, Maughan R, Shirreffs S. Effects of an Active Lifestyle on Water Balance and Water Requirements. In: James MR, ed. *Lifestyle Medicine*. 3 ed.2019:135-143.
- Fallowfield, J. L., Williams, C., Booth, J., Choo, B. H., & Grows, S. (1996). Effect of water ingestion on endurance capacity during prolonged running. *Journal of sports sciences*, 14(6), 497-502.
- Fan, J.-L., Cotter, J. D., Lucas, R. A., Thomas, K., Wilson, L., & Ainslie, P. N. (2008). Human cardiorespiratory and cerebrovascular function during severe passive hyperthermia: effects of mild hypohydration. *Journal of Applied Physiology*, 105(2), 433-445.
- Febbraio, M., Snow, R., Stathis, C., Hargreaves, M., & Carey, M. (1994). Effect of heat stress on muscle energy metabolism during exercise. *Journal of Applied Physiology*, 77(6), 2827-2831.
- Febbraio, M. A. (2000). Does muscle function and metabolism affect exercise performance in the heat? *Exercise and sport sciences reviews*, 28(4), 171-176.
- Figaro, M. K., & Mack, G. W. (1997). Regulation of fluid intake in dehydrated humans: role of oropharyngeal stimulation. *Am J Physiol*, 272(6 Pt 2), R1740-1746.
- Fleming, J., & James, L. J. (2014). Repeated familiarisation with hypohydration attenuates the performance decrement caused by hypohydration during treadmill running. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 39(2), 124-129.
- Fortin, M. F., & Gagnon, J. (2016). *Fondements et étapes du processus de recherche: méthodes quantitatives et qualitatives*. Chenelière éducation, 3<sup>e</sup> édition.

- Fortney, S., Wenger, C., Bove, J., & Nadel, E. (1984). Effect of hyperosmolality on control of blood flow and sweating. *Journal of Applied Physiology*, 57(6), 1688-1695.
- Freund, B. J., Shizuru, E. M., Hashiro, G. M., & Claybaugh, J. R. (1991). Hormonal, electrolyte, and renal responses to exercise are intensity dependent. *Journal of Applied Physiology*, 70(2), 900-906.
- Fudge, B. W., Easton, C., Kingsmore, D., Kiplamai, F. K., Onywera, V. O., Westerterp, K. R., Kayser, B., Noakes, T. D., & Pitsiladis, Y. P. (2008). Elite Kenyan endurance runners are hydrated day-to-day with ad libitum fluid intake. *Med Sci Sports Exerc*, 40(6), 1171-1179.
- Fudge, B. W., Westerterp, K. R., Kiplamai, F. K., Onywera, V. O., Boit, M. K., Kayser, B., & Pitsiladis, Y. P. (2006). Evidence of negative energy balance using doubly labelled water in elite Kenyan endurance runners prior to competition. *British Journal of Nutrition*, 95(1), 59-66.
- Fuller, A., Carter, R. N., & Mitchell, D. (1998). Brain and abdominal temperatures at fatigue in rats exercising in the heat. *Journal of Applied Physiology*, 84(3), 877-883.
- Funnell, M. (2019). *Chapitre 5 : Effect of familiarisation to exercise-induced dehydration on exercise performance. Dans sa thèse intitulée : The effect of fluid intake during exercise on aerobic exercise performance and post-exercise recovery.* Loughborough University.
- Funnell, M. P., Mears, S. A., Bergin-Taylor, K., & James, L. J. (2019). Blinded and unblinded hypohydration similarly impair cycling time trial performance in the heat in trained cyclists. *J Appl Physiol (1985)*, 126(4), 870-879.
- Gagnon, D., Romero, S. A., Ngo, H., Poh, P. Y., & Crandall, C. G. (2016). Plasma hyperosmolality attenuates skin sympathetic nerve activity during passive heat stress in humans. *J Physiol*, 594(2), 497-506.
- Galloway, S., & Maughan, R. J. (1997). Effects of ambient temperature on the capacity to perform prolonged cycle exercise in man. *Medicine and science in sports and exercise*, 29(9), 1240-1249.
- Ganio, M. S., Armstrong, L. E., Casa, D. J., McDermott, B. P., Lee, E. C., Yamamoto, L. M., Marzano, S., Lopez, R. M., Jimenez, L., & Le Bellego, L. (2011). Mild dehydration impairs cognitive performance and mood of men. *British Journal of Nutrition*, 106(10), 1535-1543.

- Ganio, M. S., Wingo, J. E., Carroll, C. E., Thomas, M. K., & Cureton, K. J. (2006). Fluid ingestion attenuates the decline in VO<sub>2</sub>peak associated with cardiovascular drift. *Med Sci Sports Exerc*, 38(5), 901-909.
- Garrett, A., Goosens, N., Rehrer, N., Patterson, M., Harrison, J., Sammut, I., & Cotter, J. (2014). Short-term heat acclimation is effective and may be enhanced rather than impaired by dehydration. *American journal of human biology*, 26(3), 311-320.
- Gava Pompermayer, M., Rodrigues, R., Manfredini Baroni, B., de Oliveira Lupion, R., Meyer, F., & Aurélio Vaz, M. (2014). Rehydration during exercise in the heat reduces physiological strain index in healthy adults. *Brazilian Journal of Kineanthropometry & Human Performance*, 16(6), 629-637.
- Geelen, G., Keil, L., Kravik, S., Wade, C., Thrasher, T., Barnes, P., Pyka, G., Nesvig, C., & Greenleaf, J. (1984). Inhibition of plasma vasopressin after drinking in dehydrated humans. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 247(6), R968-R971.
- GIEC, 2015: Changements climatiques 2015: Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer]. GIEC, Genève, Suisse, 161 p
- Gizowski, C., & Bourque, C. W. (2018). The neural basis of homeostatic and anticipatory thirst. *Nature Reviews Nephrology*, 14(1), 11-25.
- González-Alonso, J., Calbet, J. A., & Nielsen, B. (1999). Metabolic and thermodynamic responses to dehydration-induced reductions in muscle blood flow in exercising humans. *J Physiol*, 520 Pt 2(Pt 2), 577-589.
- Gonzalez-Alonso, J., Mora-Rodriguez, R., Below, P., & Coyle, E. (1995). Dehydration reduces cardiac output and increases systemic and cutaneous vascular resistance during exercise. *Journal of applied physiology*, 79(5), 1487-1496.
- González-Alonso, J., Mora-Rodríguez, R., Below, P. R., & Coyle, E. F. (1997). Dehydration markedly impairs cardiovascular function in hyperthermic endurance athletes during exercise. *J Appl Physiol (1985)*, 82(4), 1229-1236.
- González-Alonso, J., Calbet, J. A., & Nielsen, B. (1998). Muscle blood flow is reduced with dehydration during prolonged exercise in humans. *The Journal of physiology*, 513(3), 895-905.
- Goodman, S. P., & Marino, F. E. (2021). Thirst perception exacerbates objective mental fatigue. *Neuropsychologia*, 150, 107686.

- Goodman, S. P., Moreland, A. T., & Marino, F. E. (2019a). The effect of active hypohydration on cognitive function: A systematic review and meta-analysis. *Physiology & behavior, 204*, 297-308.
- Goodman, S. P., Moreland, A. T., & Marino, F. E. (2019b). Maintaining Euhydration Preserves Cognitive Performance, But Is Not Superior to Hypohydration. *Journal of Cognitive Enhancement, 3*(3), 338-348.
- Goodman, S. P. J., & Marino, F. E. (2020). Thirst perception exacerbates objective mental fatigue. *Neuropsychologia, 107686*.
- Gopinathan, P. M., Pichan, G., & Sharma, V. M. (1988). Role of dehydration in heat stress-induced variations in mental performance. *Arch Environ Health, 43*(1), 15-17.
- Goulet, E. D. (2011). Effect of exercise-induced dehydration on time-trial exercise performance: a meta-analysis. *British journal of sports medicine, 45*(14), 1149-1156.
- Goulet, E. D. (2013). Effect of exercise-induced dehydration on endurance performance: evaluating the impact of exercise protocols on outcomes using a meta-analytic procedure. *British journal of sports medicine, 47*(11), 679-686.
- Goulet, E. D., & Hoffman, M. D. (2019). Impact of ad libitum versus programmed drinking on endurance performance: A systematic review with meta-analysis. *Sports Medicine, 49*(2), 221-232.
- Gouvernement du Canada. (2003). Le changement climatique : nous sommes menacés. Chapitre 5 : les effets du changement climatique sur l'eau. [https://publications.gc.ca/site/archivee-archived.html?url=https://publications.gc.ca/collections/collection\\_2011/sen/yc27-0/yc27-0-372-3-fra.pdf](https://publications.gc.ca/site/archivee-archived.html?url=https://publications.gc.ca/collections/collection_2011/sen/yc27-0/yc27-0-372-3-fra.pdf)
- Graham, C., Morris, N. B., Harwood, A. E., & Jay, O. (2020). Ad libitum water consumption off-sets the thermal and cardiovascular strain exacerbated by dehydration during a 3-h simulated heatwave. *European journal of applied physiology, 120*(2), 391-399.
- Grandjean, A. C., & Grandjean, N. R. (2007). Dehydration and cognitive performance. *Journal of the American College of Nutrition, 26*(sup5), 549S-554S.
- Greenleaf, J. E., & Sargent, F. (1965). Voluntary dehydration in man. *Journal of Applied Physiology, 20*(4), 719-724.
- Grundstein, A., Elguindi, N., Cooper, E., & Ferrara, M. S. (2013). Exceedance of wet bulb globe temperature safety thresholds in sports under a warming climate. *Climate research, 58*(2), 183-191.

- Guyton, A., & Hall, J. (2006). The body fluids and kidneys. In S. Co (Ed.), *Textbook of medical physiology* (11th ed., Vol. 6, pp. 339).
- Hagger, M. S. (2006). Meta-analysis in sport and exercise research: Review, recent developments, and recommendations. *European Journal of Sport Science*, 6(2), 103-115.
- Hamilton, M. T., Gonzalez-Alonso, J., Montain, S. J., & Coyle, E. F. (1991). Fluid replacement and glucose infusion during exercise prevent cardiovascular drift. *Journal of Applied Physiology*, 71(3), 871-877.
- Hargreaves, M., Dillo, P., Angus, D., & Febbraio, M. (1996). Effect of fluid ingestion on muscle metabolism during prolonged exercise. *Journal of Applied Physiology*, 80(1), 363-366.
- Haroutounian, A., Amorim, F. T., Astorino, T. A., Khodiguian, N., Curtiss, K. M., Matthews, A. R., Estrada, M. J., Fennel, Z., McKenna, Z., & Nava, R. (2021). Change in Exercise Performance and Markers of Acute Kidney Injury Following Heat Acclimation with Permissive Dehydration. *Nutrients*, 13(3), 841.
- Harrison, M. H., Edwards, R. J., & Fennessy, P. A. (1978). Intravascular volume and tonicity as factors in the regulation of body temperature. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol*, 44(1), 69-75.
- Hashimoto, H., Ishijima, T., Suzuki, K., & Higuchi, M. (2016). The effect of the menstrual cycle and water ingestion on physiological responses during prolonged exercise at moderate intensity under hot conditions. *J Sports Med Phys Fitness*.
- Hellström, G., Fischer-Colbrie, W., Wahlgren, N. G., & Jogestrand, T. (1996). Carotid artery blood flow and middle cerebral artery blood flow velocity during physical exercise. *J Appl Physiol* (1985), 81(1), 413-418.
- Hew-Butler, T. D., Eskin, C., Bickham, J., Rusnak, M., & VanderMeulen, M. (2018). Dehydration is how you define it: comparison of 318 blood and urine athlete spot checks. *BMJ open sport & exercise medicine*, 4(1), e000297.
- Higgins, J. P., Thomas, J., Chandler, J., Cumpston, M., Li, T., Page, M. J., & Welch, V. A. (Eds.). (2019). *Cochrane handbook for systematic reviews of interventions*. John Wiley & Sons.
- Hillman, A. R., Vince, R. V., Taylor, L., McNaughton, L., Mitchell, N., & Siegler, J. (2011). Exercise-induced dehydration with and without environmental heat stress results in increased oxidative stress. *Applied Physiology, Nutrition & Metabolism*, 36(5), 698-706.

- Holland, J. J., Skinner, T. L., Irwin, C. G., Leveritt, M. D., & Goulet, E. D. (2017). The influence of drinking fluid on endurance cycling performance: a meta-analysis. *Sports Medicine*, 47(11), 2269-2284.
- Hondula, D. M., Balling, R. C., Vanos, J. K., & Georgescu, M. (2015). Rising temperatures, human health, and the role of adaptation. *Current Climate Change Reports*, 1(3), 144-54.
- Horowitz, M., Kaspler, P., Simon, E., & Gerstberger, R. (1999). Heat acclimation and hypohydration: involvement of central angiotensin II receptors in thermoregulation. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 277(1), R47-R55.
- Huggins, R. A., Martschinske, J. L., Applegate, K., Armstrong, L. E., & Casa, D. J. (2012). Influence of dehydration on internal body temperature changes during exercise in the heat: A meta-analysis. *Medicine and science in sports and exercise*,
- Hughes, F., Mythen, M., & Montgomery, H. (2018). The sensitivity of the human thirst response to changes in plasma osmolality: a systematic review. *Perioperative Medicine*, 7(1), 1.
- Ishijima, T., Hashimoto, H., Satou, K., Muraoka, I., Suzuki, K., & Higuchi, M. (2009, Dec). The different effects of fluid with and without carbohydrate ingestion on subjective responses of untrained men during prolonged exercise in a hot environment. *J Nutr Sci Vitaminol (Tokyo)*, 55(6), 506-510.
- Iwasaki, Y. A. S. U. M. A. S. A., Gaskill, M. B., & Robertson, G. L. (1995). Adaptive resetting of the volume control of vasopressin secretion during sustained hypovolemia. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 268(2), R349-R357.
- James, L. J., Funnell, M. P., James, R. M., & Mears, S. A. (2019). Does hypohydration really impair endurance performance? Methodological considerations for interpreting hydration research. *Sports Medicine*, 1-12.
- James, L. J., Moss, J., Henry, J., Papadopoulou, C., & Mears, S. A. (2017). Hypohydration impairs endurance performance: a blinded study. *Physiol Rep*, 5(12).
- James, L. J., Moss, J., Henry, J., Papadopoulou, C., & Mears, S. A. (2017). Hypohydration impairs endurance performance: a blinded study. *Physiological reports*, 5(12), e13315.
- Jeker, D., Claveau, P., Abed, M. E. F., Deshayes, T. A., Lajoie, C., Gendron, P., Hoffman, M., & Goulet, E. D. (2021). Programmed vs. Thirst-Driven Drinking during Prolonged Cycling in a Warm Environment. *Nutrients*, 14(1), 141.

- Jéquier, E., & Constant, F. (2010). Water as an essential nutrient: the physiological basis of hydration. *European journal of clinical nutrition*, 64(2), 115-123.
- Jeukendrup, A. E. (2017). Periodized nutrition for athletes. *Sports Medicine*, 47(1), 51-63.
- Juett, L. A., Midwood, K. L., Funnell, M. P., James, L. J., & Mears, S. A. (2021). Hypohydration produced by high-intensity intermittent running increases biomarkers of renal injury in males. *European journal of applied physiology*, 121(12), 3485–97.
- Kao, W.-F., Shyu, C.-L., Yang, X.-W., Hsu, T.-F., Chen, J.-J., Kao, W.-C., Huang, Y.-J., Kuo, F.-C., Huang, C.-I., & Lee, C.-H. (2008). Athletic performance and serial weight changes during 12-and 24-hour ultra-marathons. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 18(2), 155-158.
- Kavouras, S. A. (2019). Hydration, dehydration, underhydration, optimal hydration: are we barking up the wrong tree? *European Journal of Nutrition*, 58(2), 471-473.
- Kempton, M. J., Ettinger, U., Schmechtig, A., Winter, E. M., Smith, L., McMorris, T., ... & Smith, M. S. (2009). Effects of acute dehydration on brain morphology in healthy humans. *Human brain mapping*, 30(1), 291-98.
- Kempton, M. J., Ettinger, U., Foster, R., Williams, S. C., Calvert, G. A., Hampshire, A., ... & Smith, M. S. (2011). Dehydration affects brain structure and function in healthy adolescents. *Human brain mapping*, 32(1), 71-79.
- Kenefick, R. W., Chevront, S. N., Palombo, L. J., Ely, B. R., & Sawka, M. N. (2010). Skin temperature modifies the impact of hypohydration on aerobic performance. *Journal of Applied Physiology*, 109(1), 79-86.
- Kenefick, R. W., Maresh, C. M., Armstrong, L. E., Riebe, D., Echegaray, M. E., & Castellani, J. W. (2007). Rehydration with fluid of varying tonicities: effects on fluid regulatory hormones and exercise performance in the heat. *Journal of applied physiology*, 102(5), 1899-1905.
- Kenney, W. L., & Chiu, P. (2001). Influence of age on thirst and fluid intake. *Medicine and science in sports and exercise*, 33(9), 1524-1532.
- Lacey J, Corbett J, Forni L, Hooper L, Hughes F, Minto G, Moss C, Price S, Whyte G, Woodcock T, Mythen M, Montgomery H. (2019). A multidisciplinary consensus on dehydration: definitions, diagnostic methods and clinical implications. *Annals of medicine*, 51(3-4), 232-251.
- Lambert, G. P., Lang, J., Bull, A., Pfeifer, P., Eckerson, J., Moore, G., Lanspa, S., & O'Brien, J. (2008). Fluid restriction during running increases GI permeability. *International Journal of Sports Medicine*, 29(03), 194-198.

- Lee, M., Hammond, K., Vasdev, A., Poole, K., Impey, S., Close, G., & Morton, J. (2014). Self-selecting fluid intake while maintaining high carbohydrate availability does not impair half-marathon performance. *International Journal of Sports Medicine*, 35(14), 1216-1222.
- Leonard, W. R. (2015). Physiological adaptations to environmental stressors. In *Basics in human evolution* (pp. 251-272). Elsevier.
- Lieberman, D. E. (2015). Human locomotion and heat loss: an evolutionary perspective. *Compr Physiol*, 5(1), 99-117.
- Lieberman, H. R. (2007). Hydration and cognition: a critical review and recommendations for future research. *Journal of the American College of Nutrition*, 26(sup5), 555S-561S.
- Lieberman, H. R. (2010). Hydration and human cognition. *Nutrition Today*, 45(6), S33-S36.
- Littell, J. H., Corcoran, J. et Pillai, V. (2008). *Systematic Reviews and Meta-Analysis. Pocket guides to social work research methods*. New York, NY: Oxford University Press.
- Logan-Sprenger, H. M., Heigenhauser, G. J., Jones, G. L., & Spriet, L. L. (2013). Increase in skeletal-muscle glycogenolysis and perceived exertion with progressive dehydration during cycling in hydrated men. *International journal of sport nutrition and exercise metabolism*, 23(3), 220-229.
- Logan-Sprenger, H. M., Heigenhauser, G. J., Killian, K. J., & Spriet, L. L. (2012). Effects of dehydration during cycling on skeletal muscle metabolism in females. *Medicine and science in sports and exercise*, 44(10), 1949-1957.
- Loudière, D., & Gourbesville, P. (2020). Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2020. L'eau et les changements climatiques.
- Maloney, S. K., & Forbes, C. F. (2011). What effect will a few degrees of climate change have on human heat balance? Implications for human activity. *Int J Biometeorol*, 55(2), 147-160.
- Mantzios, K., Ioannou, L. G., Panagiotaki, Z., Ziaka, S., Périard, J. D., Racinais, S., ... & Flouris, A. D. (2022). Effects of Weather Parameters on Endurance Running Performance: Discipline-specific Analysis of 1258 Races. *Medicine and science in sports and exercise*, 54(1), 153.



- Marcora, S. (2009). Perception of effort during exercise is independent of afferent feedback from skeletal muscles, heart, and lungs. *Journal of Applied Physiology*, *106*(6), 2060-2062.
- Maresh, C. M., Gabaree-Boulant, C. L., Armstrong, L. E., Judelson, D. A., Hoffman, J. R., Castellani, J. W., Kenefick, R. W., Bergeron, M. F., & Casa, D. J. (2004). Effect of hydration status on thirst, drinking, and related hormonal responses during low-intensity exercise in the heat. *Journal of applied physiology*, *97*(1), 39-44.
- Martin, K., McLeod, E., Périard, J., Rattray, B., Keegan, R., & Pyne, D. B. (2019). The impact of environmental stress on cognitive performance: a systematic review. *Human factors*, *61*(8), 1205-1246.
- Masento, N. A., Golightly, M., Field, D. T., Butler, L. T., & van Reekum, C. M. (2014). Effects of hydration status on cognitive performance and mood. *British Journal of Nutrition*, *111*(10), 1841-1852.
- Maughan, R. J. (2012). Investigating the associations between hydration and exercise performance: methodology and limitations. *Nutr Rev*, *70 Suppl 2*, S128-131.
- Maughan, R. J., Otani, H., & Watson, P. (2012). Influence of relative humidity on prolonged exercise capacity in a warm environment. *European Journal of Applied Physiology*, *112*(6), 2313-2321.
- Maughan, R. J., Shirreffs, S. M., & Leiper, J. B. (2007). Errors in the estimation of hydration status from changes in body mass. *Journal of sports sciences*, *25*(7), 797-804.
- McConnell, G. K., Stephens, T. J., & Canny, B. J. (1999). Fluid ingestion does not influence intense 1-h exercise performance in a mild environment. *Med Sci Sports Exerc*, *31*(3), 386-392.
- McDermott, B. P., Anderson, S. A., Armstrong, L. E., Casa, D. J., Chevront, S. N., Cooper, L., Kenney, W. L., O'Connor, F. G., & Roberts, W. O. (2017). National Athletic Trainers' Association position statement: fluid replacement for the physically active. *Journal of Athletic Training*, *52*(9), 877-895.
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2016). Four billion people facing severe water scarcity. *Science advances*, *2*(2), e1500323.
- Melin, B., Jimenez, C., Savourey, G., Bittel, J., Cottet-Emard, J., Pequignot, J., Allevard, A., & Gharib, C. (1997). Effects of hydration state on hormonal and renal responses during moderate exercise in the heat. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, *76*(4), 320-327.

- Melin, B., Koulmann, N., Jimenez, C., Savourey, G., Launay, J.-C., Cottet-Emard, J.-M., Pequignot, J.-M., Allevard, A.-M., & Gharib, C. (2001). Comparison of passive heat or exercise-induced dehydration on renal water and electrolyte excretion: the hormonal involvement. *European journal of applied physiology*, 85(3-4), 250-258.
- Mendes, S. H., Tritto, A. C., Guilherme, J. P. L., Solis, M. Y., Vieira, D. E., Franchini, E., Lancha, A. H., & Artioli, G. G. (2013). Effect of rapid weight loss on performance in combat sport male athletes: does adaptation to chronic weight cycling play a role? *British journal of sports medicine*, 47(18), 1155-1160.
- Mercer, J., and J. Werner. "Glossary of terms for thermal physiology." *Jpn J Physiol* 51 (2001): 245-280.
- Merry, T., Ainslie, P., & Cotter, J. (2010). Effects of aerobic fitness on hypohydration-induced physiological strain and exercise impairment. *Acta physiologica*, 198(2), 179-190.
- Merry, T. L., Ainslie, P. N., Walker, R., & Cotter, J. D. (2008). Fitness alters fluid regulatory but not behavioural responses to hypohydrated exercise. *Physiology & behavior*, 95(3), 348-352.
- Meyers, S. M., Tam, R., Lee, J. S., Kolind, S. H., Vavasour, I. M., Mackie, E., ... & Traboulsee, A. L. (2016). Does hydration status affect MRI measures of brain volume or water content? *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 44(2), 296-304.
- Millet, G. Y. (2011). Can neuromuscular fatigue explain running strategies and performance in ultra-marathons? *Sports medicine*, 41(6), 489-506.
- Mitchell, J. W., Nadel, E. R., & Stolwijk, J. (1972). Respiratory weight losses during exercise. *Journal of Applied Physiology*, 32(4), 474-476.
- Montain, S., Sawka, M., Latzka, W., & Valeri, C. (1998). Thermal and cardiovascular strain from hypohydration: influence of exercise intensity. *International Journal of Sports Medicine*, 19(02), 87-91.
- Montain, S. J., & Coyle, E. F. (1992). Influence of graded dehydration on hyperthermia and cardiovascular drift during exercise. *Journal of Applied Physiology*, 73(4), 1340-1350.
- Montain, S. J., Laird, J. E., Latzka, W. A., & Sawka, M. N. (1997). Aldosterone and vasopressin responses in the heat: hydration level and exercise intensity effects. *Medicine and science in sports and exercise*, 29(5), 661-668.
- Montain, S. J., Latzka, W. A., & Sawka, M. N. (1995). Control of thermoregulatory sweating is altered by hydration level and exercise intensity. *Journal of Applied Physiology*, 79(5), 1434-1439.

- Morrison, S., Sleivert, G. G., & Cheung, S. S. (2004). Passive hyperthermia reduces voluntary activation and isometric force production. *European journal of applied physiology*, 91(5), 729-736.
- Moyen, N. E., Ganio, M. S., Wiersma, L. D., Kavouras, S. A., Gray, M., McDermott, B. P., Adams, J. D., Binns, A. P., Judelson, D. A., McKenzie, A. L., Johnson, E. C., Muñoz, C. X., Kunces, L. J., & Armstrong, L. E. (2015). Hydration status affects mood state and pain sensation during ultra-endurance cycling. *Journal of sports sciences*, 33(18), 1962-1969.
- Mudambo, K. S., Coutie, W., & Rennie, M. J. (1997). Plasma arginine vasopressin, atrial natriuretic peptide and brain natriuretic peptide responses to long-term field training in the heat: effects of fluid ingestion and acclimatization. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 75(3), 219-225.
- Muñoz, C. X., Carney, K. R., Schick, M. K., Coburn, J. W., Becker, A. J., & Judelson, D. A. (2012). Effects of oral rehydration and external cooling on physiology, perception, and performance in hot, dry climates. *Scand J Med Sci Sports*, 22(6), e115-124.
- Murray, S. R., Michael, T. J., & McClellan, P. D. (1995). The influence of fluid replacement rate on heart rate and RPE during exercise in a hot, humid environment. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 9(4), 251-254.
- Nadel, E. R., Fortney, S. M., & Wenger, C. B. (1980). Effect of hydration state of circulatory and thermal regulations. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol*, 49(4), 715-721.
- Nakamura, K., Brown, R. A., Araujo, D., Narayanan, S., & Arnold, D. L. (2014). Correlation between brain volume change and T2 relaxation time induced by dehydration and rehydration: implications for monitoring atrophy in clinical studies. *NeuroImage: Clinical*, 6, 166-70.
- Neal, R. A., Massey, H. C., Tipton, M. J., Young, J. S., & Corbett, J. (2016). Effect of permissive dehydration on induction and decay of heat acclimation, and temperate exercise performance. *Frontiers in physiology*, 7, 564.
- Nielsen B, Hyldig T, Bidstrup F, González-Alonso J, Christoffersen GR. (2001). Brain activity and fatigue during prolonged exercise in the heat. *Pflugers Arch*, 442(1), 41-8.
- Nielsen, B., Hales, J. R., Strange, S., Christensen, N. J., Warberg, J., & Saltin, B. (1993). Human circulatory and thermoregulatory adaptations with heat acclimation and exercise in a hot, dry environment. *The Journal of physiology*, 460(1), 467-485.

- Nielsen, B., Savard, G., Richter, E. A., Hargreaves, M., & Saltin, B. (1990). Muscle blood flow and muscle metabolism during exercise and heat stress. *J Appl Physiol*, *69*(3), 1040-1046.
- Noakes TD, St Clair Gibson A, Lambert EV. (2004). From catastrophe to complexity: a novel model of integrative central neural regulation of effort and fatigue during exercise in humans. *British journal of sports medicine*, *38* (4): 511-4.
- Noakes, T. D. (2008). Rating of perceived exertion as a predictor of the duration of exercise that remains until exhaustion. *British journal of sports medicine*, *42*(7), 623-624.
- Nybo, L., Jensen, T., Nielsen, B., & González-Alonso, J. (2001). Effects of marked hyperthermia with and without dehydration on VO<sub>2</sub> kinetics during intense exercise. *Journal of Applied Physiology*, *90*(3), 1057-1064.
- Nybo L, Nielsen B. (2001). Hyperthermia and central fatigue during prolonged exercise in humans. *Journal of Applied Physiology*, *91*(3), 1055-60.
- Ogino, Y., Kakeda, T., Nakamura, K., & Saito, S. (2014). Dehydration enhances pain-evoked activation in the human brain compared with rehydration. *Anesth Analg*, *118*(6), 1317-1325.
- Ogoh, S., Sato, K., Okazaki, K., Miyamoto, T., Hirasawa, A., Morimoto, K., & Shibasaki, M. (2013). Blood flow distribution during heat stress: cerebral and systemic blood flow. *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*, *33*(12), 1915-1920.
- OMS (2013). Quelle est la quantité d'eau nécessaire en situation d'urgence ? Fiches techniques eau, hygiène, et assainissement en situation d'urgence. Disponible à : [https://www.pseau.org/outils/ouvrages/oms\\_wedc\\_quelle\\_est\\_la\\_quantite\\_d\\_eau\\_necessaire\\_en\\_situation\\_d\\_urgence\\_2013.pdf](https://www.pseau.org/outils/ouvrages/oms_wedc_quelle_est_la_quantite_d_eau_necessaire_en_situation_d_urgence_2013.pdf)
- Onywera, V., Kiplamai, F., Tuitoek, P. J., Boit, M., & Pitsiladis, Y. (2004). Food and macronutrient intake of elite Kenyan distance runners. *International journal of sport nutrition and exercise metabolism*, *14*(6), 709-719.
- Pageaux, B., & Lepers, R. (2018). The effects of mental fatigue on sport-related performance. *Progress in brain research*, *240*, 291-315.
- Passe, D., Horn, M., Stofan, J., Horswill, C., & Murray, R. (2007). Voluntary dehydration in runners despite favorable conditions for fluid intake. *Int J Sport Nutr Exerc Metab*, *17*(3), 284-295.
- Perillan, C., Costales, M., Vijande, M., & Arguelles, J. (2008). In utero extracellular dehydration modifies thirst in neonatal rats. *Appetite*, *51*(3), 599-603.

- Périard, J.D., Caillaud, C. & Thompson, M.W. (2012). The role of aerobic fitness and exercise intensity on endurance performance in uncompensable heat stress conditions. *Eur J Appl Physiol*, 112, 1989-99.
- Périard, J., & Racinais, S. (2015). Heat stress exacerbates the reduction in middle cerebral artery blood velocity during prolonged self-paced exercise. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 25, 135-144.
- Périard, J., Racinais, S., & Sawka, M. N. (2015). Adaptations and mechanisms of human heat acclimation: applications for competitive athletes and sports. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 25, 20-38.
- Periard, J. D., Eijsvogels, T. M., & Daanen, H. A. (2021). Exercise under heat stress: thermoregulation, hydration, performance implications and mitigation strategies. *Physiological reviews*, 101(4), 1873-1979.
- Perrier, E. T., Armstrong, L. E., Bottin, J. H., Clark, W. F., Dolci, A., Guelinckx, I., ... & Péronnet, F. (2021). Hydration for health hypothesis: a narrative review of supporting evidence. *European journal of nutrition*, 60(3), 1167-1180.
- Perreault-Briere, M., Beliveau, J., Jeker, D., Deshayes, T. A., Duran, A., & Goulet, E. D. (2019). Effect of Thirst-Driven Fluid Intake on 1 H Cycling Time-Trial Performance in Trained Endurance Athletes. *Sports*, 7(10), 223.
- Perry, B. G., Bear, T. L. K., Lucas, S. J. E., & Mündel, T. (2016). Mild dehydration modifies the cerebrovascular response to the cold pressor test. *Exp Physiol*, 101(1), 135-142.
- Pethick, W. A., Murray, H. J., McFadyen, P., Brodie, R., Gaul, C. A., & Stellingwerff, T. (2019). Effects of hydration status during heat acclimation on plasma volume and performance. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 29(2), 189-199.
- Piil, J. F., Mikkelsen, C. J., Junge, N., Morris, N. B., & Nybo, L. (2019). Heat acclimation does not protect trained males from hyperthermia-induced impairments in complex task performance. *International journal of environmental research and public health*, 16(5), 716.
- Pugh, L. G., Corbett, J. L., & Johnson, R. H. (1967). Rectal temperatures, weight losses, and sweat rates in marathon running. *Journal of applied physiology*, 23(3), 347-352.
- Racinais, S., Ihsan, M., Taylor, L., Cardinale, M., Adami, P. E., Alonso, J. M., Bouscaren, N., Buitrago, S., Esh, C. J., & Gomez-Ezeiza, J. (2021). Hydration and cooling in elite athletes: relationship with performance, body mass loss and body temperatures during the Doha 2019 IAAF World Athletics Championships. *British journal of sports medicine*.

- Racinais, S., Wilson, M. G., Gaoua, N., & Périard, J. D. (2017). Heat acclimation has a protective effect on the central but not peripheral nervous system. *Journal of applied physiology*, *123*(4), 816-824.
- Radakovic, S. S., Maric, J., Surbatovic, M., Radjen, S., Stefanova, E., Stankovic, N., & Filipovic, N. (2007). Effects of acclimation on cognitive performance in soldiers during exertional heat stress. *Military medicine*, *172*(2), 133-136.
- Robertson, G. L. (1983). Thirst and vasopressin function in normal and disordered states of water balance. *The Journal of laboratory and clinical medicine*, *101*(3), 351-371.
- Robertson, G. L. (1984). Abnormalities of thirst regulation. *Kidney international*, *25*(2), 460-469.
- Robertson, R. J., & Noble, B. J. (1997). Perception of physical exertion: Methods, mediators, and applications. *Exercise and sport sciences reviews*, *25*(1), 407-452.
- Robinson, T. A., Hawley, J. A., Palmer, G. S., Wilson, G. R., Gray, D. A., Noakes, T. D., & Dennis, S. C. (1995). Water ingestion does not improve 1-h cycling performance in moderate ambient temperatures. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, *71*(2-3), 153-160.
- Rosinger, A. Y., Bethancourt, H. J., Swanson, Z. S., Lopez, K., Kenney, W. L., Huanca, T., Conde, E., Nzunza, R., Ndiema, E., Braun, D. R., Pontzer, H. (2021). Cross-cultural variation in thirst perception in hot-humid and hot-arid environments: Evidence from two small-scale populations. *American Journal of Human Biology*, e23715.
- Ross, M. G., & Desai, M. (2005). Gestational programming: Population survival effects of drought and famine during pregnancy. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, *288*(1), R25–R33.
- Saker, P., Carey, S., Grohmann, M., Farrell, M. J., Ryan, P. J., Egan, G. F., McKinley, M. J., & Denton, D. A. (2020). Regional brain responses associated with using imagination to evoke and satiate thirst. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *117*(24), 13750-13756.
- Sato, K. (1977). The physiology, pharmacology, and biochemistry of the eccrine sweat gland. In *Reviews of Physiology, Biochemistry and Pharmacology, Volume 79* (pp. 51-131). Springer.
- Sato, K., & Dobson, R. L. (1970). The effect of intracutaneous d-aldosterone and hydrocortisone on human eccrine sweat gland function. *Journal of Investigative Dermatology*, *54*(6), 450-462.

- Saunders, A., Dugas, J., Tucker, R., Lambert, M., & Noakes, T. (2005). The effects of different air velocities on heat storage and body temperature in humans cycling in a hot, humid environment. *Acta Physiologica Scandinavica*, 183(3), 241-255.
- Sawka, M., Knowlton, R., & Critz, J. (1979). Thermal and circulatory responses to repeated bouts of prolonged exercise. *J. Appl. Physiol*, 19, 833-838.
- Sawka, M., Montain, S., & Latzka, W. (1996). Body Fluid Balance During Exercise-Heat Stress.
- Sawka, M. N., Burke, L. M., Eichner, E. R., Maughan, R. J., Montain, S. J., & Stachenfeld, N. S. (2007). American College of Sports Medicine position stand. Exercise and fluid replacement. *Medicine and science in sports and exercise*, 39(2), 377-390.
- Sawka, M. N., Montain, S. J., & Latzka, W. A. (2001). Hydration effects on thermoregulation and performance in the heat. *Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol*, 128(4), 679-690.
- Sawka, M. N., & Noakes, T. D. (2007). Does dehydration impair exercise performance? *Med Sci Sports Exerc*, 39(8), 1209-1217.
- Sawka, M. N., Toner, M. M., Francesconi, R. P., & Pandolf, K. B. (1983). Hypohydration and exercise: effects of heat acclimation, gender, and environment. *Journal of Applied Physiology*, 55(4), 1147-1153.
- Sawka, M. N., Young, A. J., Francesconi, R. P., Muza, S. R., & Pandolf, K. B. (1985). Thermoregulatory and blood responses during exercise at graded hypohydration levels. *J Appl Physiol*, 59(5), 1394-1401.
- Sawka MN, Castellani JW, Chevront SN, Young AJ. Physiologic systems and their responses to conditions of heat and cold. In: Farrell PA, Joyner MJ, Caiozzo VJ, editors. ACSM's advanced exercise physiology. 2nd ed. Baltimore, MD: Wolters Kluwer/Lippincott Williams & Wilkins; 2012.
- Sawka, M. N., Chevront, S. N., & Kenefick, R. W. (2012). High skin temperature and hypohydration impair aerobic performance. *Experimental physiology*, 97(3), 327-332.
- Schleh, M. W., Ruby, B. C., & Dumke, C. L. (2018). Short term heat acclimation reduces heat stress, but is not augmented by dehydration. *Journal of thermal biology*, 78, 227-234.
- Schmit, C., Hausswirth, C., Le Meur, Y., & Duffield, R. (2017). Cognitive functioning and heat strain: performance responses and protective strategies. *Sports Medicine*, 47(7), 1289-1302.

- Schwimmer, H., Gerstberger, R., & Horowitz, M. (2004). Heat acclimation affects the neuromodulatory role of AngII and nitric oxide during combined heat and hypohydration stress. *Molecular Brain Research, 130*(1-2), 95-108.
- Schwimmer, H., Eli-Berchoer, L., & Horowitz, M. (2006). Acclimatory-phase specificity of gene expression during the course of heat acclimation and superimposed hypohydration in the rat hypothalamus. *Journal of Applied Physiology, 100*(6), 1992-2003.
- Sekiguchi, Y., Filep, E. M., Benjamin, C. L., Casa, D. J., & DiStefano, L. J. (2020). Does dehydration affect the adaptations of plasma volume, heart rate, internal body temperature, and sweat rate during the induction phase of heat acclimation?. *Journal of Sport Rehabilitation, 29*(6), 847-850.
- Sekiguchi, Y.; Benjamin, C.L.; Dion, S.O.; Manning, C.N.; Struder, J.F.; Dierickx, E.E.; Morrissey, M.C.; Filep, E.M.; Casa, D.J. (2021). Changes in Hydration Factors Over the Course of Heat Acclimation in Endurance Athletes. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab, 31*, 406–411.
- Shackman, A. J., Salomons, T. V., Slagter, H. A., Fox, A. S., Winter, J. J., & Davidson, R. J. (2011). The integration of negative affect, pain and cognitive control in the cingulate cortex. *Nature Reviews Neuroscience, 12*(3), 154-167.
- Sharma, V., Pichan, G., & Panwar, M. (1983). Differential effects of hot-humid and hot-dry environments on mental functions. *International archives of occupational and environmental health, 52*(4), 315-327.
- Sharma, V., Sridharan, K., Pichan, G., & Panwar, M. (1986). Influence of heat-stress induced dehydration on mental functions. *Ergonomics, 29*(6), 791-799.
- Sharwood, K., Collins, M., Goedecke, J., Wilson, G., & Noakes, T. (2004). Weight changes, medical complications, and performance during an Ironman triathlon. *British journal of sports medicine, 38*(6), 718-724.
- Shibasaki, M., Aoki, K., Morimoto, K., Johnson, J. M., & Takamata, A. (2009). Plasma hyperosmolality elevates the internal temperature threshold for active thermoregulatory vasodilation during heat stress in humans. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology, 297*(6), R1706-R1712.
- Shibasaki, M., & Crandall, C. G. (2010). Mechanisms and controllers of eccrine sweating in humans. *Frontiers in bioscience, 2*, 685.



- Shirreffs, S. M., Merson, S. J., Fraser, S. M., & Archer, D. T. (2004). The effects of fluid restriction on hydration status and subjective feelings in man. *British Journal of Nutrition*, 91(6), 951-958.
- Smith, K. J., Wong, L. E., Eves, N. D., Koelwyn, G. J., Smirl, J. D., Willie, C. K., & Ainslie, P. N. (2012). Regional cerebral blood flow distribution during exercise: influence of oxygen. *Respir Physiol Neurobiol*, 184(1), 97-105.
- St-Amand, A., & Saint-Jacques, M. C. (2013). Comment faire?. *Une méta-analyse, méthode agrégative de synthèse des connaissances. Centre de recherche sur l'adaptation des jeunes et des familles à risque, Université Laval.*
- Starkie, R. L., Hargreaves, M., Lambert, D. L., Proietto, J., & Febbraio, M. A. (1999). Effect of temperature on muscle metabolism during submaximal exercise in humans. *Exp Physiol*, 84(4), 775-784.
- Stillman, J. H. (2019). Heat waves, the new normal: summertime temperature extremes will impact animals, ecosystems, and human communities. *Physiology*, 34(2), 86-100.
- Streitbürger DP, Möller HE, Tittgemeyer M, Hund-Georgiadis M, Schroeter ML, Mueller K. (2012). Investigating structural brain changes of dehydration using voxel-based morphometry. *PLoS One*, 7(8):e44195.
- Suh, H., Lieberman, H. R., Jansen, L. T., Colburn, A. T., Adams, J., Seal, A. D., Butts, C. L., Kirkland, T. M., Melander, O., & Vanhaecke, T. (2021). Cellular dehydration acutely degrades mood mainly in women: a counterbalanced, crossover trial. *British Journal of Nutrition*, 125(10), 1092-1100.
- Szinnai, G., Schachinger, H., Arnaud, M. J., Linder, L., & Keller, U. (2005). Effect of water deprivation on cognitive-motor performance in healthy men and women. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*.
- Tan, B., Philipp, M. C., Che Muhamed, A. M., & Mundel, T. (2022). Hypohydration but not Menstrual Phase Influences Pain Perception in Healthy Women. *Journal of Applied Physiology*.
- Takamata, A., Nagashima, K., Nose, H., & Morimoto, T. (1997). Osmoregulatory inhibition of thermally induced cutaneous vasodilation in passively heated humans. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 273(1), R197-R204.
- Takamata, A., Nagashima, K., Nose, H., & Morimoto, T. (1998). Role of plasma osmolality in the delayed onset of thermal cutaneous vasodilation during exercise in humans. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 275(1), R286-R290.

- Tan, X. R., Low, I. C. C., Byrne, C., Wang, R., & Lee, J. K. W. (2021). Assessment of dehydration using body mass changes of elite marathoners in the tropics. *Journal of Science and Medicine in Sport*.
- Thiel, C., Pfeifer, K., & Sudeck, G. (2018). Pacing and perceived exertion in endurance performance in exercise therapy and health sports. *German Journal of Exercise and Sport Research*, 48(1), 136-144.
- Thomas MM, Cheung SS, Elder GC, Sleivert GG. (2006). Voluntary muscle activation is impaired by core temperature rather than local muscle temperature. *J Appl Physiol*, 100(4):1361-9.
- Thompson, C., Bland, J., Burd, J., & Baylis, P. (1986). The osmotic thresholds for thirst and vasopressin release are similar in healthy man. *Clinical Science*, 71(6), 651-656.
- Trangmar, S. J., Chiesa, S. T., Llodio, I., Garcia, B., Kalsi, K. K., Secher, N. H., & González-Alonso, J. (2015). Dehydration accelerates reductions in cerebral blood flow during prolonged exercise in the heat without compromising brain metabolism. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 309(9), H1598-H1607.
- Trangmar, S. J., Chiesa, S. T., Stock, C. G., Kalsi, K. K., Secher, N. H., & González-Alonso, J. (2014). Dehydration affects cerebral blood flow but not its metabolic rate for oxygen during maximal exercise in trained humans. *J Physiol*, 592(14), 3143-3160.
- Travers, G., Nichols, D., Riding, N., González-Alonso, J., & Périard, J. D. (2020). Heat acclimation with controlled heart rate: influence of hydration status. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 52(8), 1815-1824.
- UN-Water, 2021: Summary Progress Update 2021 – SDG 6 – water and sanitation for all. Version: July 2021. Geneva, Switzerland.
- van den Heuvel, A. M. J., Haberley, B. J., Hoyle, D. J. R., Taylor, N. A. S., & Croft, R. J. (2017, 2017/05/01). The independent influences of heat strain and dehydration upon cognition. *European Journal of Applied Physiology*, 117(5), 1025-1037.
- Wade, C. E., & Claybaugh, J. R. (1980). Plasma renin activity, vasopressin concentration, and urinary excretory responses to exercise in men. *Journal of Applied Physiology*, 49(6), 930-936.
- Walsh, R. M., Noakes, T. D., Hawley, J. A., & Dennis, S. C. (1994). Impaired high-intensity cycling performance time at low levels of dehydration. *Int J Sports Med*, 15(7), 392-398.

- Wang, Z., Deurenberg, P., Wang, W., Pietrobelli, A., Baumgartner, R., & Heymsfield, S. (1999). Hydration of fat-free body mass: Review and critique of a classic body-composition constant. *American Journal of Clinical Nutrition*, 69(5), 833-841.
- Watanabe, K., Stöhr, E. J., Akiyama, K., Watanabe, S., & González-Alonso, J. (2020). Dehydration reduces stroke volume and cardiac output during exercise because of impaired cardiac filling and venous return, not left ventricular function. *Physiol Rep*, 8(11), e14433.
- Watson, P., Black, K. E., Clark, S. C., & Maughan, R. J. (2006). Exercise in the heat: effect of fluid ingestion on blood-brain barrier permeability. *Med Sci Sports Exerc*, 38(12), 2118-24.
- Watson P, Head K, Pitiot A, Morris P, Maughan RJ. (2010). Effect of exercise and heat-induced hypohydration on brain volume. *Med Sci Sports Exerc*, 42(12), 2197-204.
- Wenger, C. B. (1972). Heat of evaporation of sweat: thermodynamic considerations. *Journal of Applied Physiology*, 32(4), 456-459.
- Wilson, T. E., Cui, J., Zhang, R., & Crandall, C. G. (2006). Heat stress reduces cerebral blood velocity and markedly impairs orthostatic tolerance in humans. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 291(5), R1443-R1448.
- Wingo, J. E., Crandall, C. G., & Kenny, G. P. (2018). Human heat physiology. In *Sport and Physical Activity in the Heat* (pp. 15-30). Springer.
- Wittbrodt, M. T., & Millard-Stafford, M. (2018). Dehydration impairs cognitive performance: a meta-analysis. *Med Sci Sports Exerc*, 50(11), 2360-2368.
- Wittbrodt, M. T., Millard-Stafford, M., Sherman, R. A., & Cheatham, C. C. (2015). Fluid replacement attenuates physiological strain resulting from mild hypohydration without impacting cognitive performance. *International journal of sport nutrition and exercise metabolism*, 25(5), 439-447.
- Wittbrodt, M. T., Sawka, M. N., Mizelle, J. C., Wheaton, L. A., & Millard-Stafford, M. L. (2018). Exercise-heat stress with and without water replacement alters brain structures and impairs visuomotor performance. *Physiological reports*, 6(16), e13805.
- Zerbe, R., Miller, J., & Robertson, G. (1991). The reproducibility and heritability of individual differences in osmoregulatory function in normal human subjects. *The Journal of laboratory and clinical medicine*, 117(1), 51-59.
- Zouhal, H., Groussard, C., Minter, G., Vincent, S., Cretual, A., Gratas-Delamarche, A., Delamarche, P., & Noakes, T. D. (2011). Inverse relationship between percentage

body weight change and finishing time in 643 forty-two-kilometre marathon runners. *British journal of sports medicine*, 45(14), 1101-1105.

Zouhal, H., Groussard, C., Vincent, S., Jacob, C., Abderrahman, A., Delamarche, P., & Gratas-Delamarche, A. (2009). Athletic performance and weight changes during the " Marathon of Sands" in athletes well-trained in endurance. *International journal of sports medicine*, 30(7), 516.