

Quelles adaptations physiologiques sont induites par le heat training chez le sportif et quelles stratégies nutritionnelles pour soutenir ces adaptations ?

MEYER Robin

Bachelor of Science Nutrition Sportive

3ème année

Aix-en-Provence

Physiologie et Métabolisme, Nutrition Sportive

Sommaire

Introduction	1
I. Protocoles d'entraînement en conditions de chaleur (Heat Training)	2
1. Types de protocoles : passifs et actifs.....	2
2. Intégration avec l'entraînement en altitude	2
3. Durée, intensité et organisation des protocoles	3
II. Impacts et réponses physiologiques au heat training	3
1. Thermorégulation et adaptations induites par le heat training.....	3
2. Adaptation du stress oxydatif et inflammation.....	4
3. Adaptations cardiovasculaires	5
4. Augmentation du volume plasmique	6
5. Augmentation de la masse de l'hémoglobine.....	6
6. Impacts métaboliques	7
III. Stratégies nutritionnelles, micronutritionnelles et hydratation	8
1. Évaluations, tests biologiques et corrections des éventuels déficits	8
2. Point important sur l'hydratation et l'apport en sodium	8
3. Phase initiale d'exposition à la chaleur (1 à 7 jours).....	9
4. Phase d'acclimatation avancée ($\geq 7-10$ jours)	11
5. Attention à la disponibilité énergétique (EA)	12
6. Aides ergogéniques pendant l'acclimatation	12
7. Adaptation et individualisation des stratégies	13
IV. L'acclimatation à la chaleur chez l'athlète féminine	13
Conclusion	15
Abstract	16
Bibliographie	17
Annexes	20

Introduction

Au cours des dernières années, le heat training, ou entraînement en conditions de chaleur, s'est progressivement imposé comme une nouvelle tendance dans les sports d'endurance. Initialement utilisé dans un objectif d'acclimatation à des environnements chauds, notamment en préparation de compétitions estivales, il est aujourd'hui envisagé comme un outil d'optimisation de la performance, parfois en complément, voire en alternative, à l'entraînement en altitude, offrant de moindres contraintes logistiques et budgétaires.

Les objectifs du heat training sont multiples. Le principal est tout d'abord d'améliorer la tolérance à la chaleur par des adaptations thermorégulatrices telles qu'une sudation plus efficace et une diminution de la dérive cardiovasculaire. Plus récemment, il est également utilisé dans une perspective d'amélioration de la performance en conditions tempérées, via des adaptations cardiovasculaires et hématologiques, notamment l'augmentation du volume plasmatique et des modifications du transport de l'oxygène, pouvant inclure une augmentation de la masse d'hémoglobine qui se rapprochent de l'entraînement en hypoxie. Cependant, l'exposition répétée à la chaleur constitue une contrainte physiologique importante pour l'organisme. Elle induit des perturbations hydriques, électrolytiques, métaboliques et inflammatoires susceptibles d'altérer la récupération, la performance et la santé de l'athlète si elles ne sont pas correctement anticipées. Dans ce contexte, une réponse optimale au heat training repose sur une évaluation rigoureuse des valeurs biologiques et de l'état de stress physiologique de l'athlète ainsi que sur la mise en place de stratégies nutritionnelles et d'hydratation adaptées et individualisées. Ces dernières incluent la gestion des apports énergétiques, des électrolytes et des macro et micronutriments clés.

Dès lors, il convient de s'interroger sur les mécanismes sous-jacents à cette méthode d'entraînement et sur les leviers nutritionnels permettant d'en optimiser les bénéfices. **Quelles adaptations physiologiques sont induites par le heat training chez le sportif et quelles stratégies nutritionnelles pour soutenir ces adaptations ?**

Afin de répondre à cette problématique, ce travail s'articulera autour de quatre axes : la présentation des protocoles d'entraînement en conditions de chaleur, l'analyse des réponses physiologiques induites, l'étude des stratégies nutritionnelles et d'hydratation associées, et enfin l'exploration des spécificités de l'athlète féminine face au heat training.

I. Protocoles d'entraînement en conditions de chaleur (Heat Training)

Le heat training (HT) regroupe l'ensemble des méthodes visant à exposer de manière répétée l'organisme à des conditions thermiquement stressantes, dans le but d'induire des adaptations physiologiques améliorant la tolérance à la chaleur et, potentiellement, la performance en endurance. On distingue principalement deux concepts : la *heat acclimatization*, correspondant à une exposition à la chaleur en environnement naturel, et la *heat acclimation*, réalisée dans des conditions contrôlées en laboratoire ou à l'aide de dispositifs spécifiques. Ces derniers permettent une standardisation du stimulus thermique, ce qui est particulièrement utile dans les contextes d'entraînement de haut niveau. [1], [2].

1. Types de protocoles : passifs et actifs

Les protocoles de HT peuvent être classés en protocoles actifs versus protocoles passifs. Les protocoles actifs consistent à réaliser des séances d'exercice en environnement chaud, généralement à intensité modérée, afin d'augmenter la température corporelle centrale et de stimuler les adaptations thermorégulatrices et cardiovasculaires. Ces protocoles sont considérés comme les plus efficaces pour induire des adaptations complètes, notamment chez les athlètes d'endurance. [1], [3]

Les protocoles passifs d'acclimatation à la chaleur consistent en une exposition thermique sans exercice, le plus souvent après une séance réalisée en conditions tempérées, via des bains chauds, des saunas ou le port de vêtements thermiques. D'après Heathcote et Al [4], ces méthodes permettent de maintenir une température corporelle élevée sans augmenter la charge mécanique, favorisant ainsi certaines adaptations thermorégulatrices, notamment l'expansion du volume plasmatique et l'amélioration de la tolérance à la chaleur. Ces adaptations restent moins élevées qu'avec la méthode active.

Le schéma en annexe 1, synthétise clairement les différentes méthodes.

2. Intégration avec l'entraînement en altitude

Un intérêt récent du HT réside dans sa capacité à compléter ou prolonger des adaptations induites par un stage en altitude. L'altitude est traditionnellement utilisée pour stimuler une augmentation de la masse d'hémoglobine (Hb mass) via l'hypoxie, mais ces effets tendent à décroître rapidement après le retour au niveau de la mer. L'étude de Rønnestad et al. (2025) montre que, chez des cyclistes d'élite revenant d'un stage en altitude de trois semaines, la mise en place de trois séances hebdomadaires de heat training pendant 3,5 semaines permet de préserver l'augmentation de la masse d'hémoglobine acquise en altitude, alors qu'elle diminue significativement chez les athlètes qui reprennent un entraînement classique sans chaleur. [5]

Ce type de stratégie illustre une application pratique combinée : dans un scénario typique pour une équipe cycliste professionnelle, les athlètes peuvent réaliser des séances de HT à la fin de leurs sorties pendant un stage en altitude (par exemple en mai) puis maintenir ces séances de chaleur après le retour au niveau de la mer, jusqu'à leur objectif majeur que peut représenter le Tour de France début juillet. Cette approche permet non seulement de prolonger des adaptations hématologiques favorables à la performance, mais aussi de maintenir des stimuli thermiques permettant d'être parfaitement adapté aux conditions estivales du mois de juillet.

3. Durée, intensité et organisation des protocoles

La durée, la fréquence et l'intensité des séances sont des éléments clés pour l'efficacité d'un protocole de heat training (HT). Selon Périard et al.[1], des résultats commencent à apparaître après 3 à 5 jours d'exposition régulière à la chaleur, ce qui correspond à une phase initiale d'acclimatation partielle.

Pour une acclimatation complète, la littérature recommande généralement 7 à 14 jours consécutifs de séances quotidiennes ou presque [2], [3]. Entre 1 et 5 jours, on retrouve les premières adaptations majeures, de 8 à 14 jours une consolidation de ces adaptations et au-delà de 14 jours les adaptations sont maximales.[6]

La fréquence idéale se situe autour de 5 à 7 séances par semaine, selon la tolérance de l'athlète et le contexte d'entraînement. [7] Chaque séance dure généralement entre 60 et 90 minutes, avec une intensité adaptée pour augmenter la température corporelle centrale sans générer de fatigue excessive [8]. Cette organisation permet de maximiser le stimulus thermique tout en restant compatible avec les autres charges d'entraînement et la récupération.

Pour une compétition précise, Racinais et Al préconise de faire 2 semaines d'acclimatation à la chaleur un mois avant le jour J et faire un rappel d'une ou deux semaines juste avant la compétition.[3]

En ce qui concerne les protocoles passifs, la littérature conseille 6 à 21 jours consécutifs, avec 30 à 60 minutes par séance pour le sauna ou l'immersion en eau chaude, parfois jusqu'à 2 séances par jour. L'acclimatation est renforcée si ces sessions passives sont réalisées après un entraînement modéré, permettant d'élever la température corporelle plus rapidement et de maximiser le stimulus thermique. [4] A noter que les bénéfices du HT sont rapidement réversibles puisqu'on constate une diminution des adaptations d'environ 2.5% par jour sans exposition à la chaleur et en deux semaines sans chaleur, une perte de 30-35% des adaptations.[6]

II. Impacts et réponses physiologiques au heat training

1. Thermorégulation et adaptations induites par le heat training

L'acclimatation à la chaleur induit des adaptations physiologiques majeures visant à améliorer la thermorégulation lors de l'exercice en environnement chaud. Ces adaptations permettent de limiter l'élévation de la température corporelle et de réduire la contrainte cardiovasculaire.

a. Adaptations thermorégulatrices

Le HT améliore l'efficacité des mécanismes de dissipation de la chaleur, notamment par une vasodilatation cutanée plus précoce et plus importante. Pour une intensité d'exercice donnée, les individus acclimatés présentent une élévation plus faible de la température centrale et cutanée, traduisant une meilleure tolérance au stress thermique.[9] Dans leur étude, Xu et Al indiquent qu'après 4 semaines d'acclimatation à la chaleur, la température corporelle du groupe ayant suivi l'acclimatation à la chaleur était significativement plus faible de 0.4°C par rapport au groupe contrôle ($38.2^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ vs. $38.6^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$, $p = 0.045$), les résultats sont présentés sur les graphiques en annexe 2. [10]

b. Débit sudoral et réactivité de la sudation

L'une des principales adaptations observées est l'augmentation du débit sudoral total et local après plusieurs jours d'exposition à la. Xu et Al, indiquent dans leur étude une augmentation de 21% du taux de sudation suite au HT (voir graphique annexe 2).[10] Cette augmentation permet d'optimiser la dissipation de la chaleur par évaporation.

Par ailleurs, la sudation devient plus réactive : elle débute pour une température centrale plus basse et augmente plus rapidement avec l'élévation de la charge thermique [11]. Cette réponse sudomotrice anticipée limite l'accumulation excessive de chaleur corporelle.

c. Pertes électrolytiques

Rappelons que la sueur est hypotonique par rapport au plasma. Ainsi, la sudation entraîne une perte proportionnellement plus importante d'eau que de sodium, favorisant une augmentation de l'osmolalité plasmatique lors de la déshydratation conduisant à des mouvements d'eau depuis le compartiment intracellulaire vers l'extracellulaire.

Malgré l'augmentation du volume de sueur produit, l'acclimatation à la chaleur s'accompagne d'une diminution de la concentration en électrolytes dans la sueur, en particulier en sodium et en chlorure; [11] Dans leur article, Bueno et Al, rapportent une diminution de 45% de perte en sodium après 7 jours de HT comme nous pouvons le voir visuellement sur le graphique en annexe 3.[12] Cette adaptation résulte d'une amélioration de la réabsorption ionique au niveau des glandes sudoripares, permettant de limiter les pertes électrolytiques nettes. De plus, selon Chinevere et Al, après 10 jours d'acclimatation à la chaleur, les concentrations sudorales de calcium (~29 %), de cuivre (~50 %) et de magnésium (~43 %) étaient significativement réduites par rapport au jour 1. [13]

d. Intérêt pour le sportif

Ces adaptations contribuent à une meilleure tolérance à l'effort en conditions chaudes, à une réduction du risque d'hyperthermie et à une gestion plus efficace de l'hydratation et des électrolytes, soulignant l'intérêt du HT dans la préparation du sportif pour des compétitions en conditions chaudes.

2. Adaptation du stress oxydatif et inflammation

La chaleur augmente le stress oxydatif principalement en élevant la température musculaire, ce qui accélère le métabolisme et la production de ROS¹ dans les mitochondries. Elle perturbe également la chaîne respiratoire et augmente l'utilisation du glycogène et du métabolisme anaérobie, altérant l'équilibre redox. La déshydratation et les pertes électrolytiques favorisent une hypoperfusion tissulaire transitoire, renforçant la génération de ROS et donc de stress oxydatif.[6], [14]

a. Modulation des marqueurs du stress oxydatif

Kaldur et Al, constataient une augmentation des peroxydes total de +27% et de l'Indice de Stress Oxydatif (OSI) +29% lors d'un exercice en chaleur sans acclimatation. Après 10 jours d'acclimatation, le stress oxydatif était plus élevé au repos (total peroxydes et OSI) mais l'OSI diminuait après l'exercice à la chaleur

¹ Espèces réactives de l'oxygène

au lieu d'augmenter. En revanche, on constate une diminution des LDL oxydés (oxLDL) et une légère augmentation des statuts en anti-oxydants de l'organisme après l'acclimatation à la chaleur. Tous ces données sont visibles sur les graphiques en annexe 4. Cela suggère que l'acclimatation rend l'organisme moins réactif au stress oxydatif induit par l'effort en chaleur, malgré un niveau de stress oxydatif au repos plus élevé.[15]

b. Adaptations mitochondriales

Au niveau musculaire, Hafen et Al ont relevé une augmentation en protéines mitochondriales (Complexe I, Complexe V dans la chaîne respiratoire) et PGC-1 α ², suggérant une biogenèse mitochondriale. Ces augmentations sembleraient liées à l'augmentation de la phosphorylation de l'AMPK et d'ERK1/2, deux voies clés pour la biogenèse mitochondriale et la protection contre le stress oxydatif. [6]

c. Heat Shock Protein (HSP)

Au niveau cellulaire, l'entraînement à la chaleur augmente l'expression des protéines de choc thermique (HSP), qui jouent un rôle central dans la protection des protéines, la stabilité membranaire et la survie cellulaire. Selon Hafen et Al HSP70 augmente de 45% et HSP90 de 38% après 6 jours d'exposition à la chaleur (voir graphique en annexe 5). [14]. Ces protéines améliorent la tolérance au stress thermique, oxydatif et inflammatoire. L'acclimatation favorise également une amélioration de la fonction mitochondriale et une diminution de la production de ROS lors de l'exercice, contribuant à une meilleure gestion du stress oxydatif.

d. Inflammation

À l'instar du stress oxydatif, l'exercice en condition de chaleur induit une augmentation de l'inflammation systémique, comme en témoigne l'élévation du hsCRP³, qui reste élevée même après une séance de HT. En revanche, l'acclimatation à la chaleur entraîne une diminution significative de MCP-1⁴, suggérant une atténuation de la réponse inflammatoire. Par ailleurs, lors d'un exercice en chaleur, les cytokines inflammatoires, notamment l'IL-6, augmentent temporairement, mais un entraînement régulier et un bon niveau de forme physique peuvent moduler cette réponse, comme le montrent les tendances opposées observées chez les sujets non acclimatés (+17,9 %) et acclimatés (-18,9 %) après le test en chaleur.[15]

3. Adaptations cardiovasculaires

L'une des principales adaptations après le HT est une diminution significative de la fréquence cardiaque (FC) pour une même intensité. Dans leur étude, Travers et Al rapportaient une diminution de la fréquence cardiaque d'environ -10 ± 5 bpm en fin de période d'acclimatation par rapport au début. [16] Cette adaptation cardiovasculaire s'explique par plusieurs facteurs.

Parmi les principaux, on peut citer un maintien voire une amélioration du débit cardiaque. Ceci s'explique notamment par une augmentation de la compliance du ventricule gauche, qui facilite le remplissage

² Peroxisome proliferator-activated receptor gamma coactivator 1-alpha

³ Protéine C-Réactive de haute sensibilité

⁴ Monocyte Chemoattractant Protein-1

diastolique. Cela se traduit par une augmentation du volume télédiastolique et du volume d'éjection systolique (stroke volume). Par ailleurs, l'augmentation des volumes ventriculaire et atrial gauches améliore la capacité du cœur à gérer des flux sanguins plus élevés.[17] Ces adaptations sont présentées sur les graphiques en annexe 6.[9]

De plus, on retrouve une redistribution du flux sanguin favorisant une vasodilatation cutanée accrue mais après acclimatation, on constate un meilleur équilibre entre perfusion cutanée et musculaire. Les muscles ont donc globalement plus de sang pour fonctionner après acclimatation et le système cardiovasculaire est plus efficace.[18]

Les adaptations thermorégulatrices permettant une élévation moins importante de la température corporelle contribuent elles aussi à la diminution de la FC.

L'augmentation du volume plasmatique améliore le retour veineux et le remplissage cardiaque, ce qui augmente le volume d'éjection systolique et permet de maintenir le débit cardiaque avec une fréquence cardiaque plus basse.

4. Augmentation du volume plasmique

L'augmentation du volume plasmique constitue l'adaptation majeure de l'acclimatation à la chaleur. La sudation importante lors des premières séances de HT va conduire à une hypovolémie transitoire déclenchant les mécanismes physiologiques adaptatifs à ce stress thermique.

Rapidement les mécanismes se mettent en place conduisant à une augmentation non négligeable du volume plasmique. Ainsi, Nielsen et al. ont observé une augmentation du volume plasmatique de 13% après 9-12 jours d'entraînement intensif à 40°C.[19] De même, Lorenzo et al. ont rapporté une augmentation de 6,5% après 10 jours d'exercice léger à 40°C [20], et Keiser et al. (2015) une augmentation d'environ 6% après 10 jours de heat training. [21]

L'augmentation du volume plasmatique observée avec l'acclimatation à la chaleur s'explique principalement par trois mécanismes principaux. Le premier est une rétention accrue de sodium et d'eau, via l'adaptation rénale et hormonale (système rénine-angiotensine-aldostérone et vasopressine), qui augmente l'eau extracellulaire et plasmatique.[18] Le second est une augmentation du contenu protéique intravasculaire, en particulier de l'albumine, qui augmente la pression oncotique et attire l'eau dans le compartiment sanguin. [22]. Le troisième est une redistribution des fluides corporels, avec expansion coordonnée du liquide interstitiel et des volumes plasmatique/extracellulaire. [23]

5. Augmentation de la masse de l'hémoglobine

L'augmentation de la masse de l'hémoglobine (Hbmass) représente la deuxième adaptation majeure et celle qui motive particulièrement les sportifs de suivre un protocole d'entraînement à la chaleur. En effet, elle détermine la capacité du sang à transporter l'oxygène vers les muscles, ce qui est essentiel pour maintenir la production d'ATP⁵ lors de l'exercice et optimiser la performance aérobie.

⁵Adénosine Triphosphate = « Monnaie énergétique »

Oberholzer et Al rapportent une augmentation de 3% de l'Hbmass après 5 semaines d'acclimatation à la chaleur soit + 34g. [24]. De leur côté, Rønnestad et Al, ont relevé une augmentation d'environ 5% après la même durée d'acclimatation.[25]

Les mécanismes qui expliquent cette augmentation sont étroitement lié avec l'augmentation du volume plasmique. Cette dernière provoque une hémodilution transitoire, créant une hypoxie relative au niveau rénal qui stimule modérément mais de façon répétée la production d'érythropoïétine (EPO), entraînant progressivement une augmentation de la masse globulaire et de l'hémoglobine totale.[26] Il est important de noter que l'hématocrite reste stable, car l'augmentation concomitante du volume plasmatique dilue le sang. Autrement dit, le sang contient plus de globules rouges et d'hémoglobine au total, mais la proportion relative de cellules dans le volume sanguin reste à peu près la même.

Les modifications du volume plasmique et de l'Hbmass sont visibles sur les graphiques en annexe 7.

6. Impacts métaboliques

Sur le plan métabolique, la chaleur induit une augmentation de l'oxydation des glucides endogènes, en particulier du glycogène musculaire, traduisant une plus grande dépendance aux réserves glucidiques de l'organisme. L'augmentation de la fréquence cardiaque donc des besoins énergétique et l'élévation des taux d'adrénaline semblerait jouer un rôle important dans ce processus.[27] En revanche, plusieurs études montrent que l'oxydation des glucides exogènes (ingérés pendant l'exercice) est réduite en conditions chaudes, probablement en raison d'une diminution du débit sanguin intestinal, d'une altération de la vidange gastrique et d'une absorption intestinale compromise.[27] Jentjens et Al ont mesuré une augmentation de 25% de l'oxydation du glycogène musculaire avec une diminution significative de l'utilisation des glucides exogènes et une légère diminution de l'utilisation des lipides.[28]. D'un point de vue énergétique, le stress thermique conduit logiquement à une augmentation de la dépense énergétique mais aussi à une augmentation de la production de lactate concomitante avec un flux sanguin diminué au niveau musculaire donc moins d'oxygène disponible. L'utilisation accrue du glycogène contribue également à augmenter ce paramètre. Enfin, dans leur Meta analyse, Mougín et Al ont montré que l'élévation de la température corporelle est le facteur déterminant de l'augmentation de l'utilisation des glucides pendant l'exercice d'endurance, tandis que la déshydratation (~2-4%) agit comme un facteur amplificateur.[29]

Xu et Al ont montré qu'après 4 semaines d'acclimatation à la chaleur, les coureurs entraînés montrent une diminution de l'oxydation totale des glucides (jusqu'à -19 % à 75 % $\dot{V}O_{2max}$ et -15 % à 85 % $\dot{V}O_{2max}$), ce qui traduit une utilisation plus efficace du glycogène musculaire et une diminution des besoins lors de l'exercice submaximal en chaleur. Les adaptations thermorégulatrices et cardiovasculaires contribuent fortement à ce mécanisme puisqu'elles diminuent le coût énergétique de l'effort (graphiques en annexe 10).

De plus, les seuils ventilatoires (VT1 et VT2) augmentent, ce qui signifie que les coureurs peuvent travailler à une intensité plus élevée avant de basculer dans le métabolisme anaérobie.

Cette amélioration est associée à un retard dans l'accumulation de lactate pendant l'exercice, suggérant une meilleure oxygénation musculaire et une plus grande efficacité métabolique. Enfin, le taux de clairance

du lactate à 5 et 9 minutes du test d'effort en chaleur est augmenté, ce qui confirme que l'acclimatation à la chaleur améliore la capacité des muscles à évacuer le lactate, soutenant l'endurance et retardant la fatigue comme on peut le voir sur les graphiques en annexe 11. [11]

Concernant l'oxydation des glucides exogènes, malheureusement aucunes études actuelles n'ont évalué l'évolution de la capacité oxydative au cours de l'acclimatation à la chaleur.

Les annexes 8 et 9 résument les adaptations principales.

III. Stratégies nutritionnelles, micronutritionnelles et hydratation

Les stratégies nutritionnelles et d'hydratation dans le cadre du heat training doivent être envisagées comme évolutives. Les adaptations physiologiques induites par l'acclimatation à la chaleur modifient progressivement les besoins énergétiques, glucidiques et électrolytiques du sportif pour une même charge de travail.

1. Évaluations, tests biologiques et corrections des éventuels déficits

La réalisation de bilans biologiques chez le sportif présente un intérêt majeur avant d'entamer une phase d'acclimatation à la chaleur. Le contrôle du statut martial est essentiel, le fer étant l'un des constituants principaux de l'hémoglobine et conditionnant directement la synthèse des globules rouges. Sachant que les athlètes d'endurance présentent un risque accru de carence. L'évaluation du statut inflammatoire et du stress oxydatif permet d'identifier une fatigue biologique sous-jacente ou un déséquilibre entre charge d'entraînement et capacités de récupération. Enfin, les marqueurs de perméabilité intestinales peuvent également être intéressant à contrôler. Dépister et corriger ces déficits en amont permet d'optimiser les adaptations physiologiques à la chaleur, de limiter le risque de contre-performance et de préserver la santé du sportif. En particulier, un déficit en fer nécessitera une supplémentation qui pourra être poursuivie au cours de l'acclimatation à la chaleur afin de favoriser les adaptations hémodynamiques.

2. Point important sur l'hydratation et l'apport en sodium

De nombreuses études ont exploré l'impact d'une légère déshydratation permissive volontaire (< 2-3%) pour accentuer l'acclimatation à la chaleur. Les résultats restent toutefois controversés : la plupart des travaux montrent que, sur des périodes d'acclimatation suffisamment longues, la déshydratation n'apporte aucun avantage significatif par rapport à une euhydratation. Seules les études de courte durée (≤ 5 jours) ou sans groupe contrôle « euhydraté » suggèrent un possible bénéfice, en accélérant certaines réponses hormonales et cardiovasculaires. Dans une perspective pratique, maintenir l'euhydratation est préférable pour préserver les performances et limiter les risques liés à la déshydratation, tout en permettant la répétition des séances.

L'expansion du volume plasmatique, adaptation centrale à la chaleur, repose surtout sur des mécanismes physiologiques non liés à l'hydratation aiguë : augmentation de la synthèse d'albumine plasmique, amélioration de la pression oncotique et réduction des pertes capillaires, complétées par des adaptations rénales. Ainsi, l'hydratation influence peu l'ampleur finale de cette adaptation lorsque l'exposition

thermique est suffisante. L'unique avantage d'une déshydratation permissive serait dans le cas d'une acclimatation de courte durée pour accélérer les processus d'adaptations. [3] [6] [7] [8] [27] [30] [31] [32] Concernant le sodium, peu d'études récentes sont disponibles. Les travaux plus anciens montrent que l'acclimatation se réalise de manière similaire avec des apports faibles ou élevés. Une consommation réduite en sodium déclenche une réponse hormonale intense (aldostérone et rénine) pour limiter les pertes, ce qui, bien que plus coûteux physiologiquement, permet d'atteindre une expansion du volume plasmatique et des capacités de thermorégulation équivalentes à celles d'un régime riche en sel.[33] [34] En pratique, il est donc recommandé de favoriser une euhydratation raisonnable et des apports en sodium adaptés aux pertes, plutôt que de chercher à induire volontairement une déshydratation ou une surcharge sodée.

3. Phase initiale d'exposition à la chaleur (1 à 7 jours)

Comme vu précédemment, la phase initiale d'exposition à la chaleur entraîne une augmentation du coût énergétique, une plus forte sollicitation des glucides endogènes, une baisse de l'efficacité d'oxydation des glucides exogènes, ainsi qu'une diminution du volume plasmatique et des pertes électrolytiques importantes. On constate également une augmentation des troubles digestifs. Les stratégies nutritionnelles et d'hydratation auront donc pour objectif de compenser ces pertes et besoins accrus.

a. Avant la séance

Sur le plan énergétique, il est donc recommandé d'augmenter les apports en glucides au cours des repas précédant la séance, afin d'optimiser les réserves de glycogène musculaire et hépatique, de limiter la fatigue précoce et de préserver la qualité des séances durant cette phase initiale. Les apports glucides devront être d'environ 7-8 g/kg/jour mais ces valeurs seront à individualiser en fonction de la personne, de la durée et intensité de l'effort. Chez un athlète qui n'est absolument pas acclimaté à la chaleur, les glucides pourront représenter jusqu'à 80% de l'apport énergétique total. Un repas pré-exercice riche en glucides facilement digestibles est recommandé, tout en limitant les fibres et les glucides fermentescibles afin de réduire le risque de troubles gastro-intestinaux sous stress thermique. [27]

Les apports protéiques doivent être maintenus dans une fourchette haute, soit environ 1,4 à 1.8 g/kg/jour, afin de soutenir la balance protéique dans un contexte de charge interne élevée et de potentiel déficit énergétique transitoire mais aussi pour favoriser les adaptations physiologiques notamment l'augmentation de la masse de d'hémoglobine et aussi de l'albumine.

Les lipides devront être diminué par rapport à la normal pour favoriser les glucides dans la ration et limiter les troubles digestifs. Une attention particulière avant les séances à limiter les graisses animales qui pourraient accentuer les troubles digestifs.

Enfin, lors des premiers jours d'acclimatation, l'augmentation rapide de la sudation justifie une légère majoration des apports en sodium, notamment via les repas. Saler modérément les plats et intégrer des aliments naturellement salés permet de soutenir la rétention hydrique et l'équilibre électrolytique, sans interférer avec les mécanismes adaptatifs liés à l'exposition à la chaleur.

En ce qui concerne l'hydratation, l'objectif sera de maintenir un état d'euhydratation en amont de la séance sans « sur-hydratation ». Pour l'apport en sodium, Dunn et Al suggèrent dans leur article de consommer

20-40 mg de sodium 1-2h avant l'exercice mais cette stratégie semble favoriser la thermorégulation et la performance à l'instant t en augmentant le volume plasmique d'environ 5% mais pourrait diminuer les réponses physiologiques recherchées.[35]. Il s'agira donc d'augmenter modérément l'apport en sodium journalier d'environ 3-4g/jour pour soutenir les adaptations sans les limiter.[27] Il sera intéressant de se peser avant et après la séance pour mesurer le têt de déshydratation (méthode de double pesée).

b. Pendant la séance

Pour la partie nutrition, la diminution de la capacité de l'organisme a oxydé les glucides exogènes ainsi l'augmentation des troubles digestifs sont à prendre en compte. Il s'agira de diminuer légèrement la consommation de glucides pendant l'effort et de favoriser les formes buvables telles que les boissons avec plusieurs sources de glucides avec un ratio glucose : fructose de 2:1 ou 1:0.8 ([36] [37]) et d'éviter les formes très concentrées telles que les gels.[35] Au-delà de l'énergie, les glucides exogènes jouent un rôle protecteur. La consommation de glucides pendant l'effort contribue au maintien de l'intégrité de la barrière épithéliale intestinale, limitant ainsi le passage d'endotoxines responsables de la réponse inflammatoire.

Elle participe également à la diminution de la production de cytokines pro-inflammatoires, contribuant à moduler la réponse inflammatoire liée à l'exercice.[38]

En ce qui concerne l'hydratation, l'objectif sera une fois de plus de rester « euhydraté » pendant la séance via les boissons de l'effort et un apport en sodium pour compenser les pertes importantes. Dunn et al. soulignent l'intérêt de boissons contenant du sodium lors de l'exercice en condition de chaleur afin de soutenir la rétention hydrique et le maintien du volume plasmatique. Les concentrations rapportées dans la littérature synthétisée par les auteurs se situent généralement autour de 300 à 600 mg/L.[35]

c. Après la séance

Les objectifs seront de reconstituer les réserves de glycogène, restaurer l'état hydrique et le volume plasmique et optimiser la récupération musculaire. Dans leur étude de 5 jours, Goto et Al ont montré qu'une consommation de ~0.36g de protéines/kg et 3.6 kcal/kg de glucides dans les 10min après la séance d'entraînement à la chaleur permettaient d'augmenter les adaptations physiologiques par rapport au groupe placebo. En effet, l'augmentation du volume plasmique a été 2 fois plus importante dans le groupe consommant une collation riche en protéines et glucides que dans le groupe placebo. Il y a également une amélioration des adaptations thermorégulatrices et cardiovasculaires, notamment la gestion de la chaleur (meilleure sudation et vasodilatation) et la réduction du stress cardiaque pendant l'exercice.[39] (voir annexe 12).

La réhydratation post-exercice doit viser 125 à 150% des pertes hydriques avec des boissons contenant du sodium afin de favoriser la rétention des fluides qui pourra être contrôlée par la méthode de double pesée en évitant de perdre plus de 2% de sa masse corporelle.

Les repas qui suivent la séance devront être eux aussi riches en glucides, protéines et limités en fibres, lipides et aliments riches en FODMAPs et apporter suffisamment de sodium.

4. Phase d'acclimatation avancée ($\geq 7-10$ jours)

À partir de la deuxième semaine d'acclimatation, les adaptations thermorégulatrices deviennent plus marquées, avec une augmentation du volume plasmatique, une diminution de la fréquence cardiaque et de la température centrale à charge équivalente, ainsi qu'une amélioration de la tolérance gastro-intestinale. Finalement, l'organisme utilise moins les réserves de glycogène lorsqu'il est acclimaté. Les stratégies nutritionnelles peuvent alors être progressivement être adaptées.

a. Avant la séance

Les apports glucidiques peuvent être diminués et ajustés à la charge réelle d'entraînement, généralement autour de 6 à 7 g/kg/jour, tandis que les apports protéiques peuvent être stabilisés à 1,4 à 1,8 g/kg/jour. La tolérance digestive étant améliorée, l'apport en fibres et aliments contenant des FODMAPs pourra être revu à la hausse ainsi que l'apport en lipides bien que les graisses animales seront encore à éviter en pré séance.

Les stratégies hydriques deviennent plus individualisées, basées sur le débit sudoral, avec un retour progressif vers des apports sodés habituels lorsque l'adaptation est suffisante [27].

b. Pendant la séance

L'hydratation et l'apport glucidique doivent être en corrélation avec les exigences spécifiques de la discipline. Un apport glucidique de 30 à 60g/h reste pertinent, en particulier lors d'exercices $>70\%$ VO_2max , où l'oxydation glucidique demeure élevée même chez les athlètes acclimatés [27]

Cette phase constitue également une période clé pour tester et valider les stratégies nutritionnelles de compétition en conditions de chaleur.

Malheureusement, aucune étude actuelle ne s'est intéressée à l'évolution de la capacité oxydative des glucides au cours de l'acclimatation à la chaleur. Mais nous pouvons supposer que celle-ci s'améliore au fur et à mesure de l'acclimatation donc une augmentation de l'apport en glucides exogènes semble envisageable afin de se rapprocher des valeurs en conditions thermo-neutres.

La stratégie d'euhydratation demeure prioritaire. Il est important de souligner que les besoins hydriques restent élevés, voire augmentent après acclimatation à la chaleur, en raison d'une capacité de sudation accrue, entraînant des pertes hydriques plus importantes pendant l'effort. En revanche, l'apport en sodium peut être progressivement réduit, puisque l'organisme devient plus efficace pour limiter les pertes électrolytiques.

c. Après la séance

La prise de collation riche en protéines et glucides reste pertinente pour maintenir les adaptations et favoriser la récupération.

Il faut continuer à faire attention de ne pas perdre plus de 2% de sa masse corporelle via la méthode de double pesée et compenser 125 à 150% des pertes hydriques dans les heures qui suivent les séances. Comme en amont, les repas qui suivent les séances pourront être légèrement moins riches en glucides et sodium qu'avant l'acclimatation et contenir plus de fibres, lipides et aliments riches en FODMAPs. L'apport en protéines devra être maintenu.

Tableau récapitulatif

	Jours 1 à Jour 7	Jours ≥ 7–10 jours
Energie	Augmentation	Tendance à un retour à la normale
Glucides	7 à 8 g/kg/jour (à individualiser)	6 à 7 g/kg/jour (à individualiser)
Protéines	1,4 à 1,8 g/kg/jour	
Lipides	<p align="center">< 20% de l'AET⁶</p> <ul style="list-style-type: none"> - Diminuer car priorité aux glucides - Limiter les graisses animales pour éviter les troubles digestifs surtout en amont des séances - Privilégier les lipides végétaux de bonne qualité. 	Augmenter pour combler les besoins énergétiques.
Hydratation	Apport suffisant pour maintenir l'euhydration et limiter les pertes à l'exercice à ≤ 2% de la masse corporelle (double pesée)	
Glucides à l'effort	<ul style="list-style-type: none"> - Diminuer et favoriser boisson avec plusieurs sources de glucides et ratio glucose : fructose de 2:1 ou 1:0.8 - Limiter les formes très concentrées types gels 	Augmenter en fonction de la tolérance et capacité d'oxydation individuelles
Collation	Collation riche en glucides et protéines de suite après (boisson de récupération recommandée)	
Autres	Peu de fibres, limiter les FODMAPs ; sodium modéré augmenté	Augmenter progressivement les fibres, FODMAPs et réduire le sodium vers le niveau de base.

5. Attention à la disponibilité énergétique (EA)

Le stress thermique est associé à une diminution spontanée de l'apport énergétique, indépendamment de l'exercice, via des mécanismes hormonaux et centraux de régulation de l'appétit. La chaleur pourrait ralentir la clairance de la leptine, prolongeant le signal de satiété, tandis que l'exposition répétée à des environnements chauds, notamment dans le cadre de protocoles d'acclimatation à la chaleur, peut accentuer ce phénomène. En conséquence, lors de plusieurs jours consécutifs de chaleur, il existe un risque accru de réduction de la disponibilité énergétique (EA), définie comme le rapport entre l'énergie consommée et l'énergie dépensée à l'exercice rapporté à la masse maigre. Cette baisse de l'EA peut survenir rapidement, parfois sans modification du poids corporel, en raison d'adaptations métaboliques masquant un déficit énergétique. Une EA insuffisante est susceptible d'altérer des marqueurs clés de la santé et de la performance (IGF-1, stocks de glycogène, hormones anabolisantes, synthèse protéique), ce qui souligne l'importance de surveiller spécifiquement les apports énergétiques lors d'expositions répétées à la chaleur, même en l'absence de signes cliniques évidents.

6. Aides ergogéniques pendant l'acclimatation

L'usage de suppléments durant l'acclimatation à la chaleur reste une stratégie dont l'intérêt réel est encore débattu, faute de preuves et d'études solides. Si certaines substances comme la créatine (via

⁶ AET = Apport Énergétique Total

l'hyperhydratation) semblent théoriquement cohérentes, leur capacité à améliorer concrètement le processus d'acclimatation n'est pas formellement démontrée. L'utilisation d'aides comme la caféine, les nitrates ou les antioxydants comportent même des zones d'ombre : elles pourraient soit augmenter la contrainte thermique, soit, dans le cas des antioxydants, potentiellement limiter l'adaptation à la chaleur.[35]

D'après une revue systématique et méta-analyse, le menthol et la taurine peuvent améliorer le confort et l'endurance lors d'une exposition aiguë mais l'absence de protocoles standardisés et d'études sur le long terme empêche de confirmer leur efficacité réelle pour optimiser les adaptations chroniques durant l'acclimatation à la chaleur.

La glutamine, grâce à son rôle protecteur et réparateur de la membrane intestinale pourrait tout à fait être pertinente afin de limiter les troubles digestifs et d'améliorer l'absorption des glucides. [40]

7. Adaptation et individualisation des stratégies

L'acclimatation à la chaleur induit des adaptations physiologiques variables d'un athlète à l'autre, ce qui rend indispensable une individualisation des stratégies d'entraînement et de nutrition en fonction des capacités et du profil physiologique de chacun. Les réponses thermorégulatrices, cardiovasculaires et métaboliques au stress thermique dépendent notamment du niveau d'entraînement, du sexe, de la composition corporelle, du statut d'acclimatation initial et des caractéristiques de sudation et d'oxydation des substrats. Dans ce contexte, la réalisation de tests de capacité d'oxydation des glucides avant et après la phase d'acclimatation apparaît particulièrement pertinente afin d'ajuster précisément les quantités et les formes de glucides ingérées pendant les séances et les compétitions en environnement chaud, où la dépendance aux glucides peut être accentuée. De la même manière, l'utilisation de tests d'analyse individuelle de la sudation, notamment via des capteurs permettant d'évaluer les pertes hydriques et électrolytiques avant, pendant et après l'acclimatation, permet de personnaliser les apports en électrolytes durant la phase d'acclimatation et d'élaborer des stratégies d'hydratation et de compensation sodée spécifiques aux séances et compétitions en conditions chaudes.[41] Cette approche individualisée vise à optimiser la tolérance à la chaleur, à limiter les perturbations physiologiques liées à la déshydratation et aux déséquilibres électrolytiques, et à maximiser la performance tout en réduisant le risque de troubles gastro-intestinaux et de stress thermique excessif.

IV. L'acclimatation à la chaleur chez l'athlète féminine

La majorité de la littérature sur l'acclimatation à la chaleur est basée sur des hommes, seulement 13 % des sujets des études incluses sont des femmes. Très peu de travaux contrôlent le statut hormonal ou la phase du cycle menstruel malgré leurs potentiels effets sur la thermorégulation. [42]

Chez les femmes, la thermorégulation présente certaines spécificités physiologiques susceptibles d'influencer la réponse au stress thermique et les adaptations à l'acclimatation à la chaleur. Comparativement aux hommes, les femmes présentent en moyenne une sudation absolue plus faible, un temps de réactivité de la transpiration plus long, une température cutanée plus élevée et une fréquence

cardiaque plus importante lors d'un exercice en environnement chaud, en particulier avant acclimatation. Ces différences semblent davantage liées à des facteurs morphologiques, hormonaux et de composition corporelle qu'à une capacité réduite d'adaptation. Le seuil de déshydratation est plus faible chez les femmes puisqu'elles disposent d'un volume d'eau corporelle (donc volume plasmique) plus faible.[43] Malgré cela, lorsque la condition physique et l'exposition thermique sont équivalentes, les femmes sont capables de développer des adaptations thermorégulatrices efficaces.

La littérature récente montre que l'acclimatation à la chaleur chez les femmes induit des adaptations physiologiques comparables à celles observées chez les hommes, notamment une diminution de la température centrale et cutanée via une amélioration de la sudation, une réduction de la fréquence cardiaque à l'effort, ainsi qu'une amélioration de la réponse sudorale, traduisant une meilleure dissipation de la chaleur.

Au-delà des adaptations thermorégulatrices, l'entraînement en chaleur sur des périodes prolongées peut également induire des adaptations hématologiques bénéfiques chez les femmes. Chez des cyclistes d'élite, un programme de 5 semaines d'entraînement en chaleur a permis une augmentation significative de la masse totale d'hémoglobine, associée à des améliorations de la $VO_2\text{max}$, du seuil lactique et de la performance, sans différences majeures entre femmes et hommes. [44] Ces adaptations suggèrent que l'acclimatation à la chaleur peut améliorer la performance non seulement en environnement chaud, mais également dans des conditions tempérées.

En revanche, contrairement à ce qui est fréquemment observé chez les hommes, l'expansion du volume plasmique n'apparaît pas systématique chez les femmes.[45] Même si d'autres articles montrent malgré tout une augmentation du volume plasmique après l'exposition à la chaleur. En effet, Lundby et Al ont trouvé une augmentation de 7,5% du volume plasmique (graphique en annexe 14). [44]

La durée et la dose thermique apparaissent comme des déterminants majeurs de l'efficacité de l'acclimatation chez les femmes. Une étude clé a montré que 4 jours d'acclimatation ne suffisent pas à améliorer la performance d'endurance auto-régulée, tandis que 9 jours d'exposition thermique induisent des gains significatifs de puissance, de distance parcourue et de vitesse en conditions chaudes. [46] Ces résultats sont cohérents avec la méta-analyse de Kelly et Al, qui indique que les adaptations physiologiques et de performance deviennent plus significatives lorsque l'exposition cumulée dépasse 8 à 14 jours et que la dose thermique totale est élevée.

Concernant les stratégies d'hydratation et nutritionnelle, nous pouvons appliquer les mêmes que les stratégies générales ci-dessus mais en prenant en compte l'importance de l'individualisation et de la connaissance des variations hormonales de l'athlète et de leurs conséquences physiologiques.

Conclusion

Le heat training s'affirme aujourd'hui comme une stratégie incontournable de l'optimisation de la performance en endurance dans le sport de haut niveau et professionnel. Initialement cantonné à la simple acclimatation pour des épreuves caniculaires, il est désormais reconnu pour ses bénéfices hématologiques et cardiovasculaires, agissant comme un véritable "boost" physiologique comparable, sous certains aspects, à l'entraînement en altitude.

L'analyse des mécanismes physiologiques a mis en lumière deux adaptations majeures : l'expansion du volume plasmatique, qui améliore la stabilité cardiovasculaire, et l'augmentation de la masse d'hémoglobine, qui optimise le transport de l'oxygène. Parallèlement, l'amélioration de l'efficacité sudorale et la modulation du stress oxydatif permettent à l'athlète de repousser ses limites thermiques et métaboliques.

Cependant, l'efficacité de cette méthode repose sur une synergie étroite avec la nutrition et l'hydratation. Comme nous l'avons vu, le passage d'une phase de stress initial à une phase d'acclimatation avancée exige un ajustement précis des apports :

- La priorité aux glucides et au sodium lors des premiers jours pour compenser le coût métabolique élevé et les pertes électrolytiques.
- L'importance de l'euidratation et des collations post-effort (glucides + protéines) pour maximiser l'expansion plasmatique.
- La surveillance de la disponibilité énergétique, afin d'éviter que le stress thermique ne masque un déficit calorique préjudiciable à la santé et à la récupération.

En ce qui concerne les aides ergogéniques, trop peu d'études ont été menées pour mesurer leurs potentiels bénéfiques pour l'acclimatation à la chaleur et les résultats restent trop flous pour en tirer des conclusions. Enfin, l'étude des spécificités de l'athlète féminine souligne la nécessité d'une approche nuancée. Si les femmes développent des adaptations de performance similaires aux hommes, leurs particularités morphologiques et hormonales imposent une individualisation des protocoles et un suivi rigoureux.

Le heat training est un outil puissant mais exigeant. Son intégration réussie dans le calendrier d'un sportif de haut niveau ne peut se faire sans une individualisation rigoureuse, s'appuyant sur des analyses biologiques régulières, une stratégie nutritionnelle évolutive et des tests de capacité d'oxydation des glucides et pertes sudorales. L'avenir de cette stratégie d'entraînement réside probablement dans une meilleure compréhension de la capacité individuelle d'oxydation des glucides et des pertes sudorales au cours de l'acclimatation. Au-delà de l'adaptation thermique, l'exploration de la porosité intestinale à l'effort ouvre des perspectives prometteuses. En limitant cette altération, il deviendrait possible de sécuriser l'apport énergétique et l'absorption des glucides, palliant ainsi l'une des défaillances critiques rencontrées par l'athlète en ambiance chaude.

Abstract

Title: Heat Training in Endurance Sports: Physiological Mechanisms, Nutritional Strategies, and Performance Optimization.

Context: Initially designed for environmental acclimatization, heat training (HT) has emerged as a potent tool for performance enhancement in both hot and temperate conditions. While its benefits are well-documented, the significant thermal stress it imposes on the body necessitates precise nutritional and physiological management to be effective.

Objectives: This study analyzes the primary adaptations induced by HT—including thermoregulatory, cardiovascular, hematological, and metabolic responses—and defines specific nutritional and hydration strategies to maximize gains while preserving athlete health. It further explores these mechanisms through the lens of the female athlete.

Key Findings:

Physiological Adaptations: HT triggers a significant expansion of plasma volume (6–13%) and an increase in total hemoglobin mass (3–5%), enhancing oxygen transport and cardiovascular stability. Improved sweat efficiency (increased sweat rate and reduced sodium loss) and the expression of Heat Shock Proteins (HSPs) further bolster tolerance to thermal and oxidative stress.

Nutritional Strategies: The initial phase (Days 1–5) requires an increase in carbohydrate (7–8 g/kg/day) and sodium intake to offset higher metabolic costs and transient hypovolemia. In the long term, acclimation leads to metabolic efficiency and glycogen sparing. Early post-exercise recovery (protein + carbohydrate intake) is identified as a critical factor, potentially doubling the magnitude of plasma volume expansion.

Female Athletes: Female athletes develop performance adaptations comparable to their male counterparts, although plasma volume expansion appears less systematic. A minimum exposure of 8 to 9 days is required to achieve significant performance gains in women.

Conclusion: Heat training serves as a viable alternative or a powerful complement to altitude training. Success depends on the rigorous individualization of protocols (active vs. passive methods) and precise monitoring of energy availability (EA) to prevent overtraining and metabolic fatigue.

Keywords: Heat Acclimation, Performance, Endurance, Plasma Volume, Sports Nutrition, Hydration, Female Athlete.

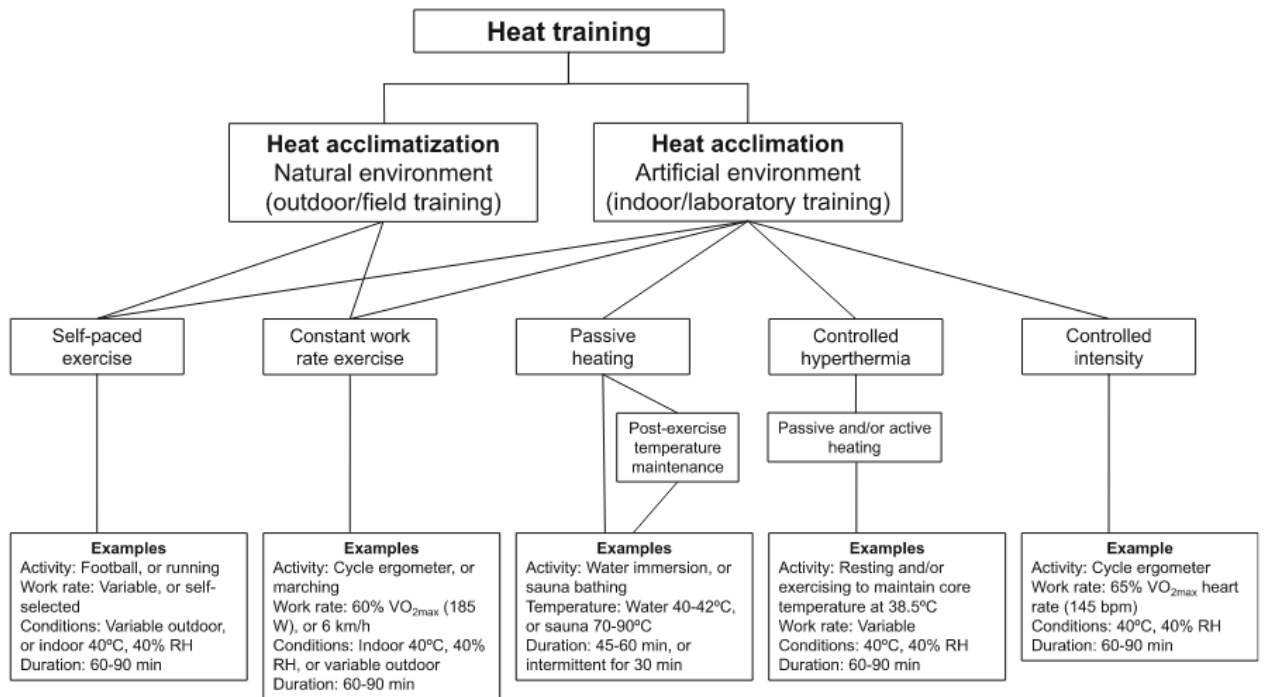
Bibliographie

- [1] J. D. Périard, S. Racinais, et M. N. Sawka, « Adaptations and mechanisms of human heat acclimation: Applications for competitive athletes and sports », *Scandinavian Med Sci Sports*, vol. 25, n° S1, p. 20-38, juin 2015, doi: 10.1111/sms.12408.
- [2] H. A. M. Daanen, S. Racinais, et J. D. Périard, « Heat Acclimation Decay and Re-Induction: A Systematic Review and Meta-Analysis », *Sports Med*, vol. 48, n° 2, p. 409-430, févr. 2018, doi: 10.1007/s40279-017-0808-x.
- [3] S. Racinais *et al.*, « Consensus recommendations on training and competing in the heat », *Br J Sports Med*, vol. 49, n° 18, p. 1164-1173, sept. 2015, doi: 10.1136/bjsports-2015-094915.
- [4] S. L. Heathcote, P. Hassmén, S. Zhou, et C. J. Stevens, « Passive Heating: Reviewing Practical Heat Acclimation Strategies for Endurance Athletes », *Front. Physiol.*, vol. 9, déc. 2018, doi: 10.3389/fphys.2018.01851.
- [5] B. R. Rønnestad, I. Odden, T. Urianstad, J. Hansen, K. S. Mølmen, et D. A. Cardinale, « Heat Suit Training Preserves the Increased Hemoglobin Mass after Altitude Camp in Elite Cyclists », *Med Sci Sports Exerc*, vol. 57, n° 1, p. 81-87, janv. 2025, doi: 10.1249/MSS.0000000000003542.
- [6] J. D. Périard, T. M. H. Eijssvogels, et H. A. M. Daanen, « Exercise under heat stress: thermoregulation, hydration, performance implications, and mitigation strategies », *Physiological Reviews*, vol. 101, n° 4, p. 1873-1979, oct. 2021, doi: 10.1152/physrev.00038.2020.
- [7] R. A. Neal, H. C. Massey, M. J. Tipton, J. S. Young, et J. Corbett, « Effect of Permissive Dehydration on Induction and Decay of Heat Acclimation, and Temperate Exercise Performance », *Front. Physiol.*, vol. 7, nov. 2016, doi: 10.3389/fphys.2016.00564.
- [8] A. T. Garrett *et al.*, « Short-term heat acclimation is effective and may be enhanced rather than impaired by dehydration », *American J Hum Biol*, vol. 26, n° 3, p. 311-320, mai 2014, doi: 10.1002/ajhb.22509.
- [9] « Heat Acclimatization to Improve Athletic Performance in Warm-Hot Environments », Gatorade Sports Science Institute. Consulté le: 8 janvier 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.gssiweb.org/sports-science-exchange/article>
- [10] Y. Xu, C. Ye, S. Ma, et B. Gao, « Four-week heat acclimation lowers carbohydrate oxidation of trained runners during submaximal exercise in the heat », *Front. Physiol.*, vol. 16, juill. 2025, doi: 10.3389/fphys.2025.1581594.
- [11] S. K. Delves, J. S. Kelly, M. Gledhill, R. Warke, et J. L. Fallowfield, « The effect of acclimation to the heat on the resting sweat response », *Extrem Physiol Med*, vol. 4, n° Suppl 1, p. A118, sept. 2015, doi: 10.1186/2046-7648-4-S1-A118.
- [12] M. J. Buono *et al.*, « Heat acclimation causes a linear decrease in sweat sodium ion concentration », *Journal of Thermal Biology*, vol. 71, p. 237-240, janv. 2018, doi: 10.1016/j.jtherbio.2017.12.001.
- [13] T. D. Chinevere, R. W. Kenefick, S. N. Cheuvront, H. C. Lukaski, et M. N. Sawka, « Effect of Heat Acclimation on Sweat Minerals », *Medicine & Science in Sports & Exercise*, vol. 40, n° 5, p. 886, mai 2008, doi: 10.1249/MSS.0b013e3181641c04.
- [14] P. S. Hafen, C. N. Preece, J. R. Sorensen, C. R. Hancock, et R. D. Hyldahl, « Repeated exposure to heat stress induces mitochondrial adaptation in human skeletal muscle », *Journal of Applied Physiology*, vol. 125, n° 5, p. 1447-1455, nov. 2018, doi: 10.1152/jappphysiol.00383.2018.
- [15] T. Kaldur *et al.*, « Effects of Heat Acclimation on Changes in Oxidative Stress and Inflammation Caused by Endurance Capacity Test in the Heat », *Oxid Med Cell Longev*, vol. 2014, p. 107137, 2014, doi: 10.1155/2014/107137.
- [16] G. Travers, D. Nichols, N. Riding, J. González-Alonso, et J. D. Périard, « Heat Acclimation with Controlled Heart Rate: Influence of Hydration Status », *Med Sci Sports Exerc*, vol. 52, n° 8, p. 1815-1824, août 2020, doi: 10.1249/MSS.0000000000002320.
- [17] I. T. Parsons *et al.*, « Echocardiographic changes following active heat acclimation », *J Therm Biol*, vol. 93, p. 102705, oct. 2020, doi: 10.1016/j.jtherbio.2020.102705.
- [18] J. D. Périard, G. J. S. Travers, S. Racinais, et M. N. Sawka, « Cardiovascular adaptations supporting human exercise-heat acclimation », *Autonomic Neuroscience*, vol. 196, p. 52-62, avr. 2016, doi: 10.1016/j.autneu.2016.02.002.
- [19] B. Nielsen, J. R. Hales, S. Strange, N. J. Christensen, J. Warberg, et B. Saltin, « Human circulatory and thermoregulatory adaptations with heat acclimation and exercise in a hot, dry environment. », *J Physiol*, vol. 460, p. 467-485, janv. 1993, doi: 10.1113/jphysiol.1993.sp019482.

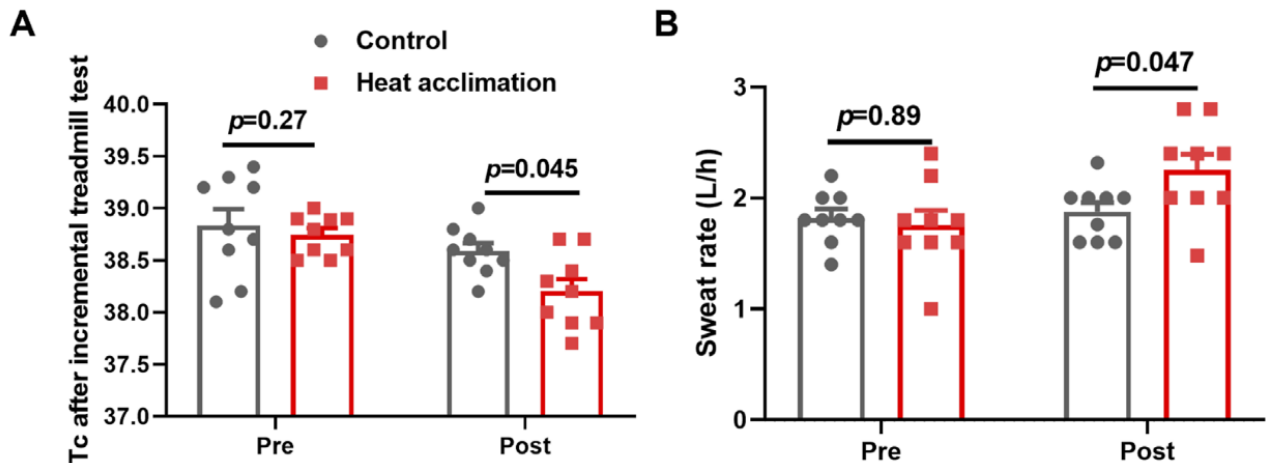
- [20] S. Lorenzo, J. R. Halliwill, M. N. Sawka, et C. T. Minson, « Heat acclimation improves exercise performance », *J Appl Physiol* (1985), vol. 109, n° 4, p. 1140-1147, oct. 2010, doi: 10.1152/jappphysiol.00495.2010.
- [21] « Heat training increases exercise capacity in hot but not in temperate conditions: a mechanistic counter-balanced cross-over study | American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology | American Physiological Society ». Consulté le: 17 janvier 2026. [En ligne]. Disponible sur: https://journals.physiology.org/doi/full/10.1152/ajpheart.00138.2015?rfr_dat=cr_pub++0pubmed&url_ver=Z39.88-2003&rfr_id=ori%3Arid%3Aacrossref.org
- [22] M. H. Harrison, R. J. Edwards, M. J. Graveney, L. A. Cochrane, et J. A. Davies, « Blood volume and plasma protein responses to heat acclimatization in humans », *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol*, vol. 50, n° 3, p. 597-604, mars 1981, doi: 10.1152/jappl.1981.50.3.597.
- [23] M. J. Patterson, J. M. Stocks, et N. A. S. Taylor, « Sustained and generalized extracellular fluid expansion following heat acclimation », *J Physiol*, vol. 559, n° Pt 1, p. 327-334, août 2004, doi: 10.1113/jphysiol.2004.063289.
- [24] L. Oberholzer *et al.*, « Hematological Adaptations to Prolonged Heat Acclimation in Endurance-Trained Males », *Front Physiol*, vol. 10, p. 1379, 2019, doi: 10.3389/fphys.2019.01379.
- [25] B. R. Rønnestad *et al.*, « Five weeks of heat training increases haemoglobin mass in elite cyclists », *Experimental Physiology*, vol. 106, n° 1, p. 316-327, 2021, doi: 10.1113/EP088544.
- [26] E. J. Jenkins, B. A. Edgett, M. G. Hughes, J. C. Tremblay, et M. Stemberge, « Mechanisms of haemoglobin mass expansion following heat stress », doi: 10.1113/JP288997.
- [27] P. Rosbrook, L. Margolis, et J. L. Pryor, « Nutritional Considerations in Exercise-Based Heat Acclimation: A Narrative Review », *Sports Medicine*, vol. 54, p. 3005-3017, août 2024, doi: 10.1007/s40279-024-02109-x.
- [28] R. Jentjens, A. Wagenmakers, et A. Jeukendrup, « Heat stress increases muscle glycogen use but reduces the oxidation of ingested carbohydrates during exercise », *Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, vol. 92, p. 1562-72, mai 2002, doi: 10.1152/jappphysiol.00482.2001.
- [29] L. Mougín, H. Z. Macrae, L. Taylor, L. J. James, et S. A. Mears, « The Effect of Heat Stress and Dehydration on Carbohydrate Use During Endurance Exercise: A Systematic Review and Meta-Analysis », *Sports Med*, vol. 55, n° 11, p. 2825-2847, nov. 2025, doi: 10.1007/s40279-025-02294-3.
- [30] « Importance of Electrolytes in Exercise Performance and Assessment Methodology After Heat Training: A Narrative Review ». Consulté le: 21 décembre 2025. [En ligne]. Disponible sur: https://www.mdpi.com/2076-3417/14/22/10103?utm_source=chatgpt.com
- [31] W. A. Pethick, H. J. Murray, P. McFadyen, R. Brodie, C. A. Gaul, et T. Stellingwerff, « Effects of hydration status during heat acclimation on plasma volume and performance », *Scandinavian Med Sci Sports*, vol. 29, n° 2, p. 189-199, févr. 2019, doi: 10.1111/sms.13319.
- [32] Y. Sekiguchi, E. M. Filep, C. L. Benjamin, D. J. Casa, et L. J. DiStefano, « 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*, vol. 29, n° 6, p. 847-850, janv. 2020, doi: 10.1123/jsr.2019-0174.
- [33] A. J. Allsopp, « The effects of dietary sodium intake on heat acclimation and thermoregulation during heat exposure », phd, University of Southampton, 1997. Consulté le: 27 janvier 2026. [En ligne]. Disponible sur: https://eprints.soton.ac.uk/462993/?utm_source=chatgpt.com
- [34] I. of M. (US) C. on M. N. Research et B. M. Marriott, « Endocrinological Responses to Dietary Salt Restriction During Heat Acclimation », in *Nutritional Needs in Hot Environments: Applications for Military Personnel in Field Operations*, National Academies Press (US), 1993. Consulté le: 27 janvier 2026. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK236228/>
- [35] R. A. Dunn, G. M. Tinsley, T. B. Palmer, C. L. Benjamin, et Y. Sekiguchi, « The Efficacy of Nutritional Strategies and Ergogenic Aids on Acute Responses and Chronic Adaptations to Exertional-Heat Exposure: A Narrative Review », *Nutrients*, vol. 16, n° 22, p. 3792, nov. 2024, doi: 10.3390/nu16223792.
- [36] W. J. O'Brien, S. R. Stannard, J. A. Clarke, et D. S. Rowlands, « Fructose–Maltodextrin Ratio Governs Exogenous and Other CHO Oxidation and Performance », *Medicine & Science in Sports & Exercise*, vol. 45, n° 9, p. 1814, sept. 2013, doi: 10.1249/MSS.0b013e31828e12d4.
- [37] Z. G. Dezfuli *et al.*, « Comparing the Effects of Glucose-Fructose versus Glucose on the Oxidation Rate: A Systematic Review and Meta-Analysis », *ijph*, avr. 2025, doi: 10.18502/ijph.v54i4.18411.
- [38] S. Chantler, A. Griffiths, J. Matu, G. Davison, A. Holliday, et B. Jones, « A systematic review: Role of dietary supplements on markers of exercise-associated gut damage and permeability », *PLoS One*, vol. 17, n° 4, p. e0266379, avr. 2022, doi: 10.1371/journal.pone.0266379.

- [39] M. Goto *et al.*, « Protein and carbohydrate supplementation during 5-day aerobic training enhanced plasma volume expansion and thermoregulatory adaptation in young men », *Journal of Applied Physiology*, vol. 109, n° 4, p. 1247-1255, oct. 2010, doi: 10.1152/jappphysiol.00577.2010.
- [40] J. Li *et al.*, « Effects of Nutritional Supplements on Endurance Performance and Subjective Perception in Athletes Exercising in the Heat: A Systematic Review and Network Meta-Analysis », *Nutrients*, vol. 17, n° 13, p. 2141, janv. 2025, doi: 10.3390/nu17132141.
- [41] B. Carrier *et al.*, « Evaluation of Exertional Sweat Loss Estimates in Wearable Technology », *Sports Health*, p. 19417381251388642, nov. 2025, doi: 10.1177/19417381251388642.
- [42] M. K. Kelly *et al.*, « Auditing the Representation of Females Versus Males in Heat Adaptation Research », *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, vol. 34, n° 2, p. 111-121, janv. 2024, doi: 10.1123/ijsnem.2023-0186.
- [43] S. Stacy, *Roar*.
- [44] « Hematological, skeletal muscle fiber, and exercise performance adaptations to heat training in elite female and male cyclists | Journal of Applied Physiology | American Physiological Society ». Consulté le: 15 décembre 2025. [En ligne]. Disponible sur: https://journals.physiology.org/doi/full/10.1152/jappphysiol.00115.2023?rfr_dat=cr_pub++0pubmed&url_ver=Z39.88-2003&rfr_id=ori%3Arid%3Aacrossref.org
- [45] M. K. Kelly *et al.*, « Heat Adaptation for Females: A Systematic Review and Meta-Analysis of Physiological Adaptations and Exercise Performance in the Heat », *Sports Med*, vol. 53, n° 7, p. 1395-1421, juill. 2023, doi: 10.1007/s40279-023-01831-2.
- [46] N. V. Kirby, S. J. E. Lucas, et R. A. I. Lucas, « Nine-, but Not Four-Days Heat Acclimation Improves Self-Paced Endurance Performance in Females », *Front. Physiol.*, vol. 10, mai 2019, doi: 10.3389/fphys.2019.00539.

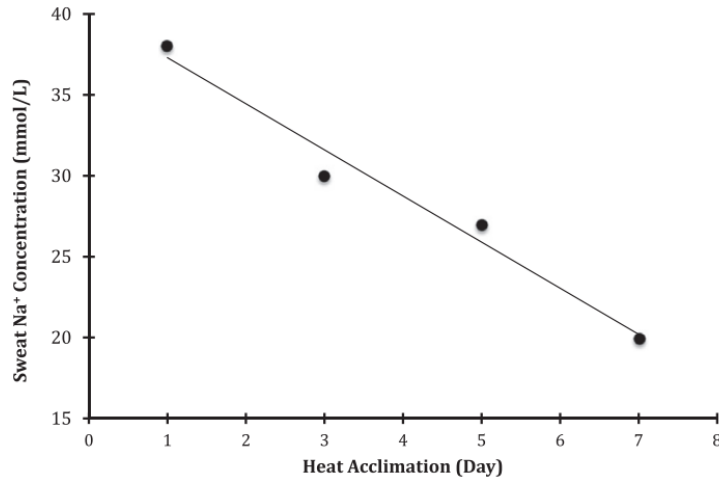
Annexes



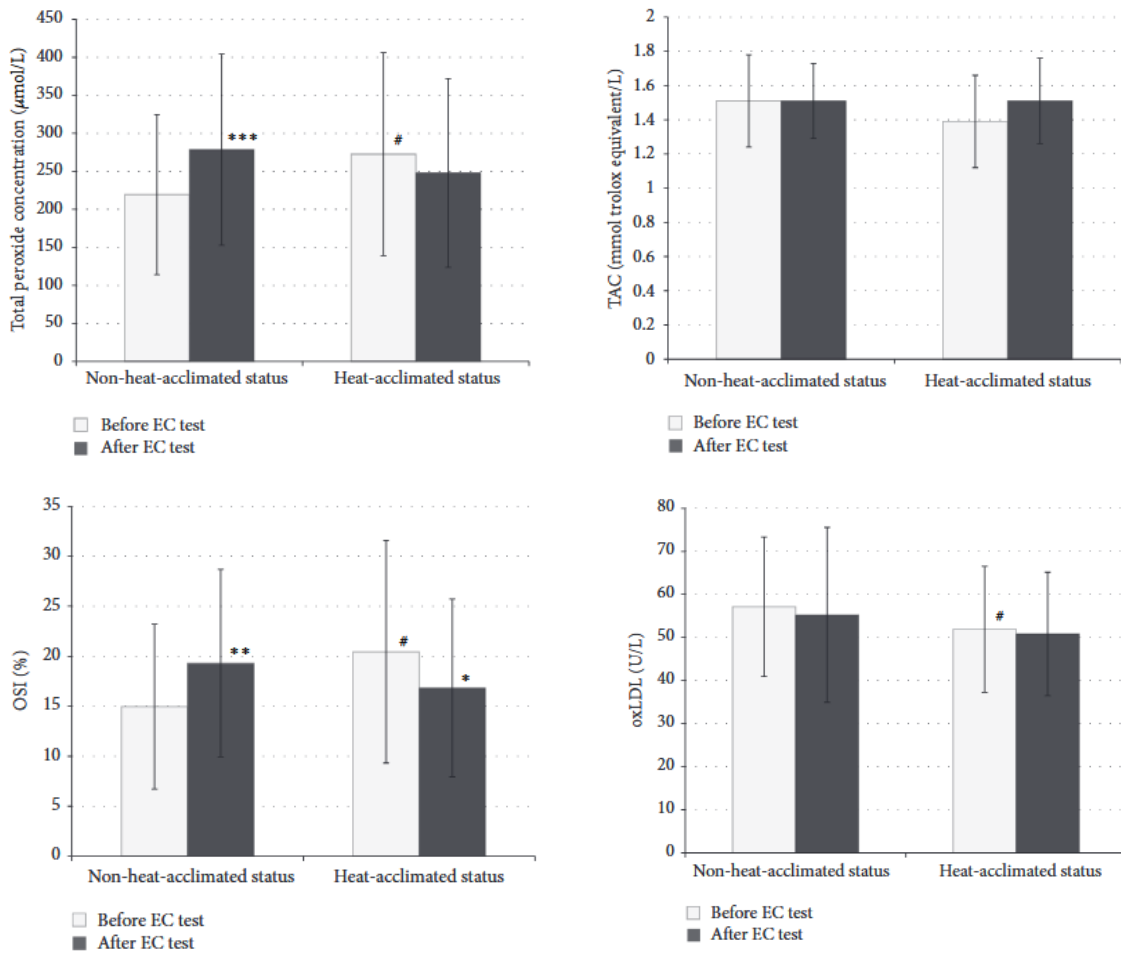
Annexe 1 (Daanen et al., 2018) : Types de protocoles de heat training selon l'environnement et l'activité : acclimatation naturelle en extérieur ou acclimatation artificielle en intérieur, avec des séances actives, passives ou combinées, de 30 à 90 minutes selon la méthode et l'intensité.



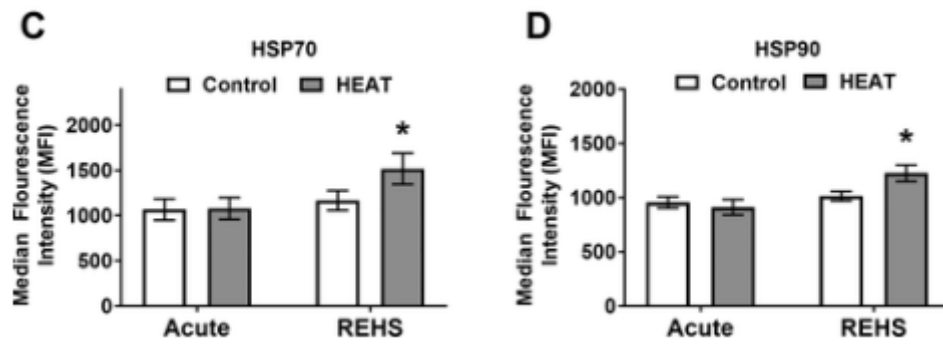
Annexe 2 (Xu et Al 2025) : Température centrale et taux de sudation lors d'un test incrémental sur tapis roulant. (A) Température centrale lors du test incrémental sur tapis roulant, et (B) taux de sudation lors du test incrémental sur tapis roulant. Après acclimatation, on constate une diminution de la température corporelle (Tc) et une augmentation du débit de sudation.



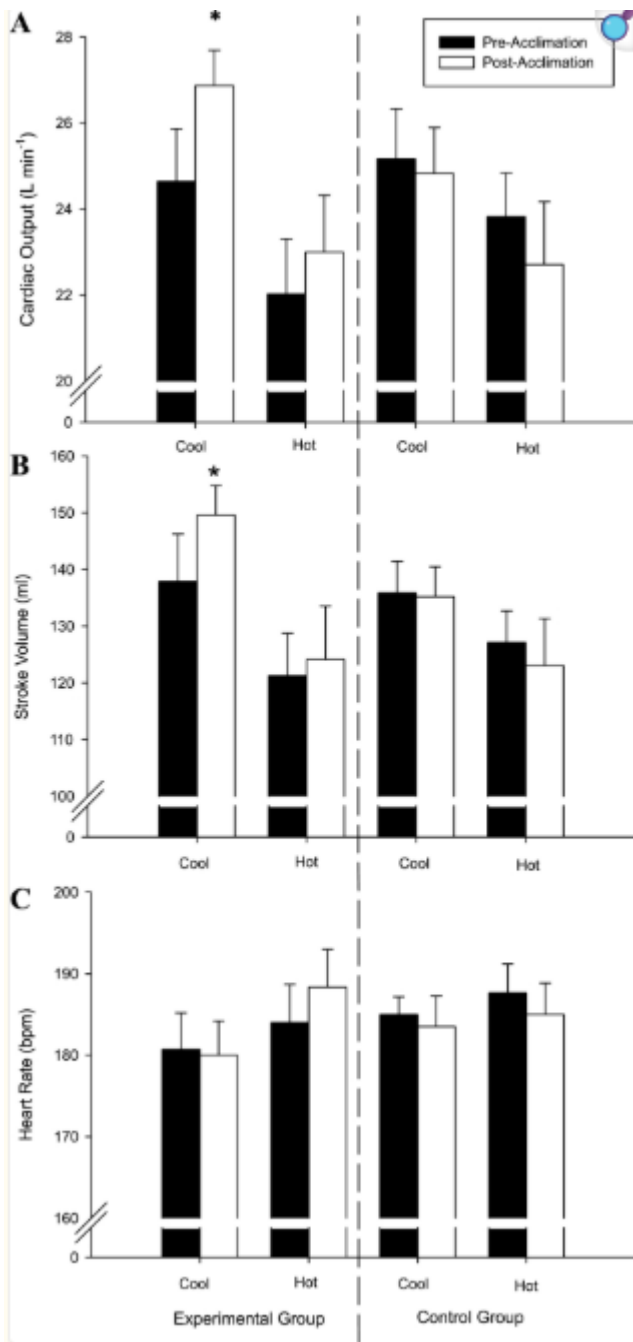
Annexe 3 (Buono et al 2018) : Diminution significative de la concentration en sodium retrouvée dans la sueur après 7 jours de HT.



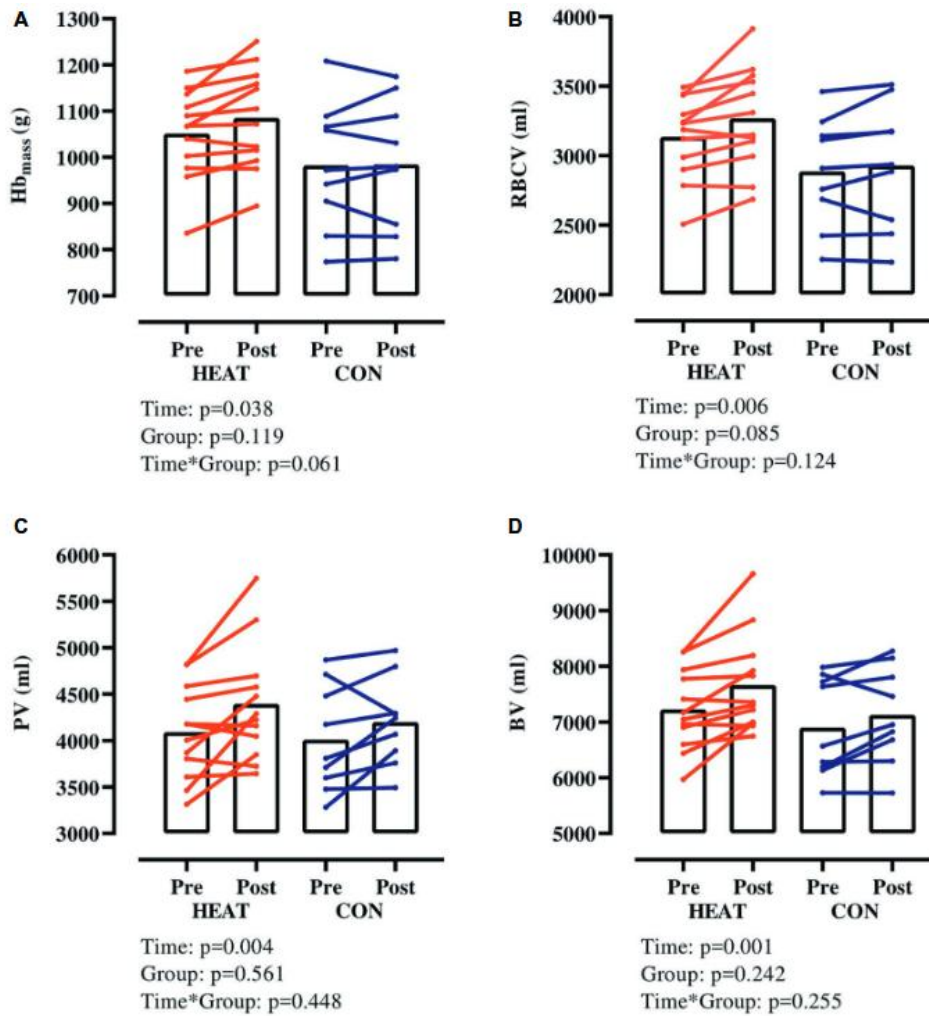
Annexe 4 (Kaldur et Al 2014) : Valeurs du peroxyde total, TAC, OSI et oxLDL mesurées avant et après 10j d'acclimatation. Les valeurs sont prises avant et après un test à la chaleur.



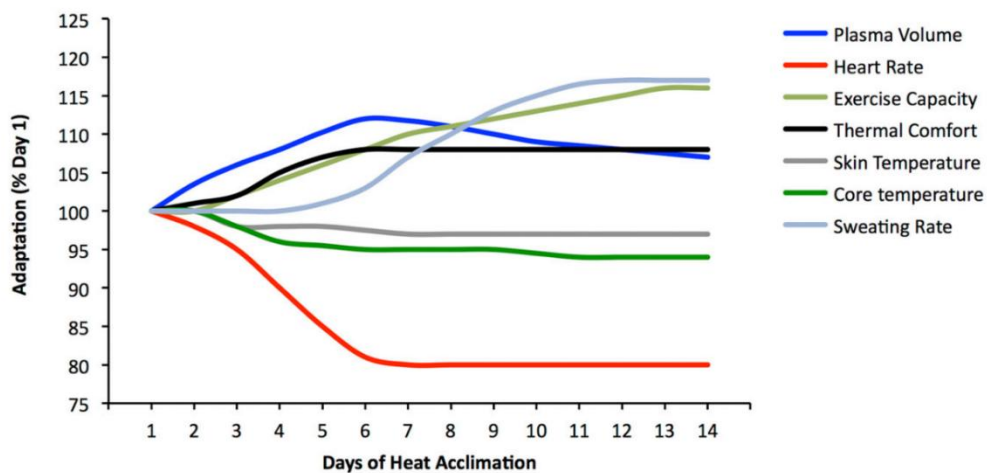
Annexe 5 (Hafen et al 2018) : Mesures réalisées après une exposition aiguë à la chaleur (Acute) et après 6 jours d'exposition répétée au stress thermique (REHS), taux de HSP70 (C) et HSP90 (D).



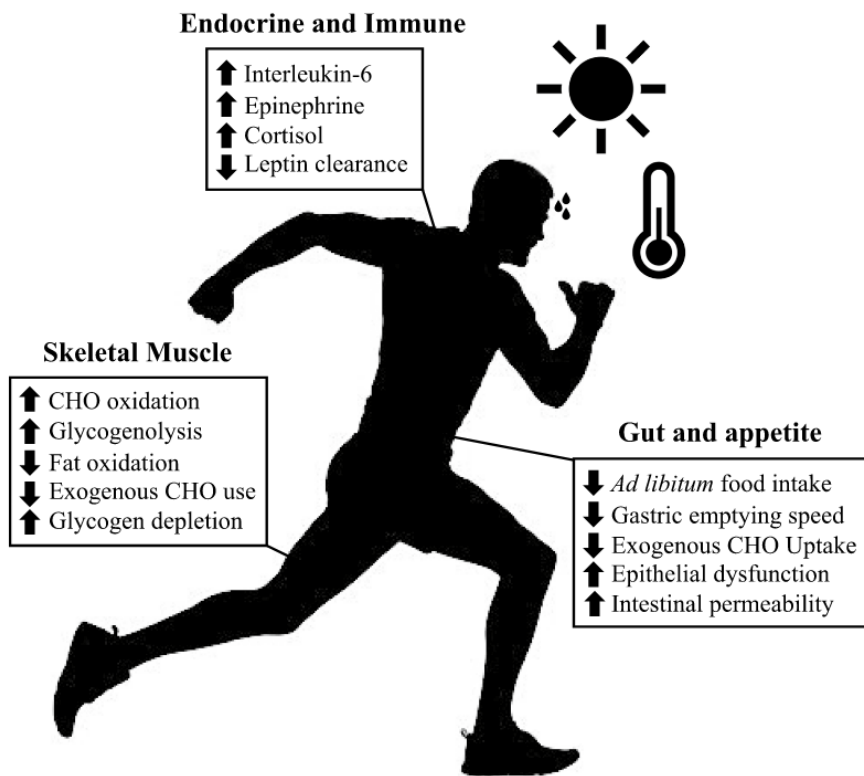
Annexe 6 (Santiago et al 2010) : Effets de l'acclimation à la chaleur sur le débit cardiaque maximal (A), ainsi que sur le volume d'éjection systolique correspondant (B) et la fréquence cardiaque (C), lors d'un test de $\dot{V}O_2$ max réalisé en environnement tempéré (13 °C) et chaud (38 °C). Les valeurs sont exprimées en moyennes \pm erreur standard (SE) pour 12 sujets acclimatés à la chaleur et 8 sujets contrôles. bpm : battements par minute



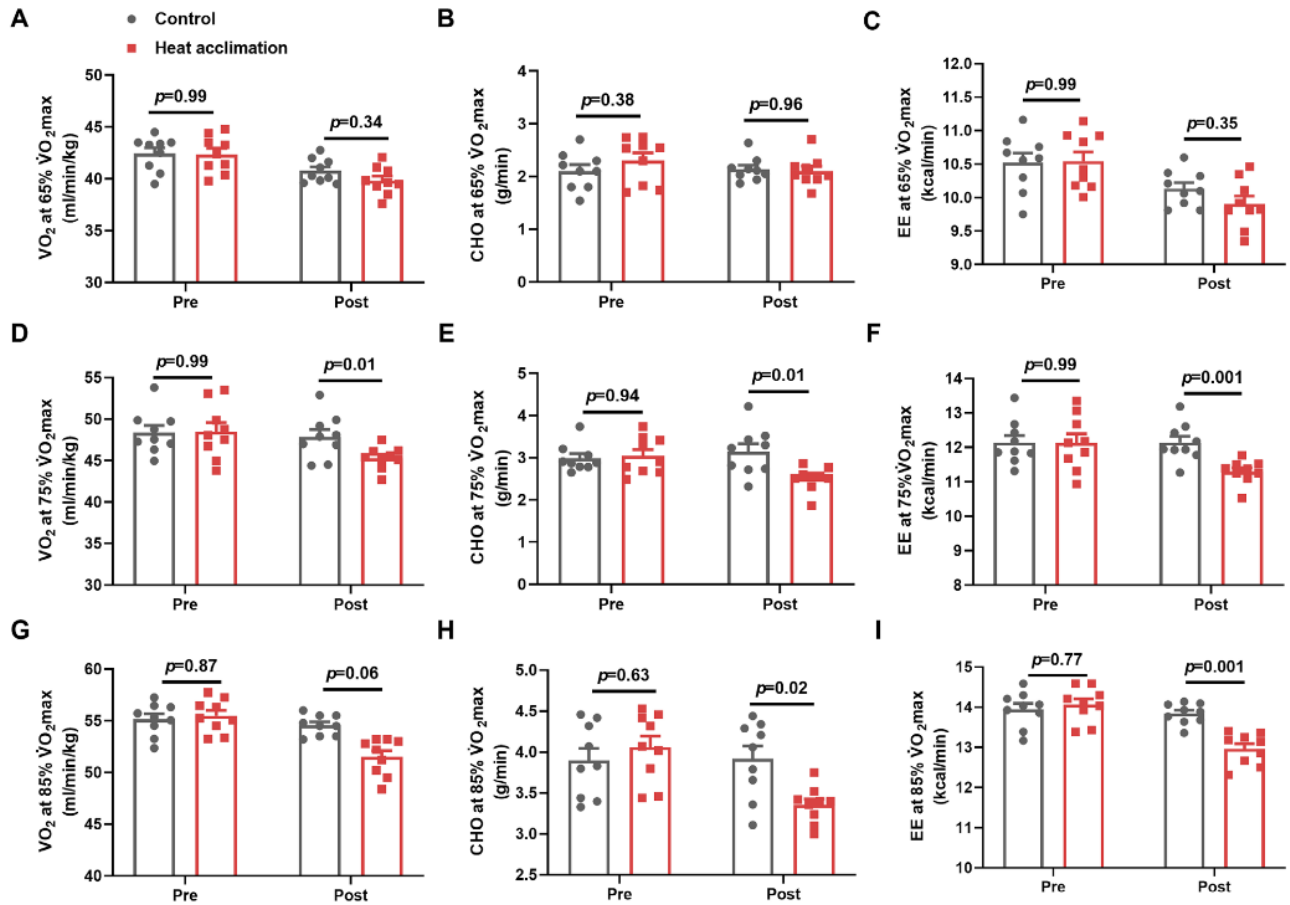
Annexe 7 (Oberholzer et Al 2019) : Masse d'hémoglobine et volumes intravasculaires après acclimation à la chaleur combinée à l'exercice (HEAT) ou groupe contrôle (CON). (A) Masse d'hémoglobine (Hbmass), (B) Volume des globules rouges (RBCV), (C) Volume plasmatique (PV), (D) Volume sanguin total (BV).



Annexe 8 (Périard et Al 2021) : Récapitulatif des adaptations physiologiques induites pas l'acclimation à la chaleur : Volume plasmique, Fréquence cardiaque, Performance, Confort thermique, Température de la peau, Température corporelle et Taux de sudation.



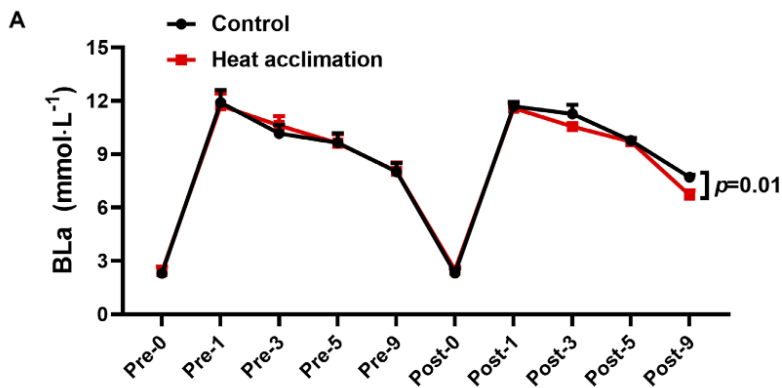
Annexe 9 (Rosbrook et Al 2024) :
 Conséquences potentielles liées à
 la nutrition pendant l'exercice à
 haute intensité en situation de
 stress thermique chez des sujets
 non acclimatés.
 CHO : glucides



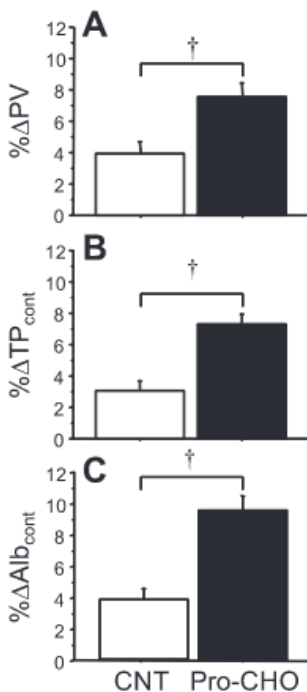
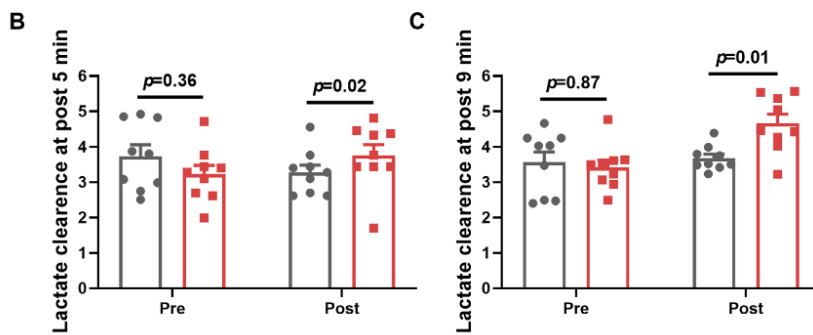
Annexe 10 (Xu et Al 2025) : Consommation moyenne d'oxygène (A), proportion de glucides (B) et dépense énergétique (C) à 65 % de $\dot{V}O_{2max}$ en chaleur ; consommation moyenne d'oxygène (D), proportion de glucides (E) et dépense énergétique (F) à 75 % de $\dot{V}O_{2max}$ en chaleur ; consommation moyenne d'oxygène (G), proportion de glucides (H) et dépense énergétique (I) à 85 % de $\dot{V}O_{2max}$ en chaleur.

On constate une diminution de l'oxydation des glucides (CHO) et de la dépense énergétique (EE) après acclimation.

Annexe 11 (Xu et Al 2025) :
 Résultats du lactate sanguin lors du test incrémental sur tapis roulant en chaleur.



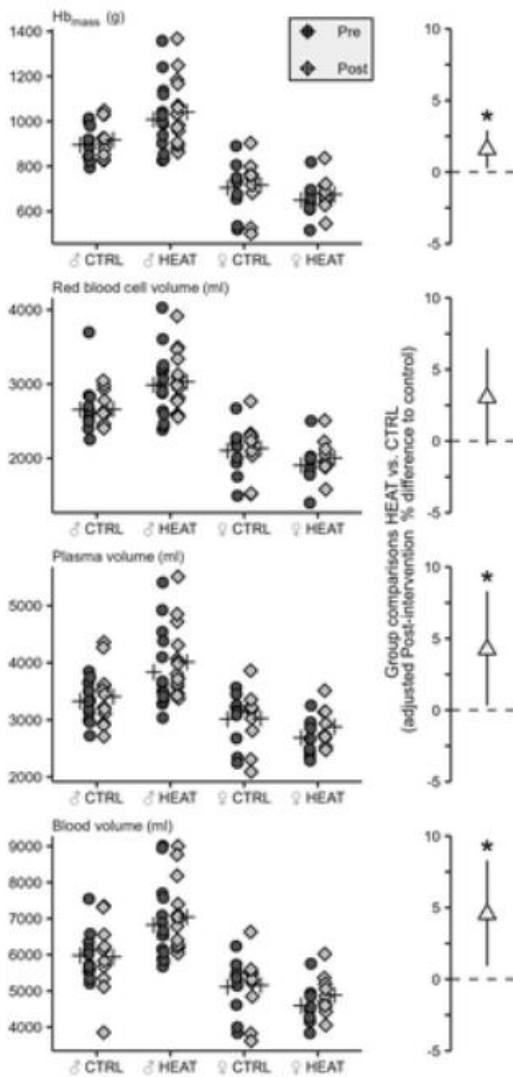
(A) Lactate sanguin pendant le test incrémental sur tapis roulant ; (B–C) clairance du lactate sanguin à 5 min (C) et à 9 min (D) lors du test incrémental sur tapis roulant en chaleur.



Annexe 12 (Goto et Al, 2025) :
 Changements en pourcentage (%) du volume plasmatique (PV) (A), de la teneur totale en protéines (TPcont) (B), et de la teneur en albumine (Albcont) (C) après 5 jours d'entraînement.
 CNT : groupe ayant consommé un placebo.
 Pro-CHO : groupe ayant consommé un supplément de protéines et de glucides

Variable	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5	Day 6	Day 7	Day 8
Carbohydrate	7 to 8 g·kg ⁻¹ ·d ⁻¹				6 to 7 g·kg ⁻¹ ·d ⁻¹			
Protein	1.4 to 1.6 g·kg ⁻¹ ·d ⁻¹							
Fat	Lower to ≤20% kcal to reduce potential for GI upset				Increase to fill remaining calories			
Fluid	3+ L·d ⁻¹ , sufficient to sustain euhydration and limit exercise losses to ≤2% body mass							
Notes	Lower fiber, moderate sodium increased to 3-4 g·d ⁻¹				Gradually increase fiber and reduce sodium to baseline			

Annexe 13 (Rosbrook et Al, 2024) : Exemple de mise en œuvre des principes de nutrition de la performance au sein d'un protocole d'acclimatation à la chaleur de 8 jours, incluant chaque jour un entraînement de haute intensité périodisé avec un exercice isotherme pour maintenir la température centrale dans une zone cible (90 à 120 min par jour).



Annexe 14 (Lundby et Al 2023) : Variables hématologiques : masse de l'hémoglobine (Hbmass, en g), volume des globules rouges (en, mL), volume plasmatique (mL) et volume sanguin (mL) chez les participants masculins (♂) et féminins (♀) des groupes contrôle (CTRL) ou d'entraînement à la chaleur (HEAT). Les données dans les panneaux de gauche représentent les moyennes (croix) et les valeurs individuelles regroupées par sexe. Les comparaisons de groupes dans les panneaux de droite sont des estimations des différences post-intervention entre les groupes, après ajustement des valeurs pré-intervention, avec des intervalles de confiance à 95 %. *P < 0,05 entre les groupes CTRL et HEAT regroupés par sexe.