



Diplôme d'Université

Trail Running

Comment la chaleur influence la performance en Trail-Running ?

Présenté par
LE GUYADER Guérande

Sous la direction de
VERGES Samuel

Promotion 2025

Résumé

La performance en trail running est influencée par de multiples facteurs physiologiques, psychologiques et environnementaux. Parmi eux, la chaleur constitue une contrainte majeure, susceptible de modifier la régulation cardiovasculaire, la thermorégulation et les mécanismes de fatigue. L'objectif de ce mémoire était d'évaluer l'impact de deux environnements thermiques, ambiance tempérée ($\leq 25\text{ }^{\circ}\text{C}$) et chaude ($\geq 30\text{ }^{\circ}\text{C}$) sur la performance et la fatigue de coureurs amateurs de trail running.

Dix participants (5 hommes, 5 femmes), de la même tranche d'âge (22 ± 2 ans) pratiquant le trail à un niveau intermédiaire, ont pris part à deux sessions (en ambiance tempérée et chaude) sur une course de 14 km avec 600 m de dénivelé positif, à allure compétition. Plusieurs indicateurs de charge interne (fréquence cardiaque, variabilité de la FC, température corporelle, perte hydrique, fatigue musculaire via CMJ et Y-Balance, fatigue mentale via Stroop test, perception de l'effort et dépense énergétique) et externe (vitesse, cadence, puissance) ont été mesurés et comparés entre les deux conditions.

Les résultats mettent en évidence une élévation de la fréquence cardiaque au repos et une récupération plus lente après effort en ambiance chaude. La variabilité de la FC est restée plus basse les jours suivant l'effort, suggérant une récupération parasympathique retardée. La température corporelle et les pertes hydriques étaient significativement plus élevées à la chaleur, confirmant la contrainte thermorégulatrice accrue. Sur le plan de la performance, la vitesse et la puissance ont diminué en condition chaude, malgré une dépense énergétique légèrement supérieure. Les tests CMJ et Y-Balance montrent une fatigue musculaire accrue, tandis que la fatigue cognitive et la perception de l'effort (RPE) étaient également amplifiées. Ces observations confirment que la chaleur altère simultanément la performance et les mécanismes de récupération en trail running, en mobilisant des contraintes physiologiques, métaboliques et psychologiques.

Abstract

Performance in trail running is influenced by multiple physiological, psychological, and environmental factors. Among these, heat represents a major constraint, capable of altering cardiovascular regulation, thermoregulation, and fatigue mechanisms. The objective of this thesis was to evaluate the impact of two thermal environments, temperate ($\leq 25^{\circ}\text{C}$) and hot ($\geq 30^{\circ}\text{C}$) on the performance and fatigue of amateur trail runners. Ten participants (5 men, 5 women), within the same age range (22 ± 2 years) and practicing trail running at an intermediate level, took part in two sessions (temperate and hot environments) consisting of a 14 km run with 600 m of positive elevation gain, performed at race pace. Several indicators of internal load (heart rate, HR variability, core temperature, fluid loss, muscular fatigue via CMJ and Y-Balance test, mental fatigue via the Stroop test, and perceived exertion, energy expenditure) and external load (speed, cadence, power output) were measured and compared between the two conditions.

The results highlighted an increase in resting heart rate and a slower post-exercise recovery in the hot environment. Heart rate variability remained lower in the days following the effort, suggesting delayed parasympathetic recovery. Core temperature and fluid losses were significantly higher in the heat, confirming the increased thermoregulatory strain. From a performance perspective, both speed and power output decreased in hot conditions, despite a slightly higher energy expenditure. The CMJ and Y-Balance tests revealed greater muscular fatigue, while cognitive fatigue and perceived exertion (RPE) were also amplified.

These findings confirm that heat simultaneously impairs performance and recovery mechanisms in trail running, by engaging physiological, metabolic, and psychological constraints.

Comment la chaleur influence la performance en Trail-Running ?

Résumé

La performance en trail running est influencée par de multiples facteurs physiologiques, psychologiques et environnementaux. Parmi eux, la chaleur constitue une contrainte majeure, susceptible de modifier la régulation cardiovasculaire, la thermorégulation et les mécanismes de fatigue. L'objectif de ce mémoire était d'évaluer l'impact de deux environnements thermiques, ambiance tempérée ($\leq 25\text{ }^{\circ}\text{C}$) et chaude ($\geq 30\text{ }^{\circ}\text{C}$) sur la performance et la fatigue de coureurs amateurs de trail running.

Dix participants (5 hommes, 5 femmes), de la même tranche d'âge (22 ± 2 ans) pratiquant le trail à un niveau intermédiaire, ont pris part à deux sessions (en ambiance tempérée et chaude) sur une course de 14 km avec 600 m de dénivelé positif, à allure compétition. Plusieurs indicateurs de charge interne (fréquence cardiaque, variabilité de la FC, température corporelle, perte hydrique, fatigue musculaire via CMJ et Y-Balance, fatigue mentale via Stroop test, perception de l'effort, dépense énergétique) et externe (vitesse, cadence, puissance) ont été mesurés et comparés entre les deux conditions.

Les résultats mettent en évidence une élévation de la fréquence cardiaque au repos et une récupération plus lente après effort en ambiance chaude. La variabilité de la FC est restée plus basse les jours suivant l'effort, suggérant une récupération parasympathique retardée. La température corporelle et les pertes hydriques étaient significativement plus élevées à la chaleur, confirmant la contrainte thermorégulatrice accrue. Sur le plan de la performance, la vitesse et la puissance ont diminué en condition chaude, malgré une dépense énergétique légèrement supérieure. Les tests CMJ et Y-Balance montrent une fatigue musculaire accrue, tandis que la fatigue cognitive et la perception de l'effort (RPE) étaient également amplifiées. Ces observations confirment que la chaleur altère simultanément la performance et les mécanismes de récupération en trail running, en mobilisant des contraintes physiologiques, métaboliques et psychologiques.

SOMMAIRE

Résumé	2
Abstract.....	3
Introduction	6
1. Analyse de la littérature et conception du dispositif d'intervention.....	7
1.1 Températures et distances	7
1.2 Influence de la chaleur sur l'organisme	8
1.2.1 Physiologie.....	8
1.2.1.1 Thermorégulation	8
1.2.1.2 Mécanismes cardio-vasculaires	10
1.2.1.3 Déshydratation	12
1.2.1.4 Métabolisme énergétique	13
1.2.1.5 Pathologies métaboliques	14
1.2.2 Neurologie / neurophysiologie	15
1.2.2.1 Perception de l'effort.....	15
1.2.2.2 Altération des fonctions cognitives.....	15
1.2.2.3 Fatigue neuromusculaire.....	16
1.2.2.5 Pathologies neuromusculaires	18
1.2.3 Psychologie	19
2. Méthodologie.....	21
2.1 Participants	21
2.2 Description du protocole	21
2.3 Mesures.....	22
2.4 Analyses	23
3. Résultats	25
3.1 Charge interne	25
3.1.1 Fréquence cardiaque (FC) et variabilité cardiaque (VFC)	25
3.1.2 Température corporelle externe.....	30
3.1.3 Pertes hydriques	31
3.1.4 Fatigue musculaire	32
3.1.5 Perception de l'effort.....	34
3.1.6 Fatigue mentale – test cognitif (Stroop test).....	35
3.1.7 Dépense énergétique	37
3.2 Charge externe.....	38
3.2.1 Vitesse	38
3.2.2 Puissance	38

3.2.3	Cadence	39
4.	Discussion.....	40
	Bibliographie.....	48
	Webographie.....	53
	Annexes	54
	Annexe 1 : Graphique de l'impact de la température sur les performances de l'étude de Guy et al. (2014)	54
	Annexe 2 : Tableau des indices de chaleur avec les suggestions d'ajustement d'allures (COROS)	55
	Annexe 3 : L'équilibre des échanges thermiques (Aubry C., Siano B, 2020).....	56
	Annexe 4 : Schéma des effets de la chaleur sur l'organisme (Brocherie et al. 2023).....	57
	Annexe 5 : Schéma des effets de la déshydratation sur les fonctions cognitives et de l'humeur (H4H)	58
	Annexe 6 : Suivi de la VFC d'un athlète sur l'application Élite HRV.....	59
	Annexe 7 : Organigramme du mécanisme de la genèse des crampes selon la théorie du contrôle neuromusculaire altéré. (Laurent et al. 2018).....	60

Introduction

Le trail running est un sport de course à pied qui se pratique en pleine nature (forêt, montagne...). Les reliefs et le terrain vont changer constamment pendant la course : dénivelé positif, dénivelé négatif, pierres, herbe, boue, neige etc...

La particularité de ce sport est que la performance ne dépend pas seulement de la capacité physique de l'athlète. Elle dépend aussi de sa capacité à s'adapter à toutes situations environnementales mais aussi climatiques.

Ce sont des facteurs que l'athlète ne peut pas gérer. Il peut seulement s'adapter au mieux pour performer. Un trail peut avoir lieu en altitude, en montagne, près de la mer, dans le désert, de nuit comme de jour, indépendamment des conditions météorologiques (pluie, neige, soleil, froid, chaud, humidité etc).

Lors d'un ultra trail on peut faire face à de grandes variations de température (chaud la journée/ froid la nuit et à haute altitude).

Nous allons donc analyser, comment la chaleur peut-elle influencer la performance, et plus particulièrement en trail running ?

Dans un premier temps, nous analyserons des études scientifiques afin de comprendre comment la chaleur peut-elle influencer la performance.

Puis dans un second temps, nous détaillerons le protocole que j'ai pu mettre en place en analysant la charge interne et externe en température tempérée ($\leq 25^{\circ}\text{C}$) et en température chaude ($\geq 30^{\circ}\text{C}$).

Cela nous permettra de déterminer les effets de la chaleur sur la performance.

Ensuite nous discuterons des résultats obtenus.

1. Analyse de la littérature et conception du dispositif d'intervention

1.1 Températures et distances

Plusieurs études nous ont permis de déterminer les points de températures qui avaient un impact positif ou négatif en fonction des distances.

L'étude de Guy et coll. (2014), analyse l'impact de la température sur les performances sur des distances allant de 100 m au marathon. (cf., **Annexe 1**)

Quand la température dépasse 25°C, les résultats montrent que les performances se dégradent à partir de 800m jusqu'au marathon en raison de la surcharge thermique sur la durée.

En revanche, pour les sprinters de 100 m, 200 m et 400 m, la chaleur va avoir un effet positif sur la performance. Cela va participer à la production du niveau de puissance musculaire. Comme a pu l'expliquer Roussey (2018) dans sa thèse, le gain de performance est lié à une élévation de la température des tissus musculaires qui vont alors provoquer une meilleure adaptation musculaire (plus de ponts d'actine-myosine activés) ainsi que l'accélération du turnover de la phosphocréatine. Ce qui induit une augmentation de puissance.

Pour une distance marathon, dès 10-15°C la chaleur détériore fortement la performance (Ely et coll., 2007).

C'est alors que El Helou et coll., (2012), ont comparé lors du Marathon de Londres, l'édition 2007 (ou il faisait 19,1°C) et 2008 (9,9°C). Ils ont pu conclure que chaque degré en plus faisait baisser la vitesse de 0,03 % car le temps moyen du parcours était plus de 17 % augmenté en 2007. Et en 2008, la baisse de température par rapport à l'année précédente a permis de réduire plus de 20 % des interventions de l'équipe médicale qui avaient été causées par des coups de chaud etc. (Roussey, 2018)

Cependant, on sait que l'effet de la chaleur est plus marqué chez les coureurs amateurs.

Une température passant de 10 à 25°C augmente le temps de course de 23 minutes pour un coureur amateur réalisant le marathon en 4 heures, contre seulement 5 minutes pour un coureur élite (moins exposés dans le temps à la chaleur et mieux entraîné) (Vihma, 2010).

Il a été démontré que courir en groupe réduisait de plus de 50 % l'efficacité de l'évacuation de la chaleur lors d'une telle augmentation de température (Sordello, 2015).

Par contre, nous savons qu'à partir de 32°C, l'impact de la chaleur dépasse un stade où le stress thermique devient « non compensable » ce qui induit une réduction de l'allure (Peiffer et Abbiss, 2011).

La chaleur est alors néfaste sur des épreuves prolongées : il y a une diminution d'approvisionnement en substrats énergétiques aux muscles, une diminution de la

consommation d'oxygène, une augmentation de la glycolyse ; une augmentation des pertes liquidiennes (par évaporation) et de la contrainte cardiaque associée au phénomène d'hypovolémie (volume de sang qui va diminuer) ; augmentation des pertes en électrolytes et baisse du statut hydrique (par la sueur) ; augmentation de l'inconfort thermique et de la pénibilité de l'exercice. (Piponnier, 2023)

D'après Trapasso et Cooper (1989), les conditions idéales pour une performance en course à pied, est une température de moins de 7-8°C avec un ciel couvert.

Nous pouvons voir dans l'**Annexe 2**, les précautions à prendre en fonction des températures que recommande le site officiel Coros, s'inspirant d'une étude de Knechtle et coll. (2019).

Nous avons vu l'influence de la température selon la distance ; nous allons désormais explorer les mécanismes physiologiques permettant au corps de s'y adapter, ou pas.

1.2 Influence de la chaleur sur l'organisme

L'exposition à la chaleur et l'effort physique entraînent des modifications importantes sur notre organisme, à différents niveaux :

- Physiologique → Thermorégulation, mécanismes cardiovasculaires, métabolisme énergétique, etc.
- Neurologie/neurophysiologique → Perception de l'effort, altération des fonctions cognitives, fatigue neuromusculaire.
- Psychologique → Tolérance à l'inconfort thermique, motivation à poursuivre l'effort, stress et anxiété liés à la chaleur.

1.2.1 Physiologie

1.2.1.1 Thermorégulation

La thermorégulation est la capacité du corps à maintenir sa température interne autour des 37°C, malgré les variations de l'environnement ou de l'activité physique. (cf., **Annexe 3**)

Localement, l'exposition à la chaleur induit une vasodilatation et une augmentation du flux sanguin périphérique cutané (Pearson et coll., 2011). (cf., **Annexe 4**)

Durant l'effort, le corps ajuste le seuil de déclenchement de la vasodilatation cutanée en fonction de l'intensité de l'exercice, décalant ce seuil vers des températures centrales plus élevées lors d'efforts intenses (Kellogg et coll., 1990).

La sudation, principal mécanisme d'évacuation thermique par évaporation, est déclenchée lorsque ce seuil est atteint, avec une sécrétion de sueur hypotonique permettant une dissipation

thermique (Nadel et coll., 1971). La sudation ne s'active pas uniformément sur la surface corporelle. Elle va débiter par le front, ensuite les bras, les mains, les cuisses, les pieds, le dos ainsi que l'abdomen. (Kenney et coll., 2014).

Par ailleurs, l'efficacité de ces mécanismes est influencée par des variables individuelles telles que l'âge (Munce et Kenney, 2003), la densité et le nombre de glandes sudoripares, ainsi que la corpulence, la composition corporelle, notamment la quantité de tissu adipeux qui réduit la conductivité thermique de la peau (Cramer et Jay, 2016) mais aussi la quantité de sang, le débit cardiaque et la quantité de liquide extracellulaire (Sordello, 2018).

Comme Roussey (2018) a pu expliquer dans sa thèse, il a longtemps été admis que le dépassement de cette température centrale de 37°C pouvait entraîner une baisse de performance physique. (Nous pouvons alors parler d'hyperthermie corporelle quand cette température corporelle se rapproche des 40°C.)

Cependant, il a été démontré que les performances lors d'un effort ne sont pas particulièrement dégradées lorsque la température corporelle atteint ou même dépasse cette hyperthermie corporelle (40°C) (Ely et coll., 2010).

Cette thermorégulation repose sur des transferts de chaleur entre le corps et l'environnement (transferts externes), mais aussi à l'intérieur du corps (transferts internes) (Roussey, 2018).

Internes : entre les différentes couches corporelles (muscles, peau, sang), par conduction et convection.

Externes : entre le corps et l'environnement, par la dissipation de chaleur.

Les échanges thermiques entre le corps et l'environnement reposent sur quatre principaux modes (Sordello, 2018) :

- **Conduction** : transfert direct entre deux solides en contact. Elle représente 3 à 4 % de la perte totale de la chaleur.
- **Convection** : transfert entre la peau et l'air, fortement influencé par la vitesse du coureur ou le vent. Elle représente presque 15 % de l'évacuation de la chaleur.
- **Radiation** : transfert d'énergie électromagnétique, entre le corps et son environnement. Le corps émet en permanence de la chaleur. Elle représente jusqu'à 60 % de la perte totale de chaleur.

- **Évaporation** : perte de chaleur par la perte d'eau produite par les glandes sudoripares. Elle peut se faire par la respiration ou la sudation.

Au repos, la chaleur évacuée par évaporation représente 25 % dont 8 % lors de la respiration (Guyton et Hall, 2000). Mais lors d'un exercice, l'évaporation devient la principale voie de perte thermique avec plus de 80 %, car la sueur transforme la chaleur corporelle en énergie de vaporisation.

L'efficacité de l'évaporation diminue avec un important taux d'humidité ambiant et lorsque l'ambiance thermique est chaude (Candas et coll., 1980).

Les vêtements portés vont avoir un impact sur les échanges de chaleurs :

- Des vêtements amples créent une couche d'air isolante, pouvant ralentir les pertes de chaleur par conduction et convection.
- Des textiles absorbants (ex : coton léger) facilitent l'évaporation de la sueur.
- À l'inverse, les matières non respirantes limitent l'évaporation et bloquent les glandes sudorales
- Les couleurs foncées favorisent l'absorption du rayonnement solaire, augmentant le stress thermique

À l'intérieur du corps :

- La chaleur produite par les muscles est transmise :
 - **Par conduction** entre les couches tissulaires (muscles profonds → peau),
 - **Par convection** via le sang entre le noyau (organes internes) et les membres (Aschoff et Wever, 1958).

En ambiance chaude ou pendant l'effort, le corps favorise la vasodilatation et étend le noyau thermique vers la périphérie, ce qui ralentit la montée en température centrale.

En ambiance froide, il y a une vasoconstriction pour préserver la chaleur au niveau du tronc afin de réduire le noyau thermique. (Aschoff et Wever, 1958).

1.2.1.2 Mécanismes cardio-vasculaires

Lorsque la température ambiante augmente, les mécanismes autonomes de thermorégulations sont activés ce qui entraîne notamment une vasodilatation des vaisseaux cutanés. Cette vasodilatation implique une augmentation du flux sanguin et une modification de sa répartition

dans le corps ainsi qu'une diminution du volume d'éjection systolique, entraînant alors une élévation compensatoire de la fréquence cardiaque (FC) pour garder un débit optimal. On appellera alors ce phénomène le « stress cardiovasculaire » (Sawka et coll., 2011).

Nous pouvons l'observer dans la figure 1 ci-dessous, qui représente la dérive du système cardio-vasculaire lors d'un exercice sans déshydratation et pendant déshydratation.

Cependant le débit sanguin lui, va diminuer dans les organes périphériques afin de se concentrer sur les organes vitaux (cerveau, cœur, poumons, muscles).

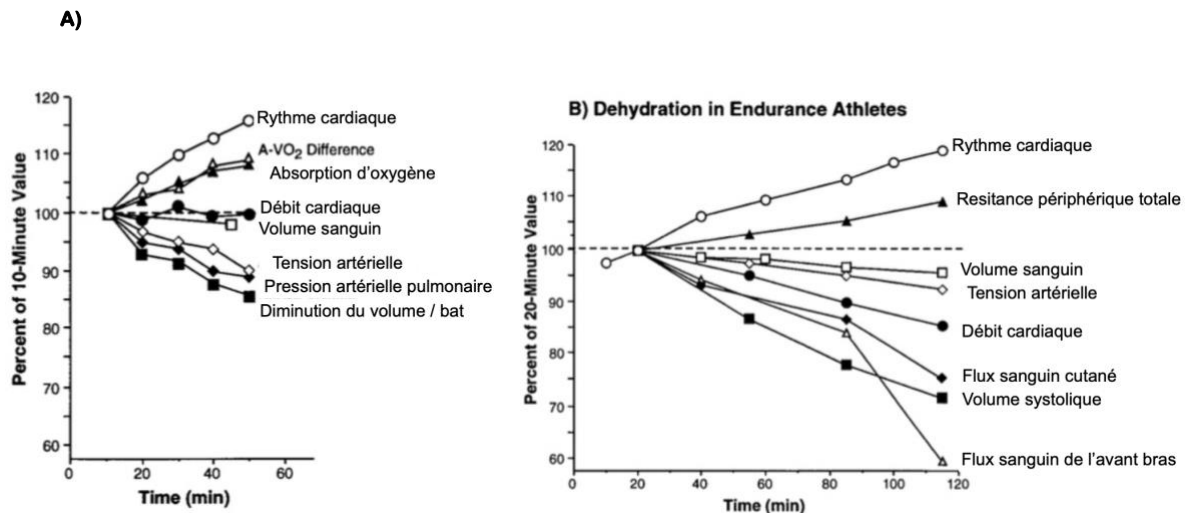


Figure 1 : Graphiques montrant la dérive du système cardio-vasculaire induit par l'augmentation du flux sanguin pendant l'exercice sans déshydratation (A) et pendant une déshydratation (B) (Coyle et Gonzalez-Alonso, 2001) (Piponnier, 2023)

Dans la figure ci-dessous, les quatre graphiques présentent l'évolution de la puissance (A), la perfusion sanguine cutanée (B), la Fréquence Cardiaque (C) et le volume d'éjection systolique (D) lors d'un exercice de 40 km en ambiance chaude (35°C) en comparaison avec une ambiance tempérée (20°C). Nous pouvons observer une diminution significative de la puissance développée en température chaude (A), qui va être notamment causée par l'augmentation de la perfusion sanguine (B) ainsi que la baisse du volume d'éjection systolique (D). Cette augmentation de la perfusion sanguine a lieu grâce au mécanisme cardiovasculaire de thermorégulation : le sang est envoyé vers la peau et moins vers les muscles. Cette redistribution implique une diminution de l'oxygénation des muscles et donc une diminution de puissance.

Sur le plan cardiovasculaire, la chaleur entraîne une augmentation de la fréquence cardiaque (C) et une diminution du volume d'éjection systolique (D).

Ces adaptations vont permettre d'assurer le débit cardiaque quitte à diminuer la performance (puissance).

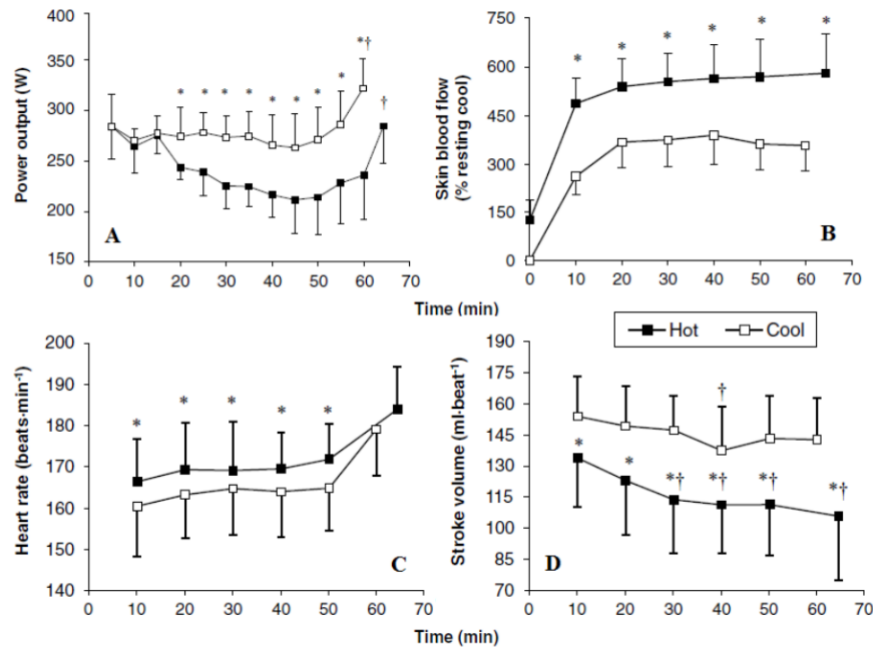


Figure 2 : Évolution de la puissance développée (A), de la perfusion sanguine cutanée (B), de la FC (C) et du volume d'éjection systolique (D) relevés au cours d'un exercice à libre allure de 40km reproduit en ambiance tempérée (20°C ; COOL) et chaude (35°C : HOT) (Périard et coll., 2011)

Enfin, la variabilité de la fréquence cardiaque (VFC, valeur moyenne de la fluctuation des intervalles de temps séparant deux battements) peut être influencée par l'effort à la chaleur. Il est plus intéressant de la mesurer le lendemain de l'effort mais aussi en continu lors d'une planification afin de voir le vrai impact que cela peut avoir sur l'organisme.

1.2.1.3 Déshydratation

La déshydratation, conséquence fréquente d'une sudation importante, réduit le volume plasmatique, compromettant le transport d'oxygène et pouvant réduire la performance.

Elle altère également les fonctions cognitives et la concentration, essentielles en trail pour la gestion de l'effort et l'orientation (Casa et coll., 2010).

L'hyponatrémie est aussi un risque lié à une hydratation excessive sans apport électrolytique adéquat (Sawka et Noakes, 2007).

Pour prévenir ces risques, il est crucial de gérer l'hydratation avec un apport suffisant en électrolytes, d'adapter l'intensité de l'effort selon la chaleur, et de pratiquer une acclimatation progressive en environnement chaud.

1.2.1.4 Métabolisme énergétique

Lors d'un exercice prolongé en ambiance chaude, les muscles sont soumis à des contraintes qui modifient l'utilisation des substrats énergétiques pour la resynthèse de l'ATP (Febbraio et coll., 1996).

L'activité glycolytique et la phosphocréatine (PCr) augmentent lors de cette resynthèse d'ATP au détriment de l'oxydation lipidique (Fink et al. 1975).

L'utilisation du glycogène musculaire peut augmenter de 25 % tandis que l'apport de glucose exogène (glucose d'origine alimentaire) est réduit (Jentjens et coll. 2002) en raison de la répartition du flux sanguin vers la peau pour la thermorégulation.

Lorsque le glycogène s'épuise, les acides aminés sont catabolisés pour produire de l'énergie, ce qui entraîne une production d'ammoniac, pouvant perturber le fonctionnement musculaire (Millet, 2022).

Comme illustré plus haut à la figure 1 et 2 (**1.2.1.2**), la puissance musculaire diminue lorsque le flux sanguin est prioritairement envoyé vers la peau, réduisant l'oxygénation des muscles actifs. Quand l'apport en oxygène est limité, la glycolyse produit alors plus de pyruvate, qui en excès est converti en lactate.

De plus, l'augmentation de la fréquence cardiaque favorise une accumulation plus rapide du lactate, contribuant à une élévation de la perception de l'effort (**1.2.2.1**) (Coros, 2025).

L'association du stress métabolique (épuisement du glycogène, accumulation de métabolites) et de la redistribution du flux sanguin vers la peau (limitant l'apport musculaire en oxygène et nutriments), combinée aux contraintes mécaniques de l'effort, fragilise les fibres musculaires. Lorsque cette fragilisation dépasse les capacités d'adaptation du muscle, l'intégrité de la membrane cellulaire (sarcolemme) peut être altérée, favorisant la libération d'enzymes intracellulaires telles que la créatine kinase (CK) dans la circulation sanguine, ce qui constitue un marqueur des dommages musculaires.

1.2.1.5 Pathologies métaboliques

- Hyperthermie maligne d'effort

L'hyperthermie appelée aussi « coup de chaleur » est une élévation importante de la température centrale ($> 39^{\circ}\text{C}$) suite à un effort intense dans un milieu chaud accompagnée d'une déshydratation. Le corps n'a plus la capacité à évacuer la chaleur.

Fernández-Elías et coll. (2015), démontre que l'hyperthermie stimule par ailleurs davantage l'utilisation du glycogène.

- Ischémie digestive

L'hyperthermie maligne d'effort peut conduire à une ischémie digestive : l'augmentation de la température du tube digestif associée à une diminution du débit sanguin compromet l'irrigation du tube digestif. Cette ischémie provoque une altération de la perméabilité de la barrière intestinale, permettant le passage de toxines dans la circulation sanguine. Elle peut se manifester par des désordres digestifs tels que la diarrhée ou douleurs abdominales. Lors de cette ischémie, le tube digestif perd son étanchéité et libère des toxines qui vont alors passer dans le sang. (Millet, 2022)

Le passage de ces toxines dans le sang est extrêmement dangereux, c'est la troisième cause de décès des athlètes aux USA (Gergelé et coll. 2010).

- Insuffisance rénale aiguë

Lorsque l'organisme va vouloir évacuer sa chaleur par évaporation, la transpiration/sueur est élevée. L'équilibre hydro-électrolytique est régulé par les reins, ils ont un pouvoir de réguler le volume d'eau dans l'organisme. Lorsque la transpiration augmente, les reins vont diminuer la fabrication d'urine et leur vascularisation diminue car le sang va se concentrer aux organes vitaux. Ces phénomènes conjoints peuvent conduire à une insuffisance rénale.

- Hyponatrémie liée à l'effort

McGreal, K. et coll. (2016) explique que l'hyponatrémie liée à l'effort est un désordre électrolytique qui se rapporte à une diminution de la concentration plasmatique en sodium ($\leq 136 \text{ mmol/L}$) qui mène à une augmentation de la quantité d'eau intracellulaire et donc une augmentation du volume cellulaire.

C'est une pathologie qui est causée en plus grande partie par une consommation hydrique trop importante, mais un apport en électrolytes peut en réduire le risque, sans toutefois l'éliminer

complètement. Elle est donc souvent liée à une mauvaise gestion de l'hydratation (Hibon, 2021).

- Crampes musculaires

Tout d'abord, une crampe musculaire correspond à une contraction involontaire et prolongée survenant pendant ou après un effort physique.

Plusieurs études ont démontré que les crampes musculaires ne dépendaient pas réellement de la déshydratation ou des pertes minérales liées à la sueur.

Millet (2022), rapporte dans une étude menée sur la Western States 100 que les athlètes sujets aux crampes présentaient un taux sanguin de créatine kinase (CK) élevé.

Lors de l'épuisement du glycogène (accentué par l'hyperthermie), les muscles vont alors utiliser davantage les acides aminés comme substrat énergétique, ce qui provoque une augmentation du taux d'ammoniac.

L'augmentation du taux de CK et d'ammoniac perturbe alors la contraction musculaire et favorise la survenue des crampes.

De plus, la littérature actuelle suggère également un deuxième mécanisme complémentaire à l'apparition des crampes : l'altération du contrôle neuromusculaire (1.2.2.4).

1.2.2 Neurologie / neurophysiologie

1.2.2.1 Perception de l'effort

L'exposition à la chaleur provoque une élévation de la température corporelle, perçue par des thermorécepteurs. Ces derniers traduisent cette variation en signaux nerveux transmis au système nerveux central (SNC) où ils sont interprétés comme une sensation de chaleur, pouvant aller de l'inconfort à la douleur, contribuant ainsi à la perception de l'effort.

De plus, la chaleur induit également des modifications physiologiques touchant les muscles, le système respiratoire, cardiovasculaire etc.

Ainsi, la chaleur constitue un facteur déterminant qui intensifie la perception de l'effort.

1.2.2.2 Altération des fonctions cognitives

Plusieurs études se contredisent sur l'effet de la chaleur en elle-même sur l'altération des fonctions cognitives. Mais comme l'explique Gaoua (2010), ce n'est pas la température centrale absolue (39°C) qui induit des perturbations des fonctions cognitives, mais plus particulièrement

le changement relatif de la température centrale (Hancock, 1986 ; Hancock et Vasmatazidis, 2003).

De plus, H4H (site internet) démontre en rassemblant plusieurs études qu’avec un taux de déshydratation même inférieur à 2 % de la masse corporelle, les fonctions cognitives (notamment nos capacités de réaction, de réflexion, de mémoire, d’attention) sont diminuées (cf., **Annexe 5**).

On peut donc conclure qu’une augmentation de la température centrale au-dessus de 39°C causée par une thermorégulation insuffisante associée à une déshydratation, entraînent des perturbations des fonctions cognitives qui peuvent altérer notre état de vigilance et donc conduire à des blessures (trébuchage, chute etc.).

1.2.2.3 Fatigue neuromusculaire

Le système nerveux est composé de différentes branches :

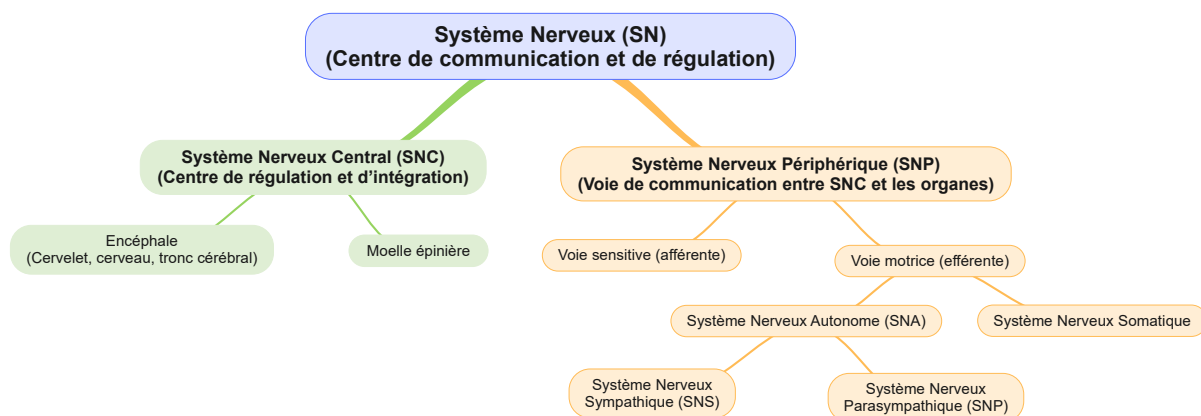


Figure 3 : Organigramme de la composition du Système Nerveux.

- Fatigue centrale

Le système nerveux central (SNC) constitue à la fois un centre d’intégration et de régulation. Il intègre les informations provenant du système nerveux périphérique (SNP) et élabore des réponses adaptées.

La fatigue du SNC est provoquée en premier lieu par une augmentation de l’activité neuronale et du stress physiologique.

Cette activité neuronale augmente car le cerveau doit recruter un plus grand nombre d'unités motrices afin d'activer les muscles. Cela mène à des modifications biochimiques cérébrales, qui entraînent principalement une diminution de l'efficacité de la sortie corticale motrice.

Pendant un effort dans des conditions chaudes, l'hyperthermie entraîne une élévation de la température cérébrale, accentuant ces déséquilibres biochimiques et renforçant la fatigue centrale (Tornero-Aguilera et coll., 2022).

- **Fatigue périphérique**

Le SNP est la voie de communication entre le SNC et les organes notamment les muscles.

La fatigue périphérique correspond à une diminution de l'efficacité de la jonction neuromusculaire accompagnée de modifications métaboliques et biochimiques au sein du muscle (Ament et Verkerke, 2009, Korzeniewski, 2019, Tornero-Aguilera et coll., 2022).

Cette fatigue peut être accentuée en ambiance chaude où l'élévation de la température musculaire et centrale accélère le métabolisme, favorise l'épuisement de glycogène et l'accumulation de métabolites, perturbant ainsi la fonction musculaire.

1.2.2.4 Variabilité de la fréquence cardiaque (VFC)

Comme abordé précédemment, la VFC (1.2.1.3), est influencée par le système nerveux autonome (dit aussi végétatif) qui est composé de deux branches :

- Le système nerveux sympathique (SNS) : il a un rôle accélérateur, c'est-à-dire qu'il va augmenter la fréquence cardiaque grâce à deux neuromédiateurs que sont l'adrénaline et la noradrénaline situés au niveau post-ganglionnaire. Il y a alors une diminution de la variation de la fréquence cardiaque. Ce système est activé lors des efforts ou pendant une situation stressante.
- Le système nerveux parasympathique (SNP) : il a un rôle décélérateur, c'est-à-dire qu'il va diminuer la fréquence cardiaque grâce à un neuromédiateur qu'est l'acétylcholine situé au niveau ganglionnaire et post-ganglionnaire. Ce système est activé lors de situation de repos ou de relaxation.

Ces deux systèmes interagissent constamment, créant cette variabilité. Néanmoins, elle peut être perturbée par des facteurs intermittents tel que l'exercice à la chaleur. La prise de mesure de cette variabilité peut donc permettre de déceler une anomalie (surentrainement, maladie), d'évaluer l'état de forme et surveiller la qualité de récupération.

Il y a 2 formes d'indicateurs dans la VFC :

- Coté sympathique : il y a une trop grande stimulation du SNS. L'athlète a besoin de repos et doit optimiser sa récupération. Afin d'aider le SNS à revenir à la normale et s'équilibrer avec le SNP, il est possible d'effectuer des exercices de relaxation, de sophrologie, de respirations abdominales etc. Les principaux symptômes vont être l'hyperexcitabilité, des troubles du sommeil, l'augmentation de la fréquence cardiaque de repos et à force vont causer une perte de poids...
- Coté parasympathique : l'athlète a aussi besoin de repos. Néanmoins, une activité modérée peut aider à relancer l'activité du SNS pour retourner à un équilibre. Les principaux symptômes vont être le sommeil facile, la diminution de la fréquence cardiaque de repos et a force causer des hypoglycémies au cours l'exercice, à long terme une dépression.

Le suivi de cette variabilité est donc essentiel afin de pouvoir avoir un suivi de l'état de forme de l'athlète mais aussi de nous alerter quand il tombe malade. Il faut bien être attentif car l'impact d'une séance peut avoir lieu plusieurs jours après.

Dans l'**Annexe 6**, on remarquera trois situations :

- Figure 14 : Coté sympathique activé, ce qui signifie que le SNS est faible.
- Figure 15 : Coté parasympathique activé, ce qui signifie que le SNS est faible.
- Figure 16 : Équilibre entre le SNS et SNP.

1.2.2.5 Pathologies neuromusculaires

- Rhabdomyolyse à l'effort

La rhabdomyolyse à l'effort est avant tout une pathologie neuromusculaire aiguë, correspondant à la destruction des cellules musculaires très souvent liée à une déshydratation, l'exposition à de forte chaleur ou encore à une mauvaise hydratation.

Cette destruction entraîne la libération du contenu cellulaire dans la circulation sanguine comme des protéines sarcoplasmique, des créatines phosphokinases, de la myoglobine, du potassium et du lactates déshydrogénases. Ce qui peut provoquer des conséquences métaboliques, telles que l'insuffisance rénale (1.2.1.6). Ainsi, la rhabdomyolyse à l'effort est une pathologie neuromusculaire par origine, avec des répercussions métaboliques secondaires.

- Crampes musculaires

Comme expliqué plus haut (1.2.1.6), les crampes musculaires sont causées notamment par une altération du contrôle neuromusculaire.

Des scientifiques tels que Millet (2022), ou bien Laurent et coll., (2018), explique que cela provient des effets de la fatigue sur la commande nerveuse et donc sur le contrôle de l'activation musculaire (cf., **Annexe 7**).

1.2.3 Psychologie

Perception de l'effort

Au-delà des facteurs neurologiques, la perception de l'effort est aussi influencée par des facteurs psychologiques.

En effet, « en condition de chaleur, les facteurs psychologiques comme la motivation, la volonté de poursuivre l'effort et les perceptions thermiques, peuvent être négativement impactés avant tout changement physiologique mesurable. » (Robin et coll., 2023)

Ainsi, deux individus confrontés aux mêmes contraintes thermiques et physiques peuvent ressentir des niveaux d'effort très différents, en fonction de leur état mental et de leurs ressources psychologiques pendant l'effort.

Nous pouvons quantifier cette charge avec la méthode Rating of Perceived Exertion (RPE) (Foster, 1999), mais aussi avec des questionnaires tels que le Profile Of Mood States (POMS), le Recovery-Stress Questionnaire Sport (RESTQ-SPORT) etc.

Système nerveux

La fatigue nerveuse comme vu précédemment, et notamment dans la figure 3, implique le SNC et le SNP.

La fatigue centrale implique directement le cerveau et entraîne une baisse de motivation, de vigilance et une envie de ralentir ou de dormir.

Alors que la fatigue périphérique, influence indirectement l'état psychologique en augmentant la perception de l'effort.

L'ensemble des mécanismes décrits met en évidence la complexité des interactions entre régulation cardiovasculaire, thermorégulation, métabolisme énergétique, fatigue musculaire et charge psychologique lors d'un effort prolongé en ambiance chaude. Toutefois, dans le cadre

de ce mémoire, il n'était pas possible d'explorer de manière exhaustive chacun de ces paramètres (tels que les concentrations sanguines en lactate, ammoniac etc.)

Les indicateurs retenus pour l'expérimentation ont donc été sélectionnés en fonction de leur accessibilité pratique et de leur pertinence scientifique, à savoir : la fréquence cardiaque et sa variabilité (régulation autonome), la température corporelle et les pertes hydriques (thermorégulation), des tests de fatigue musculaire, un test cognitif, ainsi que la perception subjective de l'effort (RPE).

Ces mesures permettent d'apporter une lecture intégrée de l'impact de la chaleur sur la performance et la fatigue en trail running, tout en restant adaptées au contexte expérimental.

2. Méthodologie

2.1 Participants

Afin de mener à bien mon étude, j'ai sollicité la participation de 10 pratiquants du même âge (22 ± 2 ans), répartis équitablement entre 5 femmes et 5 hommes. Tous pratiquent le trail running à un niveau intermédiaire (pratique régulière ≥ 3 séances / semaines ou ≥ 4 heures / semaines).

Le choix de prendre un échantillon composé seulement de traileurs de niveaux intermédiaires repose sur des considérations méthodologiques et pratiques. Ce niveau de pratique permet d'obtenir des résultats relativement homogènes et comparables, notamment avec des participants présentant des profils d'âge similaires, afin de réduire la variabilité interindividuelle, au vu du faible nombre de participants.

2.2 Description du protocole

Le protocole était composé de 2 sessions de test : une session à effectuer en ambiance tempérée ($< 25^{\circ}\text{C}$) et une autre session à effectuer en ambiance chaude ($> 30^{\circ}\text{C}$).

Afin d'avoir des données en corrélation qui ne sont pas perturbées par la progression des athlètes, nous avons dû effectuer cette série de test sur une période rapprochée tout en assurant la possibilité d'avoir les deux conditions de température.

Les tests ont alors été effectués au mois de juin dans un climat de montagne (Embrun) avec des horaires différents.

La session en ambiance tempérée ($< 25^{\circ}\text{C}$) a été effectuée le matin tôt (8 h).

La deuxième session, en ambiance chaude ($> 30^{\circ}\text{C}$) s'est effectuée en début d'après-midi (13 h) à deux semaines d'intervalle.

Les pratiquants ont réalisé un parcours de 14 km (600 m d+) en autonomie à allure compétition dans les deux sessions.

Protocole expérimental

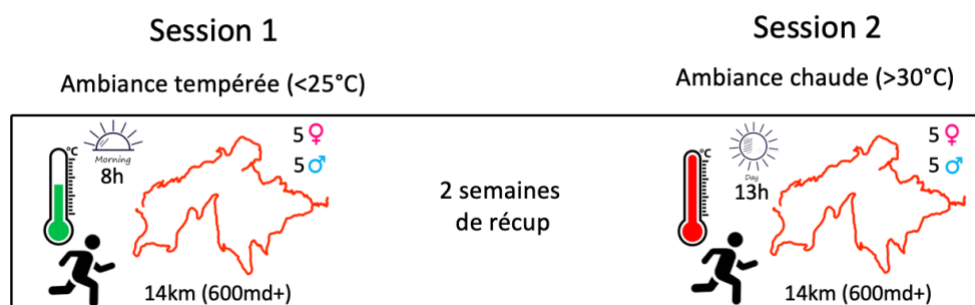


Figure 4 : Explication du protocole expérimental mis en place.

2.3 Mesures

Lors du protocole, j'ai utilisé plusieurs mesures afin de déterminer la charge interne et externe de l'effort produit dans les 2 ambiances thermiques.

Mesures	
Charge interne	- Fréquence cardiaque avec ceinture cardiaque (FC), au repos / pendant l'effort / à la récupération (0 min / 5 min / 15 min) - Variabilité de la FC (VFC les 3 jours qui suivent avec l'application Élite HRV) - Température corporelle externe avant / après effort avec un thermomètre infrarouge frontal - Consommation d'eau + perte hydrique (poids des flasques avant / après effort + poids corporel avant / après effort mesurés avec une balance) - Fatigue musculaire (test CMJ avec l'application My Jump) avant et après effort + test de proprioception (Y-Balance test) avant et après effort - Perception de l'effort (RPE) - Fatigue mentale (test cognitif (Stroop test) avant et après effort) - Dépense énergétique (montre gps)
Charge externe	- Vitesse moyenne et variation de rythme (montre gps) - Cadence et puissance (montre gps) - Température extérieure (thermomètre)

2.4 Analyses

Les données collectées ont été traitées afin d'évaluer l'impact des deux ambiances thermiques sur la charge interne et externe de l'effort.

Donc, pour chaque charge, les mesures ont été faite en ambiance tempérée et en ambiance chaude, en séparant les données hommes et les femmes.

Pour la fréquence cardiaque (FC) et variabilité cardiaque (VFC) :

Les données de chacun des athlètes du groupe homme et femme ont été moyennées ensemble afin d'avoir la moyenne du groupe, avec le calcul de l'écart type : moyenne $\pm$ écart-type (FC repos, FC de récupération 0 min, 5 min, 15 min et VFC J+1, J+2, J+3).

La VFC a été mesurée avec l'application Élite HRV qui utilise le score HRV (0-100) propre à leur application.

En ce qui concerne les données de la FC à l'effort, elles ont été moyennées automatiquement par la montre GPS.

Afin de voir les impacts et les différences entre chaque ambiance avant et après l'effort, les valeurs absolues et des variations en pourcentage ont été calculées.

Les formules utilisées :

$$\text{Moyenne } x = \frac{x1 + x2 + x3 + x4 + x5}{5}$$

Valeur absolue = M post effort – M pré effort

$$\text{Valeur relative (\%)} = \frac{x \text{ post effort} - x \text{ pré effort}}{x \text{ pré effort}} \times 100$$

Les données de la température corporelle externe (°C), le poids pré et post effort mais aussi le test Contre Mouvement Jump (CMJ) avec les sauts qui ont été filmés et mesurés avec l'application My Jump ont été traités de la même manière.

Les pertes hydriques ont été calculées avec le poids (kg) pré et post effort ainsi qu'avec le poids (g) de la consommation d'eau contenue dans les flasques.

Pertes hydriques = (poids pré – poids post) + poids consommation d'eau

Pour la perception de l'effort, ainsi que pour les données vitesse, puissance, cadence, dépense énergétique (moyennées automatiquement par la montre GPS), un calcul de la valeur absolue, de valeur relative et de la moyenne $\pm$ écart-type a été effectué, après effort (RPE) ou pendant effort.

Pour analyser les données du test Y-Balance, il a fallu dans un premier temps normaliser la distance par la longueur de jambe.

$$\text{Distance normalisée (\%)} = \frac{\text{Distance atteinte (cm)}}{\text{Longueur de jambe (cm)}} \times 100$$

Les valeurs du Y-Balance sont ensuite mesurées pour chaque jambe en mesurant la distance obtenue dans trois directions de l'espace. Il a ensuite été calculé une moyenne des trois essais pour chaque jambe (gauche et droite) puis une moyenne entre la valeur des deux jambes pour obtenir une moyenne normalisée des deux jambes ensemble.

Avec ces moyennes normalisées, il a été possible de calculer la moyenne $\pm$ écart-type ainsi que la moyenne de la valeur relative en pourcentage.

Pour le Stroop test, sur une durée de 45 s, j'ai compté le nombre de mots corrects ainsi que le nombre d'erreurs. J'ai ensuite mesuré pour les mots corrects et le nombre d'erreurs, la valeur absolue, valeur relative et la moyenne $\pm$ écart-type

3. Résultats

Pour commencer, les températures ont été mesurées avant de commencer les tests.

Ambiance tempérée : 23°C / Ambiance chaude : 32°C

3.1 Charge interne

3.1.1 Fréquence cardiaque (FC) et variabilité cardiaque (VFC)

FC au repos :

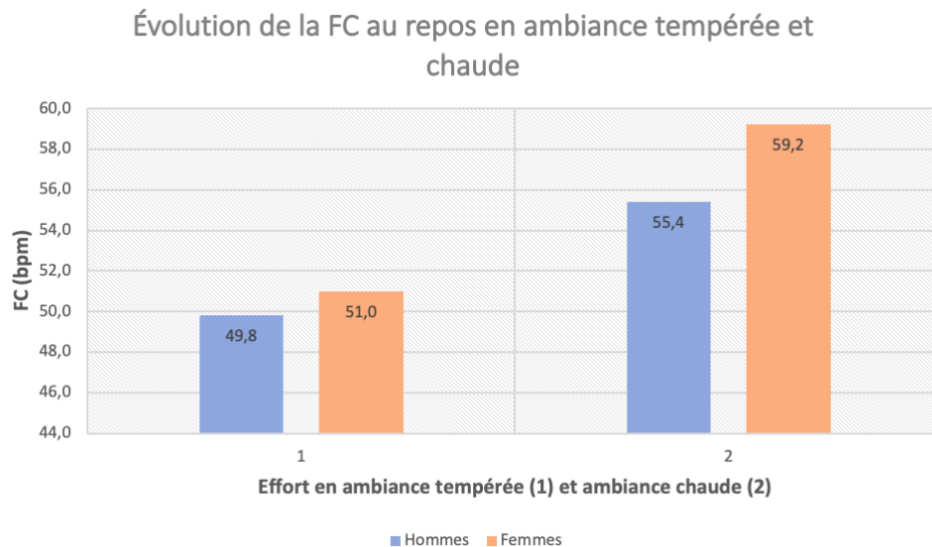


Figure A : Évolution de la FC au repos en ambiance tempérée et chaude

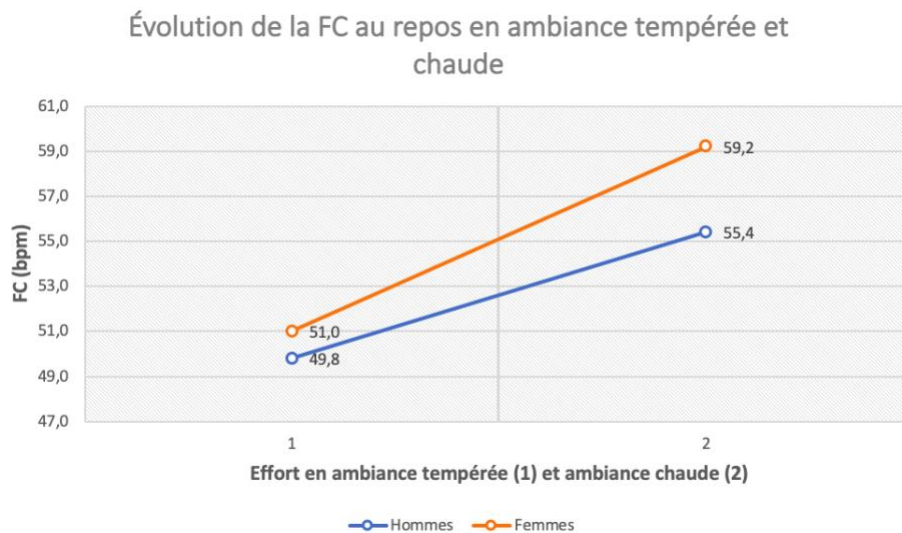


Figure B : Évolution de la FC au repos en ambiance tempérée et chaude

La FC de repos mesurée avant l'effort présente déjà des différences selon l'ambiance thermique mais aussi selon le sexe.

Les femmes semblent être plus sensibles que les hommes à la chaleur, au repos.

En ambiance tempérée, la FC de repos moyenne était de $49,8 \pm 3,9$ bpm pour les hommes, $51,0 \pm 5,8$ bpm pour les femmes.

En ambiance chaude, cette valeur était plus élevée atteignant $55,4 \pm 3,4$ bpm pour les hommes et $59,2 \pm 4,1$ bpm pour les femmes.

La variation entre les deux ambiances est de : H = + 11,2 % / F = + 16,0 %.

La figure B illustre cette évolution. On observe une augmentation globale de la FC de repos dans les deux groupes lors de l'exposition à la chaleur, avec une variabilité interindividuelle plus marquée chez les femmes.

FC à l'effort :

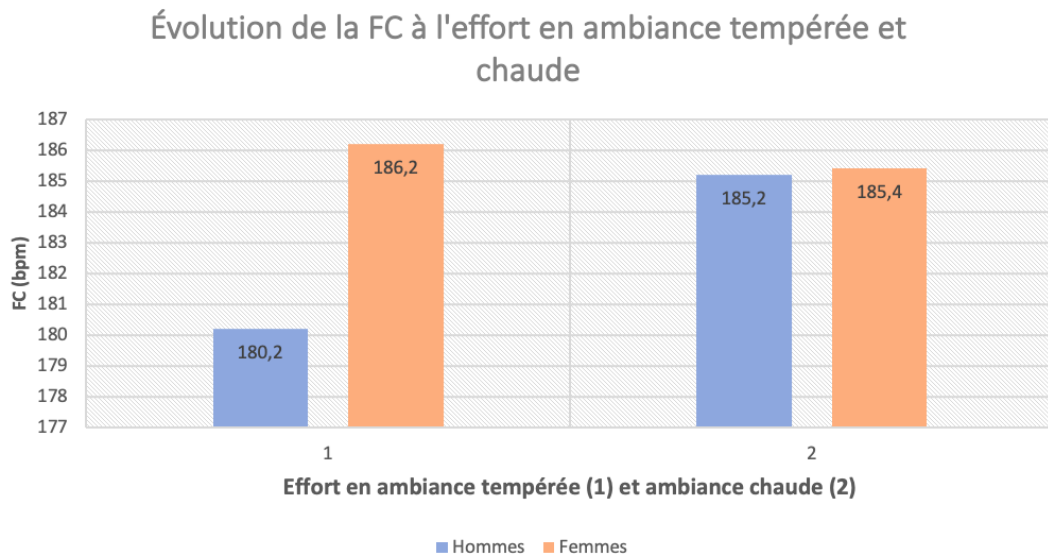


Figure C : Évolution de la FC à l'effort en ambiance tempérée et chaude

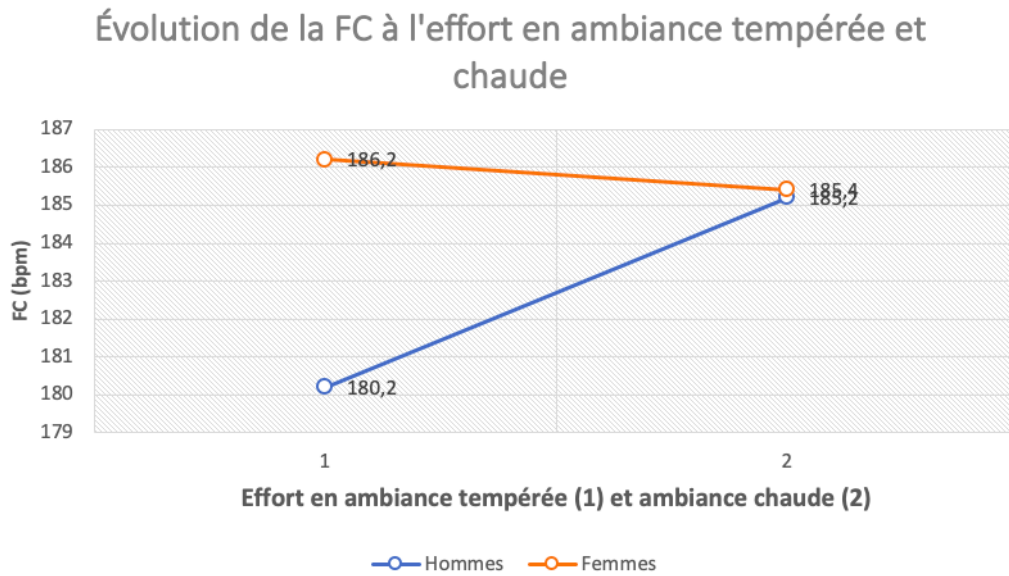


Figure D : Évolution de la FC à l'effort en ambiance tempérée et chaude

La fréquence cardiaque moyenne à l'effort, mesurée sur l'ensemble du parcours par leurs montre GPS, est restée globalement similaire entre les deux conditions thermiques.

En ambiance tempérée, la FC moyenne est de $180,2 \pm 2,4$ bpm chez les hommes et de $186,2 \pm 1,3$ bpm chez les femmes.

En ambiance chaude, les valeurs sont de $185,2 \pm 2,4$ bpm chez les hommes et de $185,4 \pm 4,0$ bpm chez les femmes.

Chez certains participants mais notamment chez les femmes, on a pu observer une FC légèrement inférieure en condition chaude.

La variation entre les deux ambiances est de : H = + 2,77 % / F = - 0,43 %.

La figure D illustre bien ces résultats, mettant en évidence la diminution de la FC moyenne à l'effort en ambiance chaude pour les femmes et une légère augmentation chez les hommes.

FC post effort (récupération 0 min / 5 min / 15 min) :

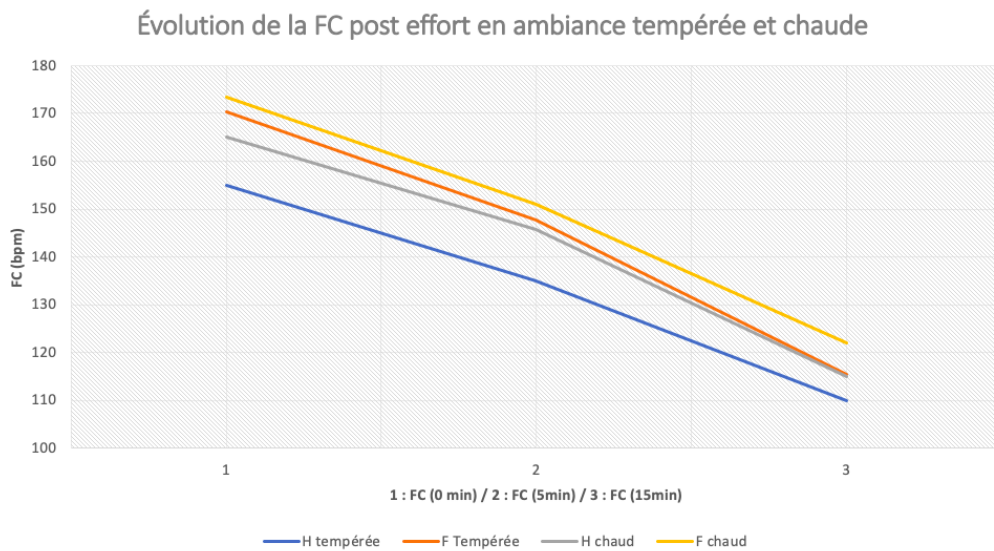


Figure E : Évolution de la FC post effort en ambiance tempérée et chaude

La fréquence cardiaque mesurée immédiatement après l'effort (0 min), puis à 5 et 15 minutes de récupération, montre une différence nette entre les deux ambiances thermiques.

En ambiance tempérée, pour les hommes, la FC diminue progressivement de $155,0 \pm 4,1$ bpm à 0 min, à $135,0 \pm 3,2$ bpm pour 5 min, pour atteindre $110,0 \pm 3,8$ bpm à 15 min.

Pour les femmes, la FC diminue de $170,4 \pm 2,0$ bpm à 0 min, à $147,8 \pm 2,6$ bpm pour 5 min, pour atteindre $115,4 \pm 3,0$ bpm à 15 min.

En ambiance chaude, la FC reste plus élevée à chaque temps de mesure :

Hommes = $165,0 \pm 4,1$ bpm à 0 min ; $145,8 \pm 3,2$ bpm pour 5 min ; $115,0 \pm 4,1$ bpm à 15min

Femmes = $173,4 \pm 2,4$ bpm à 0 min ; $151,0 \pm 2,0$ bpm pour 5 min ; $122,0 \pm 3,2$ bpm à 15min

On observe une récupération légèrement plus lente en ambiance chaude.

La variation entre les deux ambiances est de : H = 0 min : + 6,5 % ; 5 min : + 8,0 % ; 15 min : + 4,5 % / F = 0 min : + 1,8 % ; 5 min : + 2,2 % ; 15 min : + 5,7 %.

La figure E illustre ces différences de cinétique de récupération, avec un retour plus tardif vers les valeurs de repos en ambiance chaude.

VFC (J+1, J+2, J+3) :

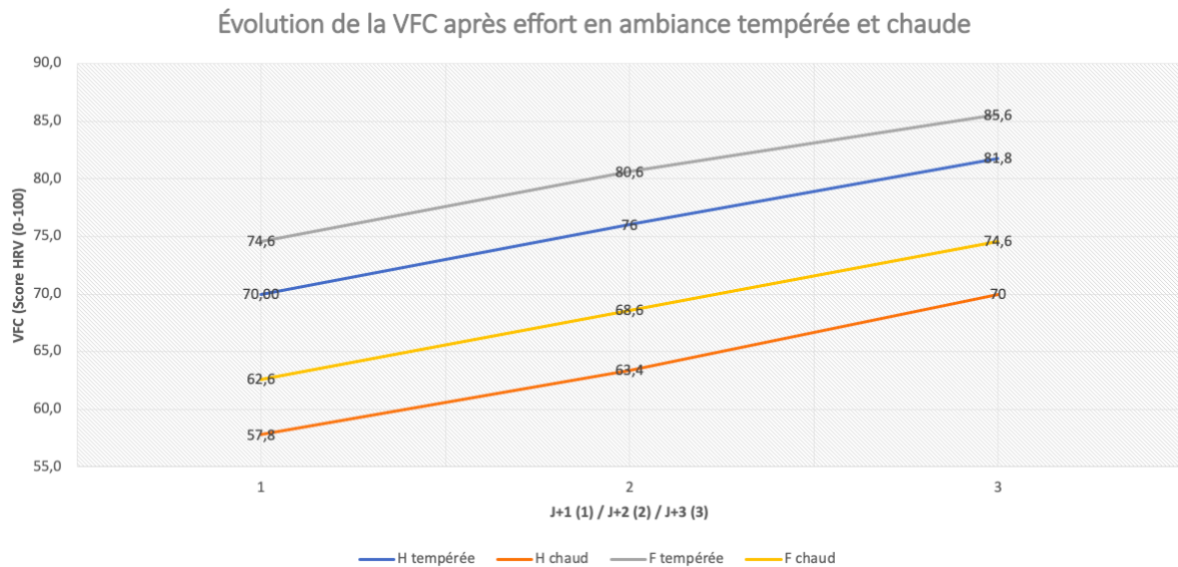


Figure F : Évolution de la VFC après effort en ambiance tempérée et chaude

En ambiance tempérée, on observe une faible VFC à J+1 (H : $70,0 \pm 1,6$ / F : $74,6 \pm 1,1$) traduisant une fatigue résiduelle, suivie d'une remontée progressive à J+2 (H : $76,0 \pm 1,6$ / F : $80,6 \pm 1,1$) et un retour quasi complet aux valeurs de repos à J+3 (H : $81,8 \pm 1,3$ / F : $85,6 \pm 1,1$)

En ambiance chaude, la valeur initiale de la VFC est plus élevée J+1 (H : $57,8 \pm 1,9$ / F : $62,6 \pm 1,1$), et la remontée plus lente (H : $63,4 \pm 2,1$ / F : $68,6 \pm 1,1$ à J+2 ; H : $70,0 \pm 1,6$ / F : $74,6 \pm 1,1$ à J+3), indiquant un délai de récupération plus long.

La variation entre les deux ambiances est de H = J+1 : - 17,4 % ; J+2 : - 16,6 % ; J+3 :- 14,4 % / F = J+1 : - 16,1 % ; J+2 : - 14,9 % ; J+3 : - 12,9 %.

Chez certains sujets, la VFC reste inférieure aux valeurs basales à J+3.

La figure F illustre ces différences de cinétique, avec une récupération complète à J+3 en ambiance tempérée, et incomplète en ambiance chaude.

3.1.2 Température corporelle externe

Évolution de la température corporelle (°C) lors d'un effort en ambiance tempérée et chaude

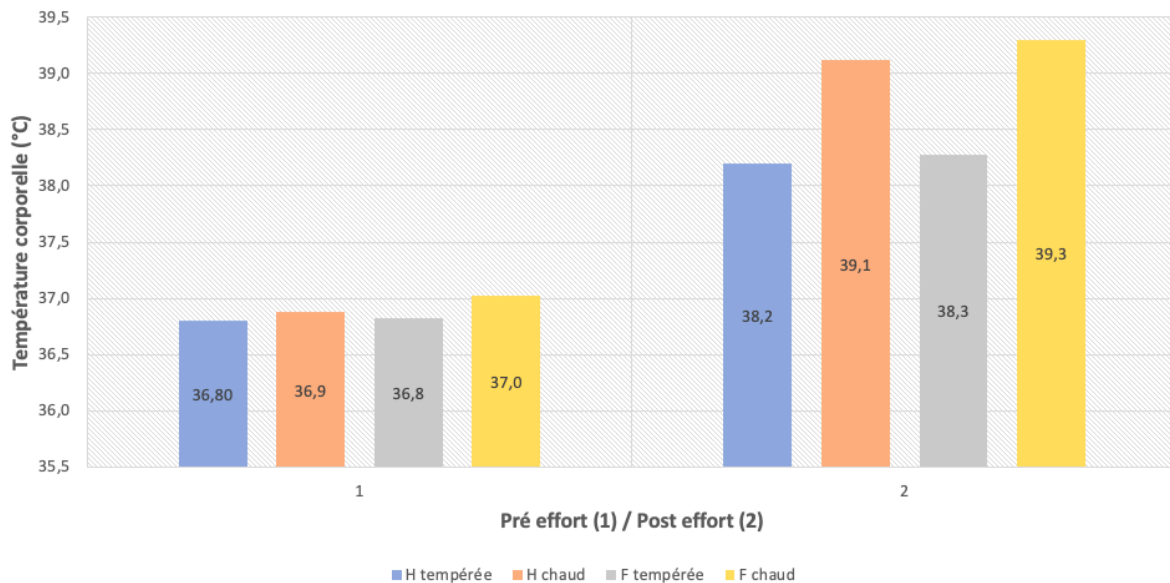


Figure G : Évolution de la température corporelle (°C) lors d'un effort en ambiance tempérée et chaude

On observe dans la figure G, une élévation significative de la température corporelle externe après l'effort, dans les deux conditions environnementales.

En ambiance tempérée, la température corporelle passe en moyenne de H = 36,8 °C ($\pm 0,2$) / F = 36,8°C ($\pm 0,1$) avant effort à H = 38,2°C ($\pm 0,3$) / F = 38,3°C ($\pm 0,2$) après effort, soit une augmentation absolue de : H = + 3,8°C / F = + 4,0°C.

En ambiance chaude, l'élévation est plus marquée, avec une température moyenne de H = 36,9°C ($\pm 0,1$) / F = 37,0°C ($\pm 0,5$) au repos et H = 39,1°C ($\pm 0,1$) / F = 39,3°C ($\pm 0,2$) après effort soit une augmentation de : H = + 6,1°C / F = + 6,2°C

En passant d'une ambiance tempérée à une ambiance chaude, il y a donc eu une augmentation de : H = + 2,4 % / F = + 2,7 % de la température corporelle après effort.

3.1.3 Pertes hydriques

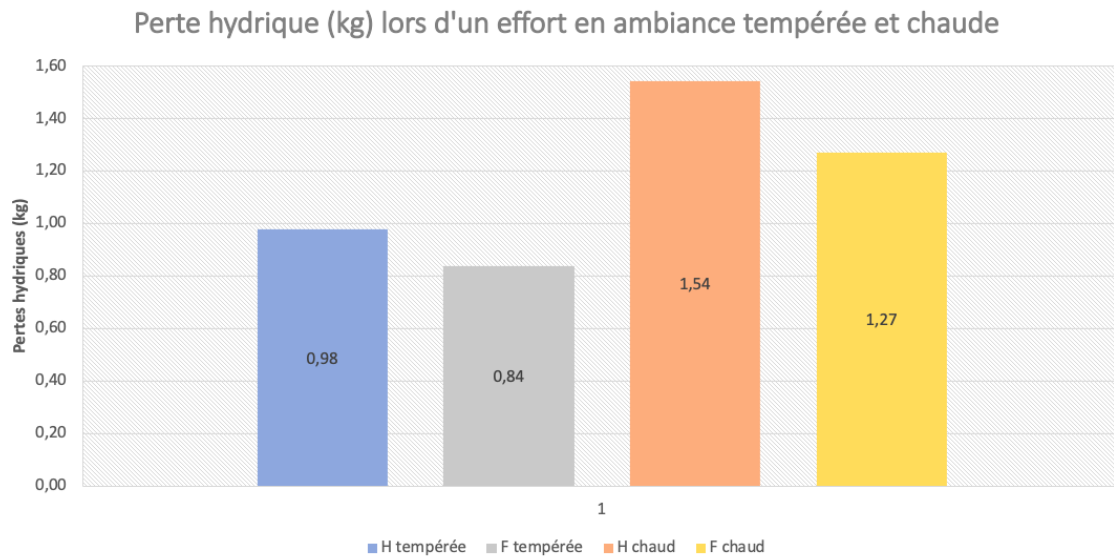


Figure H : Différence de perte hydrique (kg) lors d'un effort en ambiance tempérée et chaude

L'analyse des variations de poids corporel avant et après effort montre une perte hydrique significative dans les deux conditions environnementales.

En ambiance tempérée, la perte moyenne est de $H = 0,98 \text{ kg } (\pm 0,30)$ / $F = 0,84 \text{ kg } (\pm 0,18)$ soit $H = - 1,02 \%$ / $F = - 1,10 \%$ du poids corporel initial.

En ambiance chaude, la perte est accentuée avec une moyenne de $H = 1,54 \text{ kg } (\pm 0,06)$ / $F = 1,27 \text{ kg } (\pm 0,12)$ soit $H = - 0,94 \%$ / $F = - 1,26 \%$ du poids corporel initial.

La consommation d'eau a été variable selon les participants (certains ayant choisi de ne pas emporter de boisson notamment en condition ambiante).

En ambiance chaude, le groupe homme a consommé davantage d'eau que les femmes, ce qui conduit à un pourcentage de poids corporel inférieur comparé à celui mesuré en ambiance tempérée.

3.1.4 Fatigue musculaire

3.1.4.1 Test CMJ

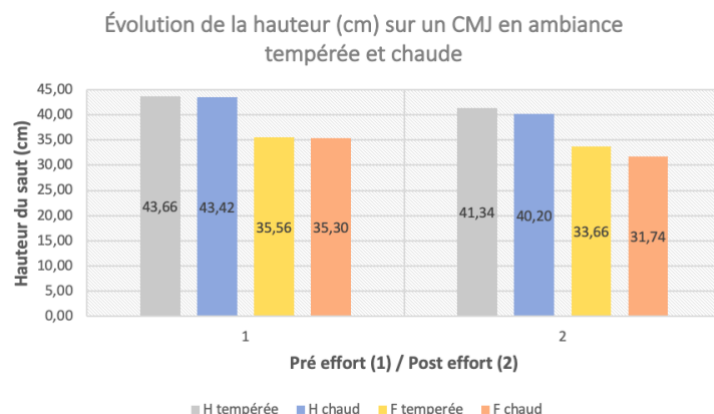


Figure I : Évolution de la hauteur (cm) sur un CMJ en ambiance tempérée et chaude

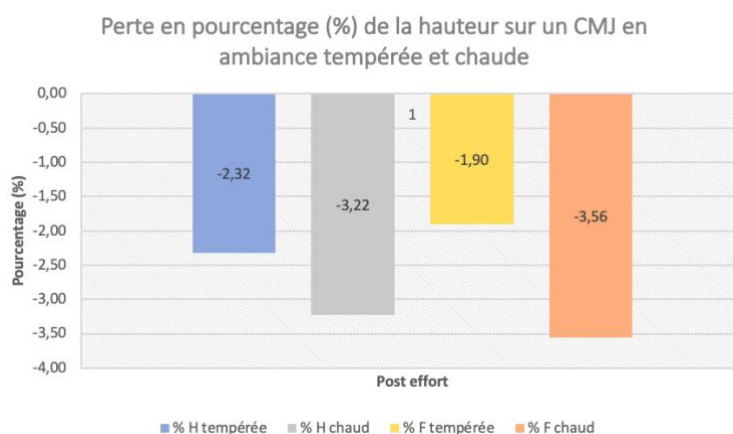


Figure J : Perte en pourcentage (%) de la hauteur sur un CMJ en ambiance tempérée et chaude

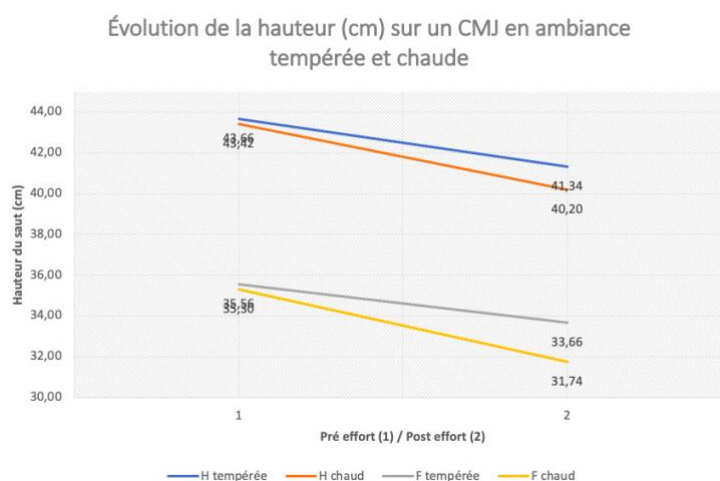


Figure K : Évolution de la hauteur (cm) sur un CMJ en ambiance tempérée et chaude

Les résultats du test CMJ mettent en évidence une diminution de la performance de la détente verticale après effort, peu importe les conditions ambiantes de l'effort réalisé.

On observe dans les figures I et K, l'évolution de la hauteur des sauts sur un CMJ dans les deux ambiances.

En ambiance tempérée, la hauteur moyenne de saut est de $H = 43,66 \text{ cm } (\pm 1,42)$ /

$F = 35,56 \text{ cm } (\pm 1,31)$ avant effort. Puis passe en post effort à $H = 41,34 \text{ cm } (\pm 1,32)$ /

$F = 33,66 \text{ cm } (\pm 1,20)$ soit une diminution significative de : $H = - 3,57 \%$ / $F = - 2,98 \%$ observable dans la figure J.

En ambiance chaude, la hauteur moyenne de saut est de $H = 43,42 \text{ cm } (\pm 1,40)$ / $F = 35,30 \text{ cm } (\pm 1,33)$ avant effort. Puis passe en post effort à $H = 40,20 \text{ cm } (\pm 1,16)$ / $F = 31,74 \text{ cm } (\pm 1,28)$ soit une diminution significative de : $H = - 7,42 \%$ / $F = - 8,78 \%$ (cf. Figure J).

3.1.4.2 Test Y-Balance

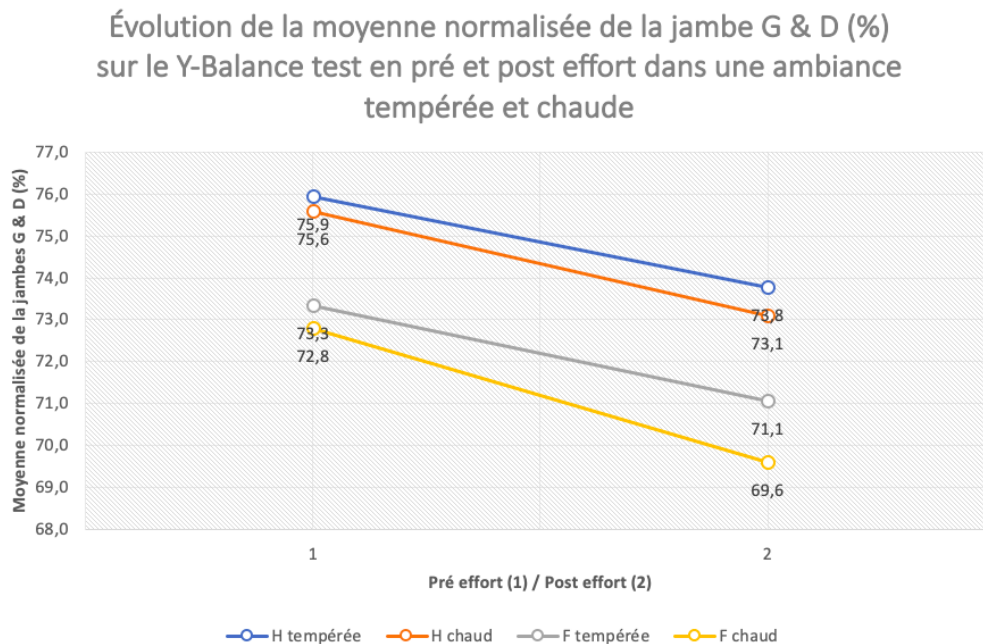


Figure L : Évolution de la moyenne normalisée de la jambe G & D (%) sur le Y-Balance test en pré et post effort en ambiance tempérée et chaude

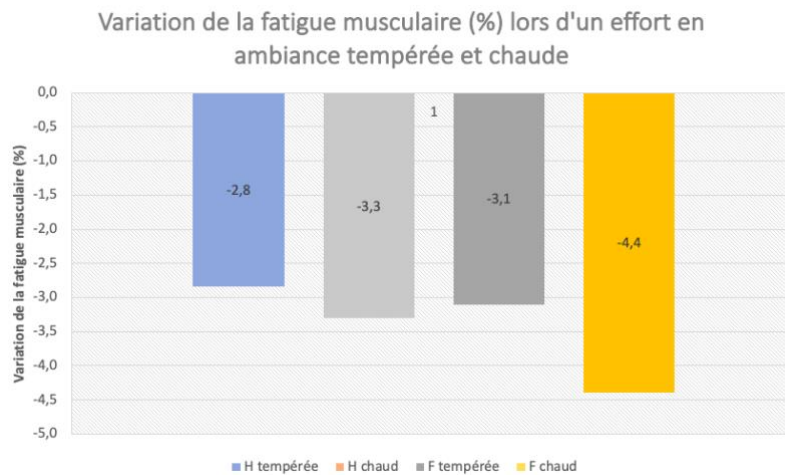


Figure M : Variation de la fatigue musculaire (%) lors d'un effort en ambiance tempérée et chaude

La figure L montre une diminution des performances au test Y-Balance après l'effort.

En ambiance tempérée, la distance normalisée moyenne de la jambe Gauche et Droite est de $H = 75,9 \% (\pm 1,0) / F = 73,3 \% (\pm 1,4)$ avant effort. Puis passe en post effort à $H = 73,8 \% (\pm 0,9) / F = 71,1 \% (\pm 1,4)$ soit une diminution significative de : $H = - 2,8 \% / F = - 3,1 \%$ observable dans la figure M.

En ambiance chaude, la distance normalisée moyenne de la jambe Gauche et Droite est de $H = 75,6 \% (\pm 0,9) / F = 72,8 \% (\pm 1,4)$ avant effort. Puis passe en post effort à $H = 73,1 \% (\pm 0,8) / F = 69,6 \% (\pm 1,1)$ soit une diminution significative de : $H = - 3,3 \% / F = - 4,4 \%$ (cf. Figure M).

3.1.5 Perception de l'effort

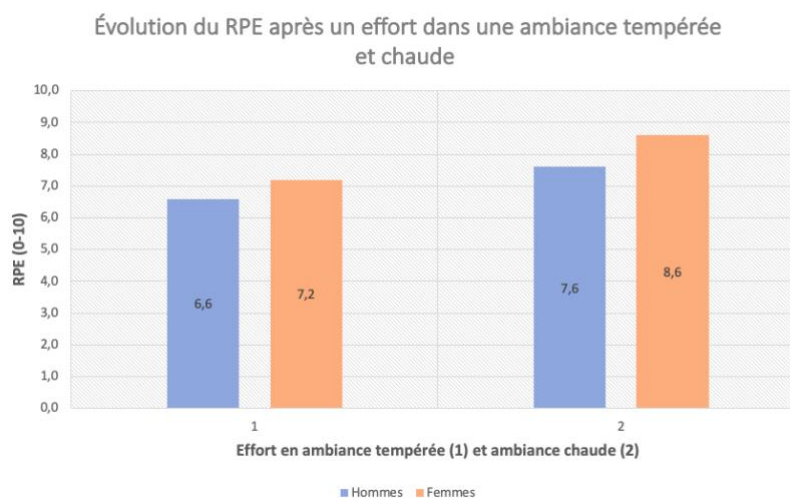


Figure N : Évolution du RPE après un effort dans une ambiance tempérée et chaude

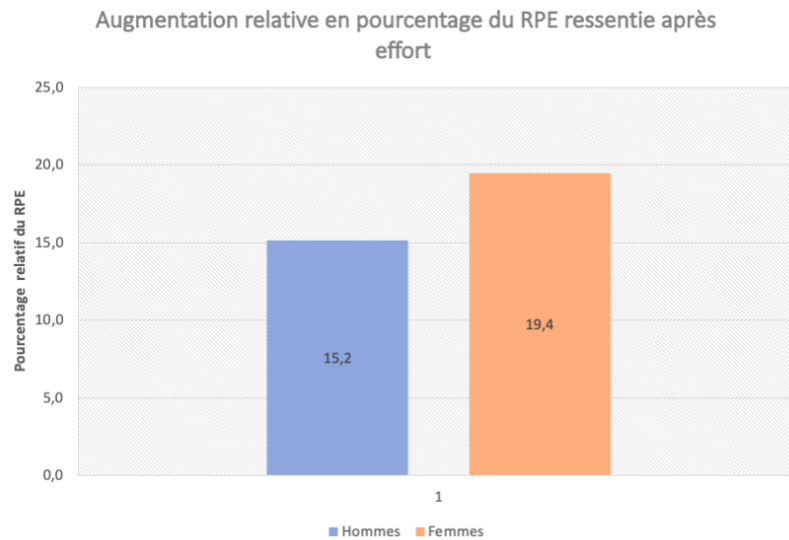


Figure O : Augmentation relative en pourcentage du RPE ressentie après effort

La figure N montre en comparaison le score RPE ressenti après effort dans les deux ambiances thermiques.

Donc après effort, en ambiance tempérée, le RPE est de $H = 6,6 (\pm 0,5)$ / $F = 7,2 (\pm 0,4)$.

En ambiance chaude, le RPE est de $H = 7,6 (\pm 0,5)$ / $F = 8,6 (\pm 0,5)$.

L'augmentation relative de la perception de l'effort est de + 15,2 % chez les hommes et + 19,4 % chez les femmes (cf. Figure O).

3.1.6 Fatigue mentale – test cognitif (Stroop test)

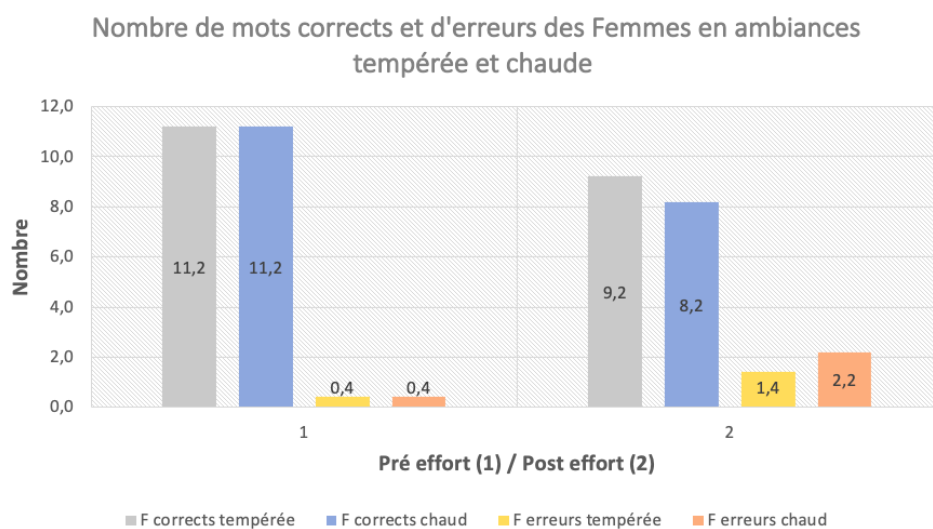


Figure P : Nombre de mots corrects et d'erreurs des femmes en ambiance tempérée et chaude

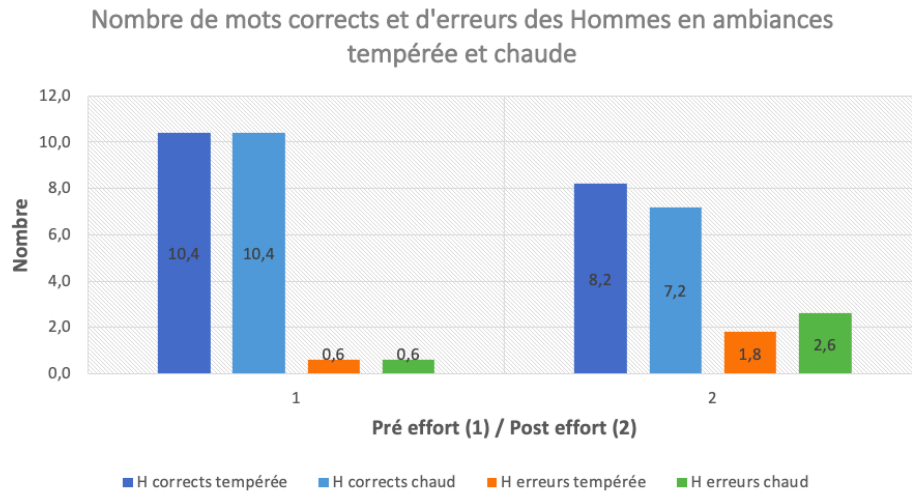


Figure Q : Nombre de mots corrects et d'erreurs des hommes en ambiance tempérée et chaude

On observe dans la figure P et Q, le nombre de mots corrects ainsi que les erreurs pour les hommes et les femmes dans les deux ambiances.

En ambiance tempérée et en ambiance chaude le nombres de mots corrects et le nombres d'erreurs avant l'effort était similaire. La différence de température n'a pas eu d'impact dans leur fonction cognitive au repos.

En ambiance tempérée et chaude avant effort le nombre de mots corrects est de $H = 10,4 (\pm 1,0) / F = 11,2 (\pm 0,7)$. Le nombre d'erreurs est de $H = 0,6 (\pm 0,5) / F = 0,4 (\pm 0,5)$.

Cependant nous observons une nette différence en post effort :

En ambiance tempérée, le nombre de mots corrects est de $H = 8,2 (\pm 0,8) / F = 9,2 (\pm 0,8)$. Le nombre d'erreurs est de $H = 1,8 (\pm 0,4) / F = 1,4 (\pm 0,5)$.

En ambiance chaude, le nombre de mots corrects est de $H = 7,2 (\pm 0,8) / F = 8,2 (\pm 0,8)$. Le nombre d'erreurs est de $H = 2,6 (\pm 0,5) / F = 2,2 (\pm 0,4)$.

On observe qu'il y a un plus grand nombre d'erreurs après effort d'autant plus en ambiance chaude.

3.1.7 Dépense énergétique

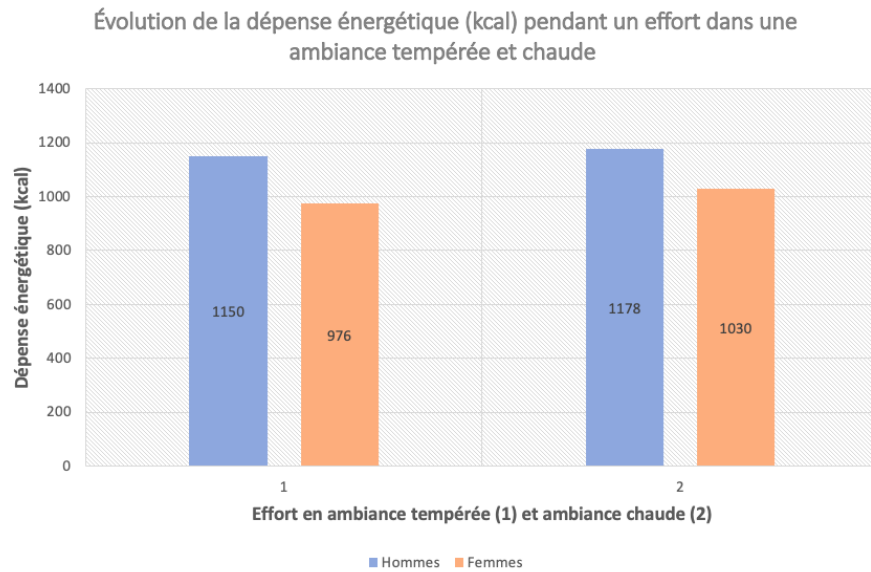


Figure U : Évolution de la dépense énergétique (kcal) pendant un effort dans une ambiance tempérée et chaude

La figure U montre l'évolution de la dépense énergétique (kcal) pendant un effort dans les deux ambiances thermiques, montrant une augmentation de cette dépense chez les athlètes en ambiance chaude.

En ambiance tempérée, la dépense énergétique est de $H = 1150 \text{ kcal } (\pm 22,4)$ / $F = 976 \text{ kcal } (\pm 30,5)$.

En ambiance chaude, elle est de $H = 1178 \text{ kcal } (\pm 24,06)$ / $F = 1030 \text{ kcal } (\pm 98,6)$.

Soit une augmentation de $H = + 2,4 \%$ / $F = + 5,5 \%$ de la dépense énergétique en kcal.

3.2 Charge externe

3.2.1 Vitesse

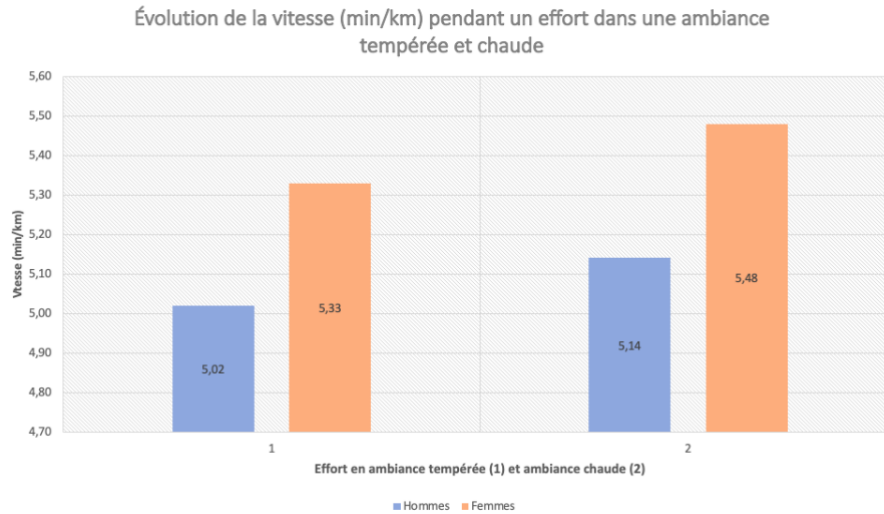


Figure R : Évolution de la vitesse (min/km) pendant un effort dans une ambiance tempérée et chaude

La figure R montre la dégradation de la vitesse (min/km) en ambiance chaude, traduisant une baisse de performance dans ces conditions.

En ambiance tempérée, la vitesse est de H = 5'02/km ($\pm 0'12$) / F = 5'33/km ($\pm 0'06$).

En ambiance chaude, elle est de H = 5'14/km ($\pm 0'09$) / F = 5'48/km ($\pm 0'08$).

Soit une diminution de H = - 2,4 % / F = - 2,8 % de la vitesse.

3.2.2 Puissance

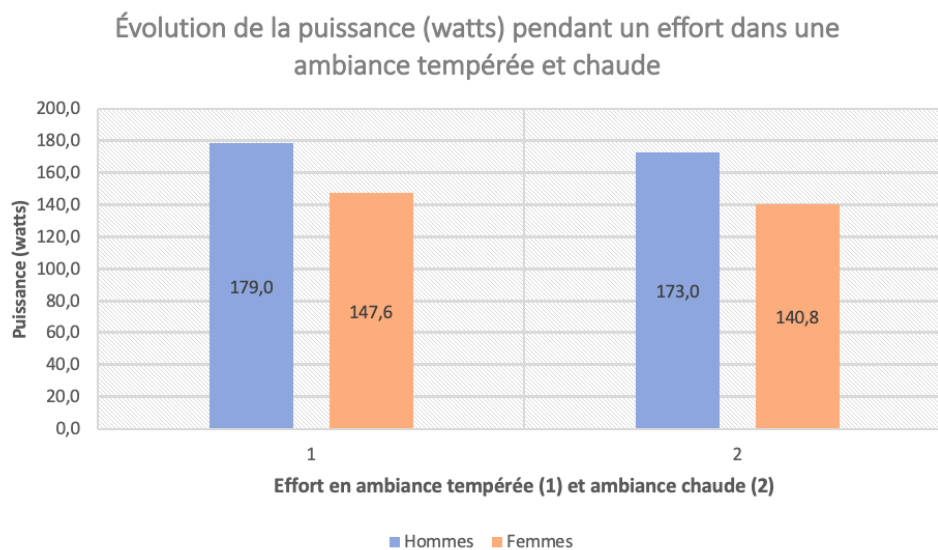


Figure S : Évolution de la puissance (watts) pendant un effort dans une ambiance tempérée et chaude

La figure S montre l'évolution de la puissance (watts) pendant un effort dans les deux ambiances thermiques, montrant une légère baisse de performance en ambiance chaude.

En ambiance tempérée, la puissance est de $H = 179,0 \text{ W} (\pm 3,8)$ / $F = 147,6 \text{ W} (\pm 8,6)$.

En ambiance chaude, elle est de $H = 173,0 \text{ W} (\pm 3,7)$ / $F = 140,8 \text{ W} (\pm 7,6)$.

Soit une diminution de $H = - 3,4 \%$ / $F = - 4,6 \%$ de la puissance en watts en ambiance chaude.

3.2.3 Cadence

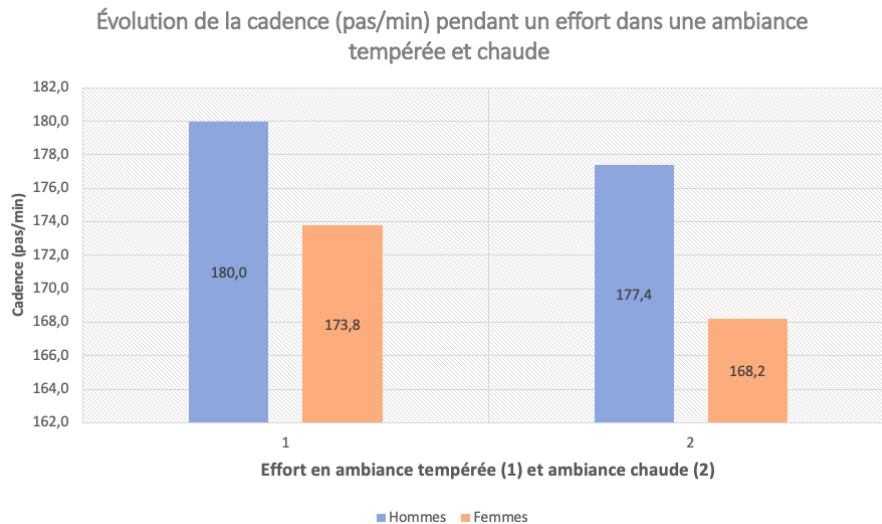


Figure T : Évolution de la cadence (pas/min) pendant un effort dans une ambiance tempérée et chaude

La figure T montre l'évolution de la cadence (pas/min) pendant un effort dans les deux ambiances thermiques, montrant une légère baisse en ambiance chaude chez les hommes, avec une différence plus marquée chez les femmes.

En ambiance tempérée, la cadence est de $H = 180 \text{ pas/min} (\pm 1,6)$ / $F = 174 \text{ pas/min} (\pm 4,7)$.

En ambiance chaude, elle est de $H = 177 \text{ pas/min} (\pm 1,7)$ / $F = 168 \text{ pas/min} (\pm 6,3)$.

Soit une diminution de $H = - 1,4 \%$ / $F = - 3,2 \%$ de la cadence en pas/min.

4. Discussion

Rappel des résultats obtenus dans l'étude :

L'objectif de cette étude était d'évaluer l'impact de la chaleur sur la charge interne et externe lors d'un effort identique : trail de 14 km avec 600 m de dénivelé positif réalisé en ambiance tempérée (23°C) et en ambiance chaude (32°C).

Les principaux résultats montrent :

- Fréquence cardiaque & VFC :

La FC de repos était plus élevée en ambiance chaude, traduisant une sollicitation du système cardiovasculaire même avant effort.

La fréquence cardiaque à l'effort restait proche des valeurs maximales dans les deux conditions et avait même tendance à être plus basse en ambiance chaude sur certains athlètes, probablement impactée par le RPE. Les athlètes ayant de moins bonnes sensations causées par la chaleur, ne sont pas arrivés ou n'ont peut-être pas voulu se donner autant qu'en ambiance tempérée.

Toutefois, le temps nécessaire pour atteindre ces valeurs a probablement été plus court en ambiance chaude, traduisant une plus grande sollicitation initiale du système cardiovasculaire. Les données de FC post effort, mesurées à 0 min, 5 min, 15 min montrent une meilleure récupération en ambiance tempérée, qui semble nettement ralentie en ambiance chaude.

La variabilité de la fréquence cardiaque (VFC) mesurée jusqu'à 72 h après effort, montrait une altération plus marquée et prolongée en ambiance chaude, signe d'un stress parasympathique probablement plus important. Certains sujets avaient une VFC inférieure aux valeurs basales à J+3, suggérant une persistance du stress physiologique causée par la chaleur.

Alors qu'en ambiance tempérée, la VFC retrouvait rapidement ses valeurs de base.

Globalement, ces résultats suggèrent que la récupération du SNA est ralentie en condition chaude, ce qui se traduit par un déséquilibre prolongé.

- Température corporelle

La température corporelle augmentait après l'effort, avec des valeurs plus élevées en ambiance chaude, confirmant que l'effort provoque une augmentation de la température corporelle, mais que cette élévation est amplifiée en condition chaude. Ceci pourrait être expliqué par une dissipation thermique plus difficile et un stress thermique plus important.

Il aurait été intéressant d'observer la température interne, afin d'avoir des valeurs plus fiables, mais je ne disposais pas du matériel nécessaire.

- Pertes hydriques

Les pertes hydriques étaient plus importantes en ambiance chaude malgré une consommation d'eau plus importante, suggérant un déficit hydrique non totalement compensé.

Ces résultats montrent l'influence directe de la contrainte thermique sur l'hydratation, avec une variabilité interindividuelle dépendant du niveau de transpiration ainsi que de la stratégie d'hydratation adaptée par chaque coureur.

- Dépenses énergétiques

En ambiance chaude, il y a eu une dépense énergétique légèrement plus élevée, probablement causée par le coût supplémentaire lié à la thermorégulation c'est-à-dire par l'élévation du système cardiovasculaire, la régulation thermique de l'organisme, la déshydratation, la perception de l'effort etc.

- Performances externes (vitesse, puissance, cadence)

La puissance semble réduite en ambiance chaude, de même que la vitesse. La cadence était légèrement plus élevée en chaleur, probablement en raison d'une alternance plus fréquente entre course et marche notamment chez les femmes.

La chaleur semble donc bien impacter la charge externe et donc baisser la performance.

- Tests de fatigue neuromusculaire

Le test CMJ effectué retrouvait des hauteurs des sauts diminuées en ambiance chaude, de même que le test Y-Balance qui mettait en évidence des distances atteintes plus courtes. Ceci suggère une fatigue musculaire plus importante en ambiance chaude.

Ces résultats suggèrent que la contrainte thermique accentue la fatigue neuromusculaire et altère la proprioception et le contrôle postural. Ceci pourrait s'expliquer par une élévation plus importante de la température corporelle et de la perte hydrique observées dans ces conditions. L'ensemble des résultats semblent confirmer une dégradation plus marquée du contrôle neuromusculaire avec la chaleur, ce qui pourrait accroître le risque de déséquilibre et de blessure en fin d'effort.

- Fatigue mentale

Le test cognitif Stroop a mis en évidence une altération des performances cognitives après effort, plus marquée après un effort en ambiance chaude. Ceci suggère une fatigue mentale accrue en ambiance chaude.

- Perception de l'effort

Enfin, le ressenti subjectif (RPE) était systématiquement plus élevé en chaleur, suggérant une difficulté plus importante de l'effort réalisé en chaleur. Toutefois, cet indicateur est subjectif et dépend des athlètes, de leur entraînement, de leur capacité à supporter la chaleur et de leur acclimatation.

Dans l'ensemble, ces résultats semblent donc confirmer que l'exposition à la chaleur affecte négativement la performance, la récupération et la perception de l'effort.

Comparaison avec la littérature

Les résultats obtenus sont cohérents avec de nombreuses études antérieures.

Il est bien établi que la chaleur entraîne une élévation de la fréquence cardiaque au repos et à l'exercice. Ce processus est lié à la vasodilatation cutanée et à la redistribution du débit sanguin vers la peau (González-Alonso et coll., 2008). Nos résultats confirment cette augmentation de la fréquence cardiaque avant l'effort en ambiance chaude, avec une récupération après l'effort plus lente.

Concernant la VFC, Stanley et coll., (2013) ont montré une diminution du tonus parasympathique après un effort réalisé en ambiance chaude, traduisant une récupération retardée, comme retrouvé dans mon étude.

La hausse de la température corporelle notamment en condition chaude, se rapproche de la température d'hyperthermie (40°C). En ambiance tempérée, la hausse était plus modérée, mais néanmoins significative car l'organisme produit de la chaleur lors d'un effort.

Sur le plan hydrique, Sordello (2018) démontrait que la perte de masse corporelle des athlètes en ambiance chaude était liée à l'augmentation de la sudation afin de répondre au mieux à la thermorégulation. Dans mon étude, en ambiance tempérée, plusieurs coureurs avaient choisi de

ne pas s'hydrater, ce qui illustre la variabilité interindividuelle des stratégies d'hydratation. Cependant les pertes hydriques en ambiance tempérée restaient globalement inférieures aux pertes hydriques en ambiance chaude.

D'après Riché (1998), Costill et coll., (2009), lorsque le poids corporel chute de 2 % à cause d'une déshydratation il y aurait plus de 20 % de pertes de performances physique mais aussi cognitives. (Nouailletas et Loizeau, 2019)

Les pertes hydriques de nos sujets n'ont pas dépassé les 1,26 % du poids corporel mais nous avons tout de même observé une certaine baisse de performance.

En ce qui concerne les résultats de performance (réduction de la vitesse moyenne et de la puissance en chaleur), ils sont en accord avec l'étude de Nybo (2010).

La baisse de performance confirme l'effet limitant de la chaleur sur la performance d'endurance (Peiffer et Abbiss., 2011).

Par ailleurs, l'augmentation légère de la dépense énergétique que nous avons pu observer peut s'expliquer par le coût supplémentaire de la thermorégulation (Nybo et coll. 2014).

Les résultats des tests de la fatigue musculaire (le test CMJ et le test Y-Balance) effectués dans mon étude confirment également les observations de Gaoua (2010). La chaleur amplifie la fatigue musculaire et réduit les performances cognitives. L'association d'une fatigue mentale et physique pourrait ainsi expliquer en partie une baisse de performance.

Enfin, la perception d'effort est plus élevée en ambiance chaude. Comme nous avons vu plus haut, elle est notamment influencée par des facteurs neurologiques car l'exposition à la chaleur provoque une élévation de la température corporelle, perçue par des thermorécepteurs.

Elle est aussi influencée par des facteurs psychologiques tels que la motivation et le ressenti de la chaleur propre à chacun (Robin et coll., 2023).

Une déshydratation peut par ailleurs mener à une sensation de mal être ressenti et augmenterait notamment le risque de blessure (Chauzi, 2018).

Ainsi, les résultats de mon étude semblent confirmer les résultats retrouvés dans de nombreuses études antérieures, tout en les appliquant dans le contexte spécifique du trail amateur.

Limites de l'étude et perspectives

Plusieurs limites doivent être soulignées dans mon étude.

Tout d'abord, la taille réduite de l'échantillon ($n = 10$, cinq hommes et cinq femmes) limite la portée statistique des résultats. Un échantillon plus large aurait permis d'affiner les analyses, notamment selon le sexe, le niveau d'entraînement mais aussi avec des athlètes de différents âges.

Deuxièmement, les mesures de la température corporelle étaient externes, prise au front avec un thermomètre infrarouge. L'absence de thermométrie interne (rectale ou auriculaire) constitue une limite, car la température cutanée ne reflète qu'imparfaitement la charge thermique interne.

Troisièmement, l'hydratation a été estimée par la pesée des flasques et du poids corporel. Pratique sur le terrain, cette méthode reste approximative et ne permet pas d'évaluer précisément les pertes sudorales mais aussi électrolytiques. De plus, les stratégies d'hydratation n'étaient pas imposées et laissées à la libre appréciation des coureurs. Cette variabilité interindividuelle a pu impacter négativement mes mesures de pertes hydriques.

Quatrièmement, la mesure de la vitesse, de la puissance et de la cadence à l'aide d'une montre GPS n'est pas la plus fiable, un capteur placé sur la chaussure aurait permis d'obtenir des données plus précises notamment concernant la cadence et la puissance.

De plus, la variabilité interindividuelle des athlètes notamment liée à l'expérience, la stratégie de course, l'acclimatation à la chaleur etc... peut expliquer une partie des écarts observés.

Enfin, les tests cognitifs et neuromusculaires, ont été réalisés avec du matériel de terrain (scotch pour le Y-Balance, application mobile pour la VFC, etc.), ce qui peut induire des erreurs de mesures. De plus le test Stroop ne couvre pas l'ensemble des dimensions de la fatigue mentale.

Malgré ces limites, cette étude met en évidence l'impact significatif de la chaleur sur la charge interne et la charge externe (la performance) chez des coureurs en trail.

Ces données apportent des éléments aidant à comprendre l'effet de la chaleur lors d'un effort en climat chaud.

Conclusion de la discussion

Pour finir, la chaleur apparaît comme un facteur limitant important de la performance en trail, agissant sur des facteurs physiologiques (fonction cardiovasculaire, thermorégulation) mais aussi sur des facteurs neurophysiologiques (fatigue musculaire, cognitive ainsi que sur la perception d'effort). Ces facteurs combinés pourraient expliquer la diminution de la vitesse et de la puissance observée en ambiance chaude, et donc expliquer la baisse de performance.

Ces résultats vont dans le même sens que les observations de la littérature tout en les contextualisant dans une approche de terrain, proche des conditions réelles de compétition. Cela peut confirmer l'importance d'adopter des stratégies spécifiques en compétition pour limiter l'impact de la chaleur sur notre organisme.

Conclusion

L'objectif était d'analyser l'impact de la chaleur sur la performance et la fatigue en trail running, en comparant deux environnements thermiques contrastés. L'expérimentation menée auprès de dix coureurs amateurs a permis de mettre en évidence plusieurs résultats majeurs.

Premièrement, la chaleur a induit une élévation de la fréquence cardiaque au repos, un maintien d'une fréquence cardiaque élevée durant l'effort et une récupération plus lente après l'exercice. Ces observations sont cohérentes avec les mécanismes de redistribution du débit sanguin vers la peau et la vasodilatation cutanée, qui sollicitent davantage le système cardiovasculaire.

Deuxièmement, la variabilité de la fréquence cardiaque a confirmé une récupération parasympathique retardée dans les jours suivant l'effort en ambiance chaude. Ce résultat traduit un déséquilibre du système nerveux autonome, associé à une charge physiologique accrue.

Troisièmement, la chaleur a renforcé la contrainte thermorégulatrice, comme l'attestent l'augmentation de la température corporelle et des pertes hydriques. Ces éléments s'accompagnent d'une déshydratation plus importante, susceptible d'accentuer la fatigue et de limiter la tolérance à l'effort.

Sur le plan de la performance, les résultats montrent une diminution de la vitesse moyenne et de la puissance en condition chaude, confirmant l'effet délétère de l'hyperthermie sur l'endurance. Parallèlement, la dépense énergétique tend à s'élever, traduisant un coût supplémentaire lié à la régulation thermique.

Les tests de fatigue musculaire (CMJ et Y-Balance) révèlent une altération plus marquée en condition chaude, suggérant une interaction entre la contrainte thermique et la capacité de production de force. La fatigue cognitive, mesurée par le Stroop test, ainsi que la perception de l'effort, se trouvent elles aussi amplifiées. Cela confirme que la chaleur n'agit pas uniquement sur le plan physiologique, mais également sur les dimensions psychologiques et perceptives de la fatigue.

Ces résultats, globalement cohérents avec la littérature scientifique, montrent que l'exposition à la chaleur réduit la performance en trail running et accentue la fatigue via des mécanismes plurifactoriels. Les limites de cette étude résident dans la taille restreinte de l'échantillon, la variabilité interindividuelle des réponses à la chaleur et l'absence de mesures physiologiques plus poussées (par exemple VO_{2max} ou lactate sanguin). Néanmoins, les observations apportent un éclairage pertinent sur les contraintes spécifiques liées à l'effort en ambiance chaude, et posent les bases de futures recherches visant à explorer les stratégies d'adaptation et de récupération.

En conclusion, ce travail démontre que la chaleur constitue un facteur limitant important de la performance en trail running, en perturbant l'équilibre physiologique et psychologique des athlètes.

Bibliographie

Ament, W., Verkerke, G.J. (2009). Exercice et fatigue. Médecin sportif.

Aschoff, J., Wever, R. (1958). Kern und schale im waermehaushalt des menschen. Naturwissenschaften, 45(20), 477-485.

Aubry, C., Siano, B. (Juin 2020). Travailler dans des ambiances thermiques chaudes ou froides : Quelle prévention ?. Hygiène et sécurité du travail – n°259.

Brocherie, F., Racinais, S., Pascal, M., Verrier, A., Moutet, L., Lagarrigue, R., Toussaint J.F. (2023). Chaleur et performance sportive : quels moyens pour limiter les risques encourus ?

Candas, V., Libert, J. P., Vogt, J. J. (1980). Effect of hidromeiosis on sweat drippage during acclimation to humid heat. Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol., 44(2), 123-133.

Casa, D.J., Stearns, R.L., Lopez, R.M., Ganio, M.S., McDermott, B.P., Yeargin, S.W., Yamamoto, L.M., Mazerolle, S.M., Roti, M.W., Armstrong, L.E., Maresh, C.M. (2010) Influence of hydration on physiological function and performance during trail running in the heat. J Athl Train. 45(2):147-56

Chauzi, B (2018) Déshydratation et performance sportive : Comment éviter d’avoir soif ? <https://entrainement-sportif.fr/eviter-deshydratation.htm>

Costill, L. D., Wilmore, J. H., Kenney, W. L. (2009). Physiologie du sport et de l'exercice. (4e éd.) Bruxelles: De Boeck.

Cramer, M.N., Jay, O. (2016) Biophysical aspects of human thermoregulation during heat stress. Auton Neurosci.

El Helou, N., Tafflet, M., Berthelot, G., Tolaini, J., Marc, A., Guillaume, M., Hausswirth, C., Toussaint, J.-F. (2012). Impact of environmental parameters on marathon running performance.

Ely, B.R., Cheuvront, S.N., Kenefick, R.W., Sawka, M.N. (2010). Aerobic performance is degraded, despite modest hyperthermia, in hot environments. *Med Sci Sports Exerc.* 42(1):135-41.

Ely, M.R., Cheuvront, S.N., Montain, S.J. (2007)a. Neither Cloud Cover nor Low Solar Loads Are Associated with Fast Marathon Performance : *Med. Sci. Sports Exerc.* 39, 2029–2035.

Ely, M.R., Cheuvront, S.N., Roberts, W.O., Montain, S.J. (2007)b. Impact of Weather on Marathon- Running Performance: *Med. Sci. Sports Exerc.* 39, 487–493.

Febbraio, M.A., Carey, M.F., Snow, R.J., Stathis, C.G., Hargreaves, M. (1996) Influence of elevated muscle temperature on metabolism during intense, dynamic exercise, *Am J Physiol*, 271, 5 (Pt2) : 1251-5

Fernández-Elías, V.E., Hamouti, N., Ortega, J.F., Mora-Rodríguez, R. (2015). Hyperthermia, but not muscle water deficit, increases glycogen use during intense exercise.

Foster, C. (1999). Le syndrome du surentrainement. *Insider* ; 7(1).

Gaoua, N. (2010). Cognitive function in hot environments : a question of methodology. *Scan J Med Sci Sport*.

Gergelé, L., Bohe, J., Feasson, L., Robach, P., Morel, J., Auboyer, C., Boisson, R.C., Desebbe, O., Millet, G.Y. (2010). Du Sport extrême à la reanimation https://www.srlf.org/wp-content/uploads/2015/11/1009-Reanimation-Vol19-N5-p416_422.pdf

González-Alonso, J., Crandall, C.G., Johnson, J.M. (2008) The cardiovascular challenge of exercising in the heat. *J Physiol.* 1;586(1):45-53.

Guy, J.H., Deakin, G.B., Edwards, A.M., Miller, C.M., Pyne, D.B. (2014). Adaptation to hot environmental conditions : an exploration of the performance basis, procedures and future directions to optimise opportunities for elite athletes. *Sports Medicine*.

Hancock, P.A. (1986) Sustained attention under thermal stress. *Psychological Bulletin*, 99(2),263-281.

Hancock, P.A., Vasmatazidis, I. (2003) Effects of heat stress on cognitive performance : the current state of knowledge. *Int J Hyperthermia*. 19(3):355-72.

Hibon, J. (2021). Les Pathologies métaboliques liées à l'ultra endurance : Physiopathologie, Prévention et Conduite à tenir. *Revue de Littérature. Mémoire Diplôme Universitaire Trail Running*. Université Grenoble Alpes.

Jentjens, R.L., Wagenmakers, A.J., Jeukendrup, A.E. (2002). Heat stress increases muscle glycogen use but reduces the oxidation of ingested carbohydrates during exercise. *J Appl Physiol* ; 92 : 1562-1572.

Kellogg, D.L., Johnson, J.M., Kosiba, W.A. (1990). Baroreflex control of the cutaneous active vasodilator system in humans. *Circ. Res.* 66, 1420–1426.

Kenney, W.L., Stanhewicz, A.E., Bruning, R.S., Alexander, L.M. (2014). Blood pressure regulation III: what happens when one system must serve two masters: temperature and pressure regulation? *Eur. J. Appl. Physiol.* 114, 467–479.

Knechtle, B., Di Gangi, S., Rüst, C.A., Villiger, E., Rosemann, T., Nikolaidis, P.T. (2019). The role of weather conditions on running performance in the Boston Marathon from 1972 to 2018.

Korzeniewski, B. (2019). La fatigue musculaire induite par Pi conduit à une puissance quasi hyperbolique - dépendance à la durée. *Eur. J. Appl. Physiol.*

Koulmann, N., Banzet, S., Bigard, A.X. (2003). L'activité physique et la chaleur : de la physiologie à la recommandation d'apport hydrique. *Med Trop* ; 63 : 617-626

Laurent, C., Laurent, L., Kaux, J. F. (2018). Les crampes musculaires associées aux exercices (CMAE) : revue de littérature.

McGreal, K., Budhiraja, P., Jain, N., and Yu, A. S. (2016). Current challenges in the evaluation and management of hyponatremia. *Kidney Dis (Basel)* 2, 56–63. doi: 10.1159/000446267

Millet, G. (2022). *ULTRA-TRAIL ; Nouvelle édition – Plaisir, performance, santé*. Outdoor éditions.

Munce, T. A., Kenney, W. L. (2003). Age-specific modification of local cutaneous vasodilation by capsaicin-sensitive primary afferents. *J. Appl. Physiol.*, 95(3), 1016-1024.

Nadel, E. R., Bullard, R. W., Stolwijk, J. A. (1971). Importance of skin temperature in the regulation of sweating. *J. Appl. Physiol.*, 31(1), 80-87.

Nouailletas, R., Loizeau, O. (2019). Hydratation et performance. Influence de l'hydratation sur la performance et la perception de l'effort après des matchs de badminton. Master MEEF. Université de Nantes.

Nybo, L., Rasmussen, P., Sawka, M.N. (2014) Performance in the Heat-physiological Factors of Importance for Hyperthermia-induced Fatigue. *Comprehensive Physiol* ;4(2):657-689

Nybo, L. (2010). Cycling in the heat : performance perspectives and cerebral challenges. *Scand J Med Sci Sports*.

Parkin, J.M., Carey, M.F., Zhao, S., Febbraio, M.A. (1999). Effect of ambient temperature on human skeletal muscle metabolism during fatiguing sub-maximal exercise. *J Appl Physiol* ; 86 : 902-908.

Pearson, J., Low, D.A., Stohr, E., Kalsi, K., Ali, L., Barker, H., Gonzalez-Alonso, J. (2011). Hemodynamic responses to heat stress in the resting and exercising human leg: insight into the effect of temperature on skeletal muscle blood flow. *AJP Regul. Integr. Comp. Physiol.* 300, R663–R673.

Peiffer, J.J., Abbiss, C.R. (2011). Influence of environmental temperature on 40 km cycling time-trial performance. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 208–220.

Piponnier, E. (2023). Partie 2 : Stress thermique, performance et entraînement. Université Côte d'Azur.

Riché, D. (1998). Guide nutritionnel des sports d'endurance. (2e éd.) Paris: Vigot.

Robin, N., Hermand, E., Hatchi, V., Hue, O. (2023). Stratégies de gestion de la chaleur et performances sportives de haut niveau : éclairage psychologique et recommandations appliquées.

Rosnet, E. (2005) Approche énergétique du cycliste de compétition en fonction de l'âge et de la spécialité. Doctorat STAPS. Université Reims Champagne-Ardenne

Roussey, G. (2018). Optimisation des stratégies d'acclimatation à la chaleur. Thèse de doctorat. Université Cote d'Azur.

Sawka, M., Noakes, T.D. (2007) Does dehydration impair exercise performance ?. Med Sci Sports Exerc. 39(8):1209-17

Sordello, J. (2015). La bible du running. Amphora.

Stanley, J., Peake, M. J., Buchheit M. (2013). Cardiac parasympathetic reactivation following exercise : implications for training prescription. Sports Med. 43;(12):1259-77.

Tornero-Aguilera, J. F., Jimenez-Morcillo, J., Rubio-Zarapuz, A., Clemente-Suarez, V. J. (2022). Central and Peripheral Fatigue in Physical Exercise Explained : A Narrative Review.

Trapasso, Cooper. (1989). Record performances at the Boston Marathon : biometeorological factors. Int J Biometeorol.

Vihma, T. (2010). Effects of weather on the performance of marathon runners. Int. J. Biometeorol. 54.

Webographie

Coros : <https://fr.coros.com/stories/coros-coaches/c/training-and-racing-in-the-heat#:~:text=Lorsque%20les%20temp%C3%A9ratures%20d%C3%A9passent%2020,perception%20de%20>

H4H : <https://www.hydrationforhealth.com/fr/sciences-de-lhydratation/laboratoire-dhydratation/hydratation-humeur-et-fonctions-cognitives/>

<http://cs.pontdecheruy.free.fr/sport/pe.htm>

Annexes

Annexe 1 : Graphique de l'impact de la température sur les performances de l'étude de Guy et al. (2014)

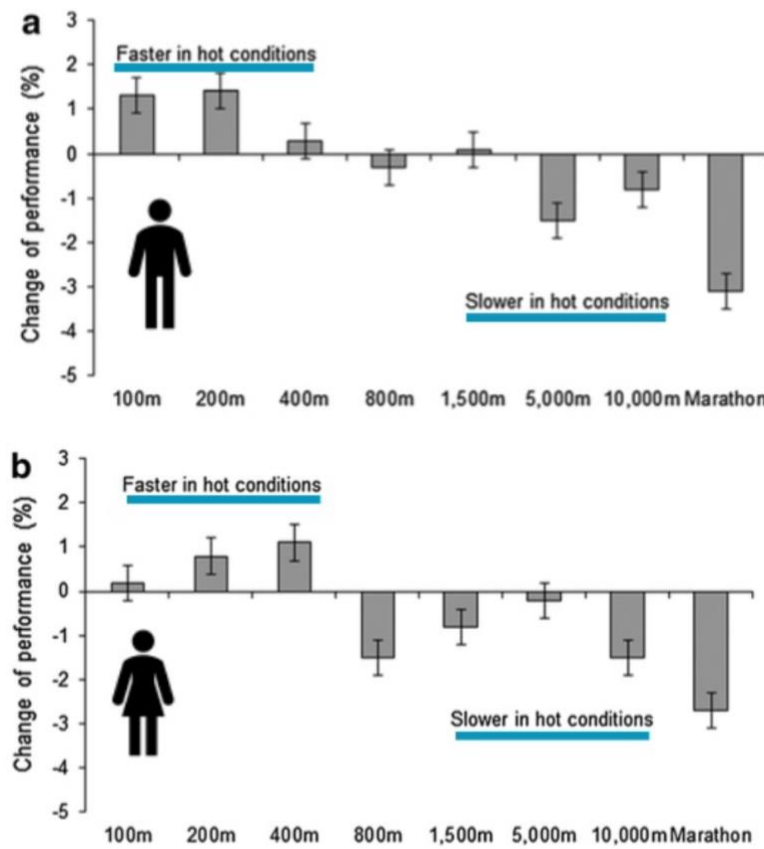


Figure 5 : Graphique de montrant l'impact de la température sur les performances sur des distances allant de 100m au marathon pour les hommes (a) et les femmes (b). Guy et al. (2014)

Annexe 2 : Tableau des indices de chaleur avec les suggestions d'ajustement d'allures (COROS)

Heat Index	Condition	Suggested Adjustment
<24°C (75°F)	stress thermique très faible	aucun ajustement n'est nécessaire pour les athlètes en bonne santé
24–28°C (75–82°F)	stress thermique faible	Ralentis l'allure de 1 à 2 % en compétition ou lors d'une sortie longue. Envisage de déplacer les séances intenses à des moments de la journée plus frais.
28–32°C (83–90°F)	stress thermique moyen	Ralentis l'allure de 3 à 5% ou réduis tes répétitions. Hydrate-toi davantage tout au long de la journée.
33–37°C (91–99°F)	stress thermique élevé	Aygnmentation du risque de maladie due à la chaleur. Ralentis l'allure de 5 à 8%, réduis ton volume de course, consulte ta fréquence cardiaque.
38–40°C (100–104°F)	stress thermique très élevé	Pratique de la course limitée et contrôlée. Rafraichis-toi au maximum. Interdis-toi les courses longues ou à haute intensité.
>40°C (>104°F)	stress thermique extrême	L'entraînement n'est pas recommandé à l'extérieur sans environnement contrôlé et surveillance avancée.

Figure 6 : Tableau des indices de chaleur avec les suggestions d'ajustement d'allures à disposition sur le site internet COROS

Annexe 3 : L'équilibre des échanges thermiques (Aubry C., Siano B, 2020)

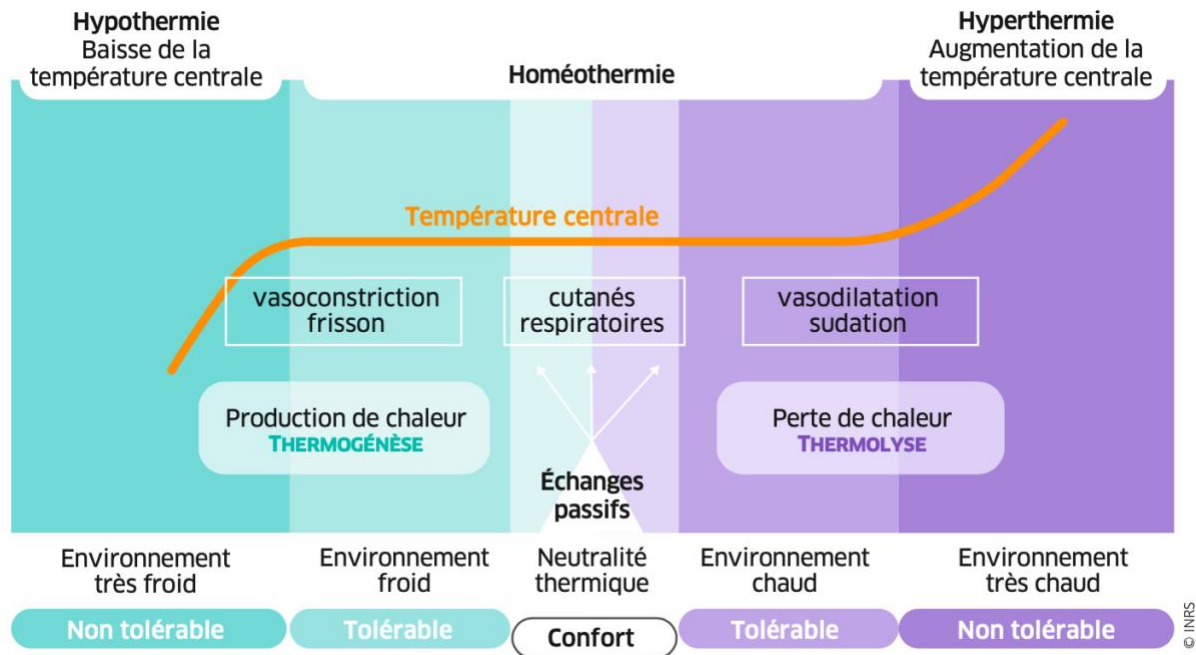
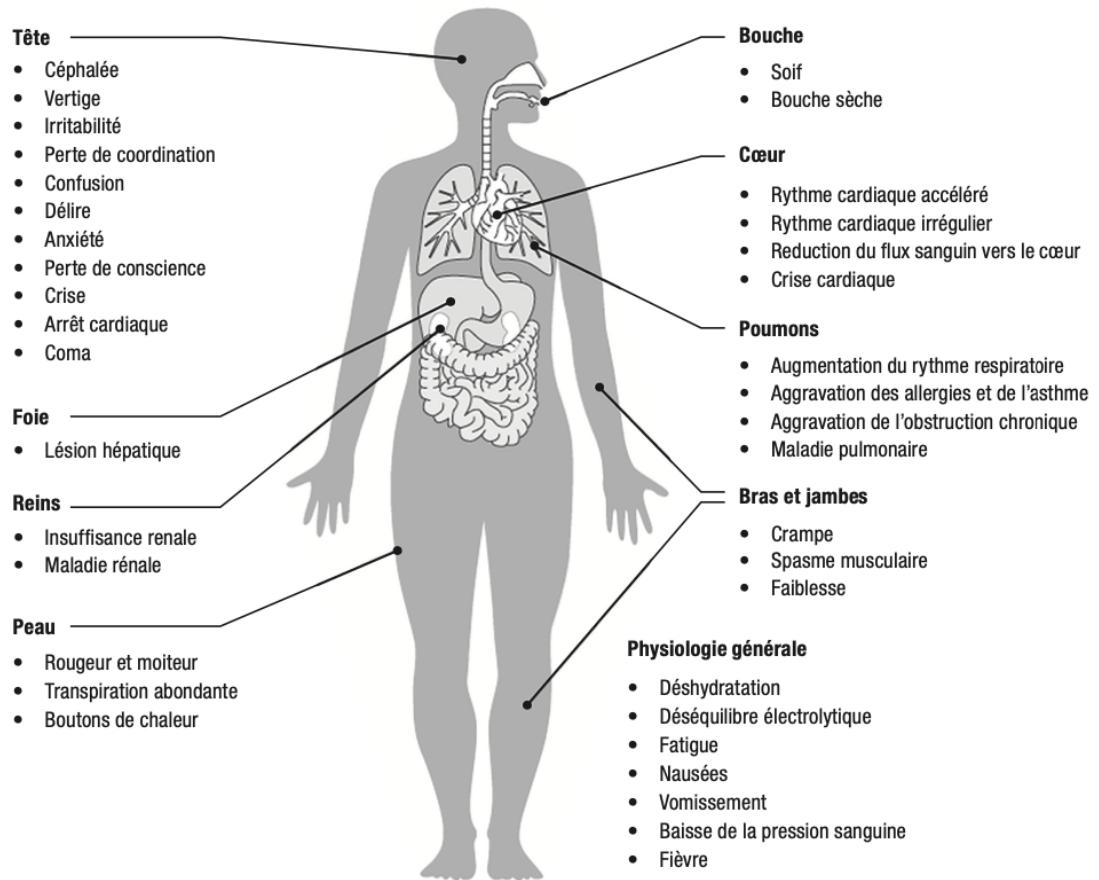


Figure 7 : L'équilibre des échanges thermiques (Aubry C., Siano B, 2020)

Annexe 4 : Schéma des effets de la chaleur sur l'organisme (Brocherie et al. 2023)

Les effets de la chaleur sur l'organisme



Source : Dahl et coll. [15]

Figure 8 : Schéma des effets de la chaleur sur l'organisme (Brocherie et al. 2023)

Annexe 5 : Schéma des effets de la déshydratation sur les fonctions cognitives et de l'humeur (H4H)

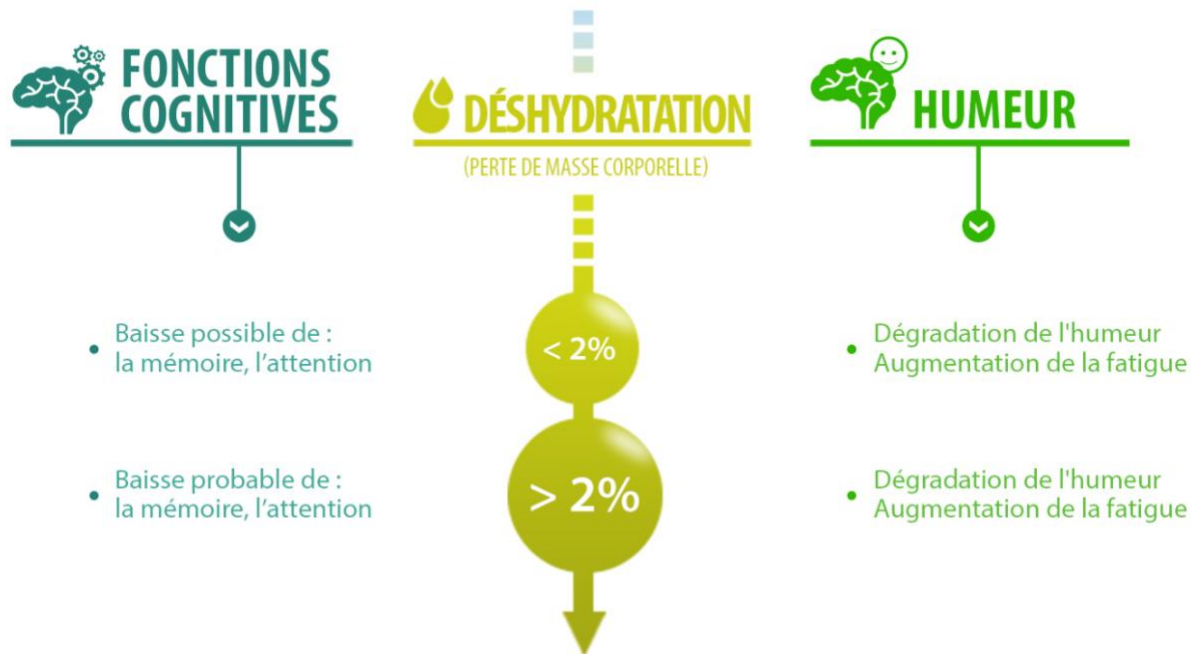


Figure 9 : Schéma des effets de la déshydratation sur les fonctions cognitives et de l'humeur (H4H)

Annexe 6 : Suivi de la VFC d'un athlète sur l'application Élite HRV

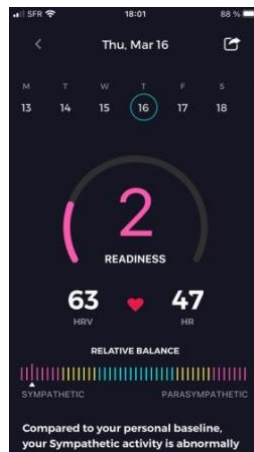


Figure 10 : Capture d'écran de l'application HRV – SNS qui domine.

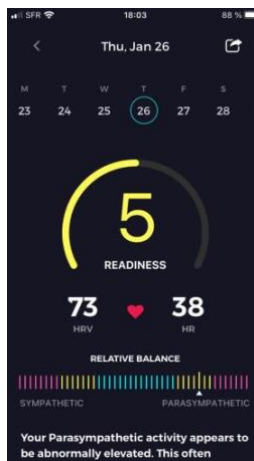


Figure 11 : Capture d'écran de l'application HRV – SNP qui domine.

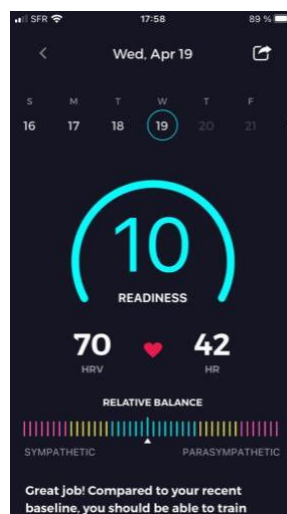


Figure 12 : Capture d'écran de l'application HRV – SNS et SNP en équilibre.

Annexe 7 : Organigramme du mécanisme de la genèse des crampes selon la théorie du contrôle neuromusculaire altéré. (Laurent et al. 2018)

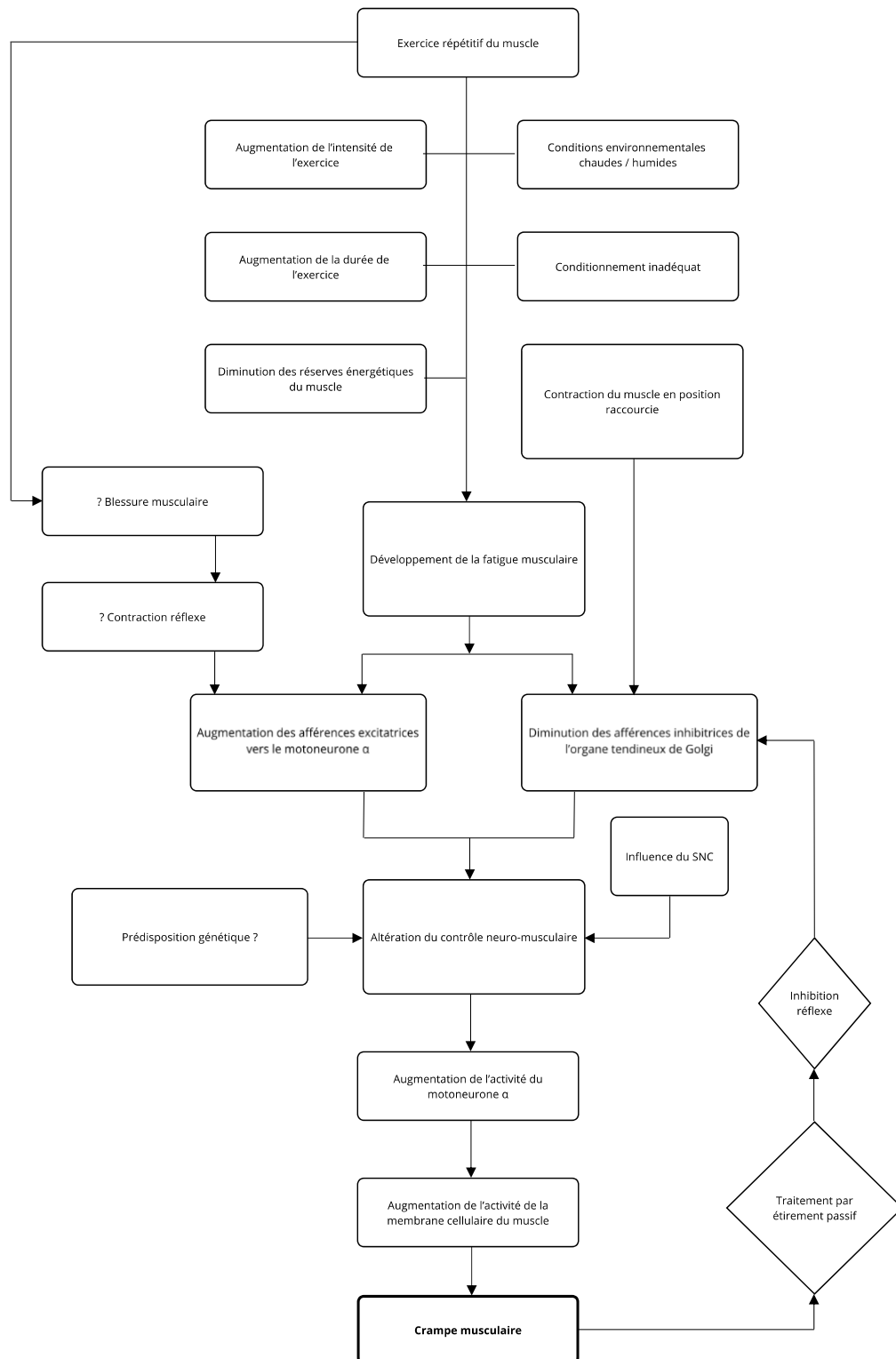


Figure 13 : Organigramme du mécanisme de la genèse des crampes selon la théorie du contrôle neuromusculaire altéré. (Laurent et al. 2018)