

Année universitaire 2024-2025

Master 2^{ème} année

Master STAPS mention : *Entraînement et Optimisation de la Performance Sportive*

Parcours : *Préparation du sportif : aspects physiques, nutritionnels et mentaux*

MEMOIRE

TITRE : L'entraînement de sprint en hypoventilation à volume pulmonaire bas permet-il l'amélioration de la capacité de répétitions d'efforts maximaux au basketball ?

Par : Averlant Matthieu

Sous la direction de : Vauthier Christophe

Soutenu au Département des Sciences du Sport
et de l'Éducation Physique le : 26/06/2025

« Le département des Sciences du Sport et de l'Education Physique de l'UFR3S n'entend donner aucune approbation aux opinions émises dans les mémoires; celles-ci sont propres à leurs auteurs. »

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire dans le cadre de mon stage d'encadrement avec l'équipe U11A du Lille Métropole Basket Club ainsi qu'avec les équipes U18 et N3 en tant que préparateur physique.

En premier lieu, je remercie chaleureusement M. Vauthier, professeur à l'Université de Lille et directeur de ce mémoire, pour son accompagnement précieux tout au long de mon travail. Ses conseils avisés et sa capacité à m'orienter vers des solutions efficaces ont été essentiels à l'avancement de ce projet.

Je tiens également à remercier Mme Emma Chapuis, directrice sportive du Lille Métropole Basket Club et tutrice de mon stage en alternance. Son soutien dans la définition d'un projet en adéquation avec le Master Entraînement et Optimisation de la Performance Sportive, ainsi que ses conseils pour la réalisation de ce mémoire, ont été déterminants.

En tant que préparateur physique des équipes U18 et N3, je remercie M. Tony Dorangeville et M. Rémi Delannoy pour la confiance qu'ils m'ont accordée dans la gestion de la préparation physique des athlètes. Leur collaboration a grandement enrichi cette expérience professionnelle.

Enfin, je souhaite exprimer ma reconnaissance envers toute l'équipe pédagogique de la filière Entraînement Sportif de la Faculté des Sciences et du Sport et de l'Éducation Physique (FSSEP) de l'Université de Lille. Leur engagement dans ma formation a été une source d'apprentissage et d'inspiration tout au long de mon parcours.

Sommaire

Remerciements	1
Sommaire	1
Glossaire	5
1. Introduction	6
2. Revue de littérature	7
2.1. Spécificité du basketball et des répétitions de sprints	7
2.2. Méthodes de développement de la capacité de répétitions de sprints	11
3. Problématique, Objectifs et Hypothèses	18
3.1. Problématique	18
3.2. Objectifs	19
3.3. Hypothèse	19
4. Matériels et méthodes	19
4.1. La structure d'accueil	19
4.2. Les sujets	20
4.3. Matériels et techniques de mesures	21
4.4. Le protocole expérimental	22
5. Statistiques	24
6. Résultats	25
6.1. Nombre de sprints	25
6.2. Meilleur temps	25
6.3. Temps total	26
6.4. Indice de fatigue	27
7. Discussion	27
7.1. Interprétation	27
7.2. Limites	28
7.3. Application terrain	29
7.4. Perspectives	30
8. Conclusion	30
9. Bibliographie	32
10. Annexes	36
Résumé	38
Abstract	39
Compétences acquises	40

Glossaire

RSA : Repeated Sprint Ability (Capacité à Répéter des Sprints)

FIET : Futsal Intermittent Endurance Test (Test d'Endurance Intermittent de Futsal)

HV : Hypoventilation Volontaire

SpO₂ : Saturation en O₂

HVB : Hypoventilation à faible Volume Pulmonaire

PO₂ : Pression d'Oxygène

Fc : Fréquence Cardiaque

VES : Volume d'Éjection Systolique

1. Introduction

Dans le cadre de ma deuxième année de Master en Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives (STAPS), mention « Entraînement et Optimisation de la Performance Sportive », j'ai entrepris la réalisation d'un mémoire portant sur une méthode innovante de développement de la capacité à répéter des efforts à intensité maximale, connue sous le nom d'hypoventilation appliquée au sprint.

En tant que préparateur physique d'une équipe évoluant en Nationale 3, mon rôle consiste à harmoniser la préparation physique des joueurs avec la stratégie et la vision tactique de l'entraîneur. La philosophie de jeu adoptée, reposant largement sur la capacité à répéter des efforts à haute intensité, est adaptée à la jeunesse de notre effectif. Cette orientation m'a conduit à cibler l'amélioration de ces qualités spécifiques.

Afin de répondre à cette problématique, j'ai exploré diverses méthodes permettant de développer efficacement cette aptitude. Parmi celles-ci, l'hypoventilation a émergé comme une approche prometteuse, bénéficiant d'un intérêt croissant dans le domaine de la performance sportive.

Dans ce mémoire, nous nous concentrerons sur l'utilisation de l'hypoventilation volontaire. Selon Woorons (2014), l'hypoventilation volontaire désigne la diminution intentionnelle de la fréquence respiratoire, entraînant une réduction de la ventilation, c'est-à-dire du volume d'air inspiré et expiré par minute. Cette technique se pratique à bas volume pulmonaire et implique des expirations associées à des blocages respiratoires de courte durée pendant l'effort. Cette méthode est l'une des méthodes permettant d'obtenir simultanément un effet hypoxique (diminution des concentrations en O_2) et hypercapnique (augmentation des concentrations en CO_2), deux conditions essentielles à son efficacité.

Sur la base de ces éléments, nous établirons un protocole visant à développer les capacités de répétition d'efforts à haute intensité à l'aide de la méthode d'hypoventilation volontaire.

Enfin, le mémoire abordera les problématiques soulevées, les objectifs définis ainsi que les hypothèses formulées dans le cadre de cette étude.

2. Revue de littérature

2.1. Spécificité du basketball et des répétitions de sprints

2.1.1. Définition

Selon Bishop et al. (2012), la capacité à répéter des sprints (Repeated Sprint Ability, RSA) est définie comme la capacité à maintenir une performance optimale au cours d'une série de sprints courts, entrecoupés de courtes périodes de récupération. Cette capacité est particulièrement cruciale pour les athlètes évoluant dans des sports collectifs, tels que le basketball, où des efforts intenses et répétés sont nécessaires tout au long du match.

La performance dans la RSA dépend de divers facteurs, aussi bien métaboliques que neuronaux. Sur le plan métabolique, la récupération entre les sprints repose sur plusieurs processus, tels que la capacité oxydative, la régénération de la phosphocréatine et le tamponnage des ions H⁺. Ces mécanismes métaboliques sont essentiels pour limiter la fatigue et maintenir une performance élevée au cours des efforts répétés (Girard et al., 2006). D'un point de vue neuronal, l'activation musculaire et les stratégies de recrutement des fibres musculaires jouent un rôle déterminant dans la RSA, en influençant la capacité à maintenir la vitesse et la puissance sur plusieurs sprints successifs (Girard et al., 2006).

Dans le contexte du basketball, la RSA constitue un facteur clé de performance, en raison des exigences physiques spécifiques du sport. Les joueurs doivent réaliser des accélérations fréquentes, des changements de direction rapides et des sprints courts, souvent suivis de périodes de récupération brèves. Ces efforts répétitifs, qu'ils soient offensifs ou défensifs, exigent une gestion optimale de l'énergie et de la récupération pour maintenir un niveau d'intensité élevé.

Les joueurs de haut niveau réalisent en moyenne $4,4 \pm 1,7$ séquences de sprints répétés (Repeated Sprint Events, RSE) par match, chaque séquence comprenant plusieurs sprints courts, principalement linéaires, sur des distances allant de 1 à 5 mètres (Capranica et al., 2015).

L'intensité et la fréquence de ces sprints sont généralement plus élevées en début de match, puis diminuent progressivement au cours de la rencontre, en particulier chez les joueurs occupant des positions intérieures (Clarke et al., 2012).

La RSA est particulièrement pertinente pour le basketball, car elle reflète la capacité des joueurs à conserver leur vitesse et leur puissance pendant les efforts répétés, essentiels dans des actions comme les contre-attaques, les retours défensifs rapides, les drives vers le panier ou les sauts pour capter des rebonds. Ainsi, un joueur capable de maintenir une performance optimale sur plusieurs sprints successifs pourra conserver un niveau élevé d'intensité tout au long du match, ce qui est crucial pour sa performance globale.

2.1.2. Tests d'évaluation des répétitions de sprints

Il existe une grande variabilité dans les protocoles de test de la capacité à répéter des sprints (RSA), notamment en ce qui concerne la distance des sprints, le nombre de répétitions et le type de récupération (active ou passive) (Kyles et al., 2023). Les tests incluant des changements de direction augmentent le temps moyen des sprints par rapport aux tests linéaires, reflétant ainsi les exigences spécifiques de certains sports (Kyles et al., 2023).

Certains protocoles spécifiques ont été développés pour répondre aux besoins particuliers de différents sports, comme le test de capacité de sprint répété intensif (IRSA) pour le basketball ou le test d'endurance intermittent de futsal (FIET) pour le futsal (Charron et al., 2020).

De manière générale, deux types de tests RSA peuvent être distingués : les tests à boucle ouverte et les tests à boucle fermée. Dans tous les cas, le premier sprint doit être réalisé à au moins 95 % de la vitesse de référence. La principale différence entre ces deux approches réside dans le critère d'arrêt du test.

Pour les tests à boucle ouverte, les participants effectuent un maximum de sprints jusqu'à atteindre un seuil d'épuisement prédéfini, souvent fixé à 85 % de la vitesse de référence. La performance est évaluée en fonction du nombre total de sprints réalisés avant épuisement, des performances individuelles des sprints ou de la moyenne des performances. À l'inverse, les tests à boucle fermée imposent un nombre fixe de sprints, et la performance est évaluée sur la base des performances individuelles, de la moyenne des sprints, d'un indice de fatigue (FI) ou d'un score de détérioration de performance (Sdec) (Girard et al., 2011; Glaister et al., 2008).

$$\mathbf{FI} = 100 \times ((\text{Smeilleure} - \text{Spire}) / \text{Smeilleure})$$

$$\mathbf{Sdec} (\%) = ((S1 + S2 + S3 + \dots + S_{\text{final}}) / (\text{Smeilleure} * \text{nbr de sprints}) - 1) * 100$$

Il convient de souligner que le score de détérioration de performance (Sdec) est considéré comme une méthode plus appropriée pour évaluer la fatigue que l'indice de fatigue, dans la mesure où il prend en compte l'ensemble des sprints réalisés, contrairement à ce dernier (Glaister et al., 2008).

Dans le cadre de cette étude, le protocole de test RSA retenu s'appuie sur celui décrit par Bishop et al. (2001). Ce protocole consiste en cinq cycles de six sprints maximaux, avec 30 secondes de récupération entre chaque cycle. Bien que ce protocole soit couramment utilisé, il peut être adapté aux exigences spécifiques du sport étudié.

Dans le contexte du basketball, où les sprints se déroulent généralement sur des distances comprises entre 5 et 20 mètres, avec une alternance rapide entre accélérations et décélérations (Taylor et al., 2017), une distance de 15 mètres sera retenue pour ce test. Cette adaptation permet de mieux refléter les caractéristiques spécifiques des efforts réalisés dans ce sport.

2.1.3. Éléments limitants de la performance en répétitions de sprints

La capacité à répéter des sprints (Repeated Sprint Ability, RSA) est influencée par divers systèmes énergétiques, principalement les systèmes phosphagène, glycolytique et oxydatif. Ces systèmes interviennent différemment en fonction de l'intensité, de la durée des sprints et des intervalles de récupération, jouant ainsi un rôle central dans la performance et la fatigue associées aux sprints répétés.

Le système phosphagène est fondamental pour la production de puissance maximale lors de sprints courts et répétés. Il est fortement corrélé à la performance de puissance, notamment au pic de puissance et à la puissance moyenne (Tortu et al., 2024). Lors des tests de sprints répétés, ce système est le principal contributeur énergétique, fournissant l'énergie nécessaire pour les efforts de très courte durée (Wadley et al., 1998).

Le système glycolytique, quant à lui, devient un contributeur énergétique significatif lorsque la distance des sprints augmente ou que le temps de récupération est réduit. Cependant, cette contribution accrue est associée à une diminution des performances, principalement en raison de l'accumulation d'acide lactique et d'autres sous-produits métaboliques (Ulupinar et al., 2021). Ce système est particulièrement sollicité dans des protocoles impliquant des sprints plus longs ou des intervalles de repos plus courts (Ulupinar et al., 2021).

Bien que le système oxydatif ne soit pas directement impliqué dans la production immédiate de puissance, il joue un rôle crucial dans la récupération entre les sprints. Une meilleure capacité aérobie améliore la récupération en facilitant l'élimination des sous-produits métaboliques et en

favorisant la reconstitution de la phosphocréatine, ce qui contribue à la réduction de la fatigue et au maintien de la performance (Gharbi et al., 2015).

La contribution relative de ces systèmes dépend de plusieurs facteurs, notamment la distance des sprints et les intervalles de récupération. Une augmentation de la distance ou une réduction des intervalles favorise une plus grande implication du système glycolytique, ce qui peut entraîner une fatigue accrue (Ulupinar et al., 2021). Par ailleurs, une capacité aérobie élevée est associée à une meilleure résistance à la fatigue lors des efforts répétés, bien qu'elle n'impacte pas directement la performance maximale des sprints (Gharbi et al., 2015).

En plus des facteurs énergétiques, la fatigue neuromusculaire joue un rôle central dans la diminution de la performance lors des exercices de sprints répétés. Cette fatigue se manifeste principalement par une réduction de la vitesse maximale ou moyenne, une baisse de la puissance de pointe et une diminution du travail total réalisé (Girard et al., 2011). Ces déclins sont souvent liés à la performance initiale du sprint et sont influencés par des limitations dans l'approvisionnement énergétique, telles que l'hydrolyse de la phosphocréatine, la glycolyse anaérobie et le métabolisme oxydatif, ainsi que par l'accumulation de sous-produits métaboliques (Girard et al., 2011).

Les mécanismes sous-jacents à la fatigue incluent une combinaison de facteurs centraux et périphériques. La fatigue centrale est caractérisée par une incapacité à activer pleinement la musculature, tandis que la fatigue périphérique résulte d'une diminution de la capacité des muscles à générer de la force (Collins et al., 2018). De plus, une activité sous-optimale des unités motrices peut réduire la capacité à produire des puissances maximales de manière répétée (Mendez-Villanueva et al., 2008).

Ainsi, la capacité à répéter des sprints résulte de l'interaction complexe entre les systèmes énergétiques et les mécanismes neuromusculaires, qui influencent à la fois la performance initiale et la résistance à la fatigue.

2.2.Méthodes de développement de de la capacité de répétions de sprints

2.2.1.Principes généraux de l'entraînement pour améliorer la RSA

Différentes méthodes d'entraînement peuvent être utilisées pour améliorer la capacité à répéter des sprints (RSA), chacune offrant des avantages spécifiques en fonction des objectifs et des paramètres ciblés. Selon Bishop et al. (2011), plusieurs paramètres clés, regroupés en deux catégories principales (*performance des sprints* et *récupération entre les sprints*), doivent être pris en compte pour optimiser l'entraînement de la RSA (Figure 1).

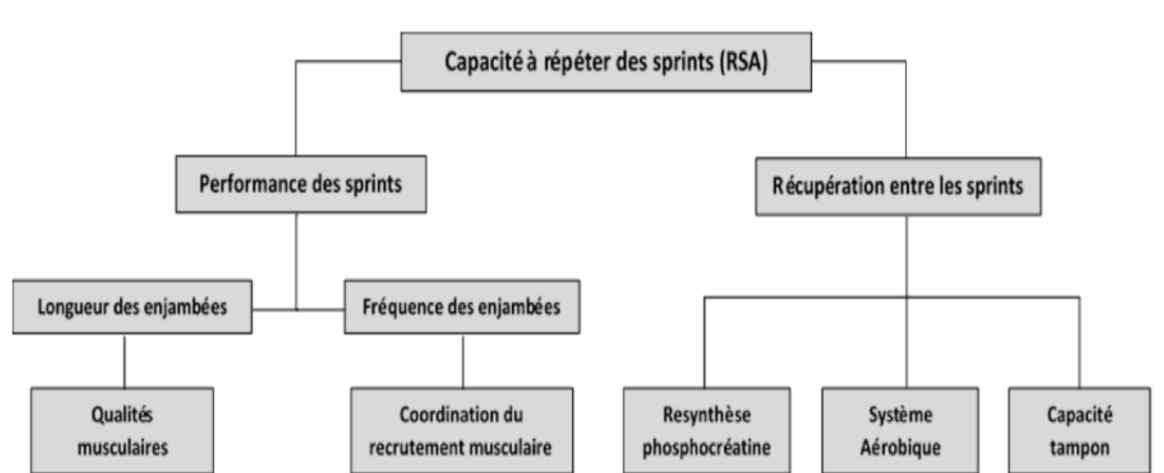


Figure 1 - Résumé des composantes de la RSA et des paramètres clés d'entraînement, inspiré de Bishop et al. (2011)

L'entraînement combiné (CT), qui associe des exercices de sprint à des exercices de plyométrie, a démontré des améliorations significatives de la RSA. Comparé à des méthodes telles que l'entraînement spécifique au sprint (SGL) ou des entraînements de routine (CON), le CT s'est révélé particulièrement efficace, notamment lorsqu'il inclut des exercices plyométriques. Ces derniers renforcent les qualités neuromusculaires et la capacité à générer de la puissance explosive, contribuant à une meilleure performance de sprint répété (Hengxian Lu et al., 2024).

Ensuite, un protocole d'entraînement basé sur des sprints répétés, comprenant 10 répétitions sur une distance d'environ 40 mètres, a permis d'observer des améliorations modérées de la vitesse maximale ainsi que de l'endurance en sprint répété chez de jeunes footballeurs d'élite. Cependant, ces progrès étaient plus significatifs lorsque l'entraînement de force n'était pas inclus, ce qui met en

évidence l'importance de la spécificité de l'entraînement pour cibler les qualités nécessaires à la RSA (Tonnessen et al., 2011).

L'entraînement axé sur la vitesse et l'agilité (S/A) a démontré des gains significatifs en termes d'accélération et de performance de sprint répété chez des joueurs de handball bien entraînés. Comparativement à l'entraînement par intervalles de sprint (SIT), le sprint/agilité (S/A) s'est avéré plus efficace, avec des tailles d'effet supérieures à 0,79 dans toutes les conditions, pour améliorer la performance lors d'efforts répétés. Cette supériorité est probablement attribuable à l'accent mis sur des mouvements spécifiques à la pratique sportive, tels que les changements de direction et les phases d'accélération (Buchheit et al., 2010).

Enfin, les études montrent que l'amélioration de la RSA est particulièrement efficace lorsque l'entraînement inclut des efforts spécifiques réalisés à une intensité élevée. L'intégration d'exercices ciblant les facteurs clés de la performance (vitesse, puissance et récupération) maximise l'impact des entraînements sur la capacité à répéter des sprints.

2.2.2. Hypoventilation comme méthode d'entraînement spécifique

Selon John West (1997), une figure emblématique de la physiologie respiratoire, l'hypoventilation se définit comme un «niveau de ventilation alvéolaire qui ne permet pas de maintenir les gaz du sang artériel à des valeurs normales». En d'autres termes, il s'agit d'une insuffisance respiratoire où la quantité d'air atteignant les alvéoles pulmonaires est réduite, entraînant des perturbations des concentrations en oxygène (O₂) et en dioxyde de carbone (CO₂) dans l'organisme.

L'hypoventilation peut avoir diverses causes médicales, telles que la dépression des centres respiratoires (due notamment aux barbituriques et aux opioïdes comme la morphine), des atteintes du bulbe rachidien, des maladies des muscles respiratoires, ou encore des obstructions des voies aériennes. Elle est également fréquemment observée chez des individus obèses, somnolents, polyglobuliques, ou boulimiques (Woorons, 2007).

En dehors des causes pathologiques, l'hypoventilation peut être induite volontairement dans un contexte contrôlé, connue sous le nom d'hypoventilation volontaire (HV). Cette dernière est caractérisée par une diminution délibérée de la ventilation, souvent via une réduction de la fréquence respiratoire (Woorons, 2014).

Afin de bien comprendre ce qu'est l'entraînement en HV, il est nécessaire d'apporter plusieurs précisions.

L'entraînement en HV est une méthode spécifique appliquée exclusivement lors d'un exercice physique. L'efficacité de cette approche repose sur l'association entre hypoventilation et effort physique, ce qui distingue cette méthode des techniques utilisées au repos. L'objectif principal de l'entraînement en HV est d'améliorer les performances sportives, et il n'est en aucun cas recommandé de l'utiliser lors de compétitions.

Contrairement à des pratiques comme les concours d'apnée, l'entraînement en HV ne consiste pas à prolonger la suspension respiratoire, mais à intégrer de courts blocages respiratoires précisément dosés au cours de l'effort.

L'entraînement en HV est souvent comparé à l'entraînement en hypoxie, bien que les deux méthodes reposent sur des principes distincts. L'hypoxie se caractérise par une diminution de la disponibilité en O_2 , soit par une réduction de la pression atmosphérique (en altitude), soit par une réduction de la fraction d' O_2 dans le mélange respiré (via des masques ou chambres hypoxiques).

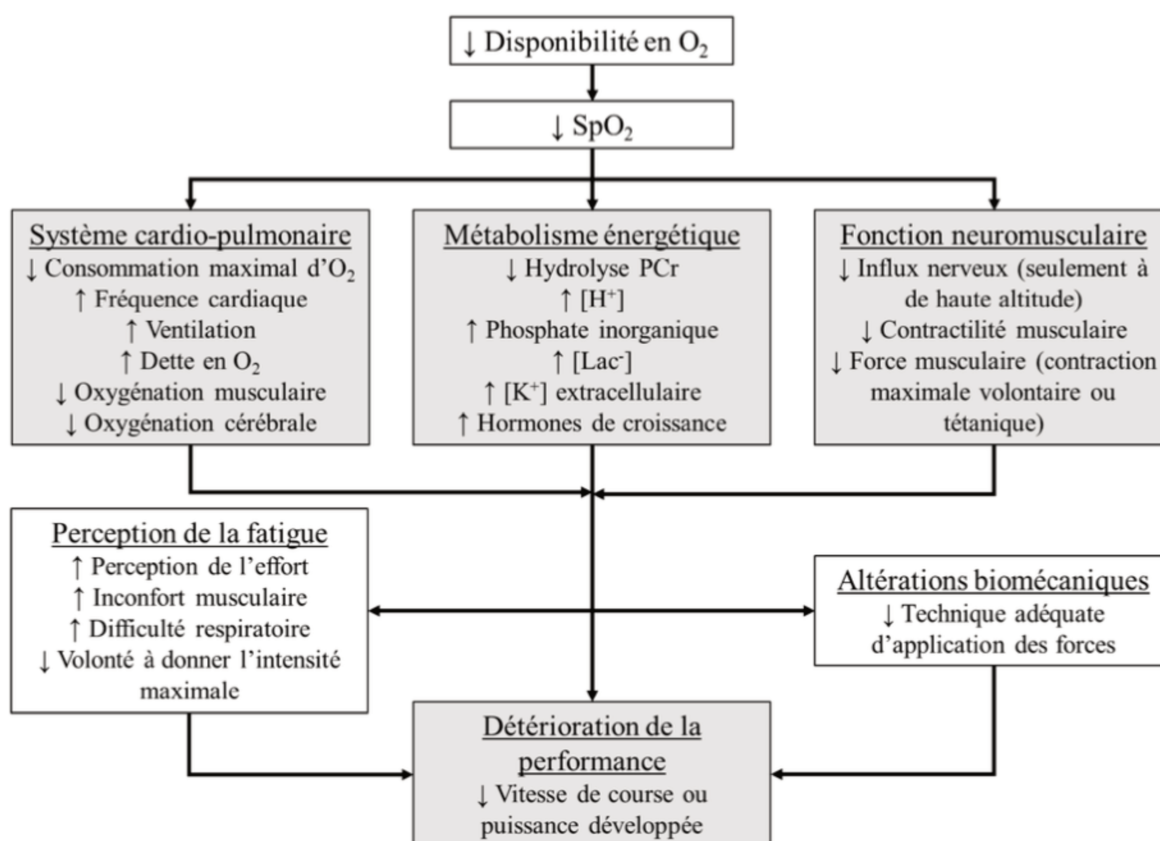


Figure 2 - Principales réponses aiguës de la réduction de la disponibilité en oxygène (hypoxie) lors d'un exercice de sprints répétés. O_2 : oxygène, PCr : phosphocréatine, $[H^+]$: concentration d'ions hydrogènes, $[Lac^-]$: concentration d'ions lactates et $[K^+]$: concentration d'ions potassiums. Inspiré de (Girard et al., 2017).

Cette condition entraîne une baisse de la pression partielle d'O₂ dans le sang artériel et une diminution de la saturation en oxygène (SpO₂).

L'entraînement en hypoxie inclut une variété de protocoles, impliquant des durées d'exposition différentes (de quelques secondes à plusieurs jours), des intensités variables (exercice sous-maximal ou maximal), et des approches localisées ou systémiques. D'après la figure 2, les réponses physiologiques à l'hypoxie incluent une augmentation de la perception de l'effort, une dégradation de la qualité des mouvements, et une diminution globale de la performance. Ces effets sont toutefois modulés par la tâche réalisée, la sévérité des conditions hypoxiques, et l'expérience préalable du sujet dans des environnements hypoxiques (Girard et al., 2017).

Bien que l'hypoventilation et l'hypoxie partagent certaines similitudes en termes d'impact physiologique, elles diffèrent dans leur application et leurs mécanismes sous-jacents. L'entraînement en HV constitue une méthode innovante et spécifique pour améliorer les performances physiques, en jouant sur les adaptations métaboliques et respiratoires associées à des efforts physiques sous une ventilation réduite.

2.2.3. Technique de travail en hypoventilation

De manière générale, une HV peut se faire de deux façons : à haut volume pulmonaire ou à faible volume pulmonaire.

Pour rappel, on peut distinguer différents volumes pulmonaires (Figure 3) :

- La capacité pulmonaire totale est le volume d'air se trouvant dans les poumons après une inspiration maximale
- La capacité vitale est le volume d'air maximum mobilisé après une inspiration ou une expiration maximale
- Le volume courant est la quantité d'air inspirée ou expirée à chaque respiration
- La capacité résiduelle fonctionnelle représente le volume d'air restant dans les poumons après une expiration normale
- Le volume résiduel représente le volume d'air restant dans les poumons après une expiration maximale.

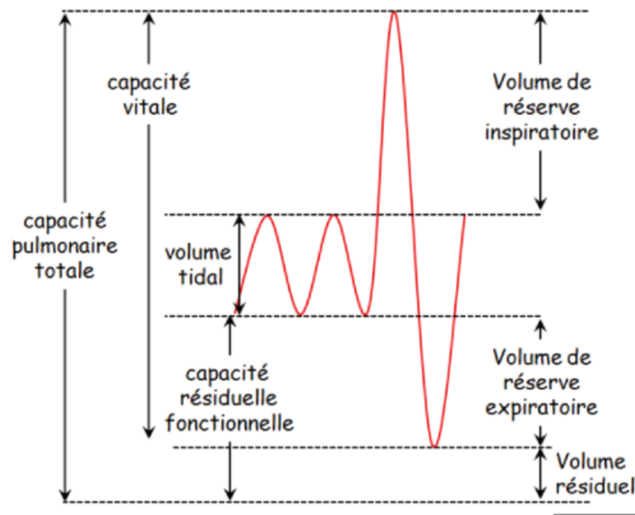


Figure 3 - Les différents volumes pulmonaires

L'HV à haut volume pulmonaire consiste à conserver un maximum d'air dans les poumons entre deux inspirations. Les blocages respiratoires a des niveaux proches de la capacité pulmonaire totale. Pour se faire, il faut bloquer sa respiration juste après avoir inspiré. Au contraire, lors de la HV à faible volume pulmonaire (HVB), les blocages respiratoires se font lorsque les poumons ont été partiellement vidés de leur air. On se situe alors aux environs de la capacité résiduelle fonctionnelle (CRF), soit à un peu moins de la moitié de la capacité pulmonaire totale (Woorons, 2014).

Concrètement, pour effectuer une HVB, il faut d'abord réaliser une expiration, puis bloquer sa respiration quelques secondes. C'est la technique du « expirer-bloquer ».

Au final, il n'y a que cette technique qui permettent à la fois de baisser significativement les concentrations en O₂ dans l'organisme (effet hypoxie) et d'augmenter les concentrations en CO₂ (effet hypercapnique)(Woorons et al., 2010).

C'est grâce à ce double effet, hypoxique et hypercapnique, que l'on obtient des adaptations physiologiques qui permettent d'améliorer la performance.

2.2.4. Adaptations physiologiques induites par l'hypoventilation

✓ Ventilation pulmonaire :

L'hypoventilation volontaire (HV) induit plusieurs adaptations physiologiques, notamment au niveau de la ventilation pulmonaire, des gaz alvéolaires, et de la consommation d'oxygène (VO₂).

La ventilation pulmonaire désigne le processus par lequel l'air atmosphérique pénètre dans les poumons par le nez et la bouche, traverse les voies respiratoires, puis est expulsé lors de l'expiration. En physiologie, la ventilation minute (VE) est définie comme le produit de la fréquence respiratoire (FR) et du volume courant (VT).

Dans le cadre de l'hypoventilation volontaire en normoxie (HVB), la diminution de la fréquence respiratoire est compensée par une augmentation de la profondeur des respirations (Woorons, 2007). Ainsi, lors d'un exercice en HVB à niveau terrestre, la ventilation minute peut être réduite de 20 à 25 % par rapport à une respiration normale (Woorons et al., 2007; Woorons et al., 2011).

L'HVB entraîne également des altérations significatives des gaz alvéolaires. La pression partielle d'un gaz dans les poumons dépend de la pression atmosphérique totale et de la concentration de ce gaz à l'endroit mesuré. Par exemple, au niveau de la trachée, l'air est saturé en vapeur d'eau, elle exerce alors une pression de 47 mmHg. Ainsi, la pression partielle d'oxygène (PO_2) dans l'air inspiré est réduite à environ 149 mmHg.

Après un exercice en HVB, des modifications notables sont observées dans les pressions partielles des gaz alvéolaires. La PO_2 diminue d'environ 10 % par rapport au même exercice effectué en respiration normale, tandis que la pression partielle de dioxyde de carbone (PCO_2) augmente de près de 25 % (Woorons et al., 2007).

Malgré les modifications de la ventilation pulmonaire et des gaz alvéolaires, la consommation d'oxygène (VO_2) reste inchangée après un exercice réalisé en HVB. Cela suggère que les ajustements physiologiques induits par l'HVB permettent de maintenir un approvisionnement adéquat en oxygène aux tissus malgré les variations des paramètres ventilatoires.

✓ Sang artériel :

Lors d'un exercice réalisé en hypoventilation volontaire en normoxie (HVB), la saturation en oxygène du sang artériel (SaO_2) diminue significativement pour atteindre en moyenne 86-87 % (Woorons, 2008), reflétant une hypoxie sévère. Un tel niveau de désaturation en oxygène équivaut à celui observé lors d'un exercice modéré effectué à une altitude de 2400 mètres ou d'un repos à environ 4000 mètres. Cette diminution de la SaO_2 résulte d'une réduction de la pression partielle en oxygène (PO_2) artérielle et d'une diminution de l'affinité de l'hémoglobine pour l'oxygène.

En parallèle de l'effet hypoxique, l'HVB induit un effet hypercapnique, caractérisé par une augmentation de la pression partielle de dioxyde de carbone (PCO_2) dans le sang artériel, qui atteint environ 50 mmHg. Cette élévation des concentrations de CO_2 perturbe l'équilibre acido-basique sanguin en raison de la conversion du CO_2 en ions hydrogène (H^+) et ensuite en bicarbonate (HCO_3^-). L'augmentation des H^+ est exacerbée par la production d'acide lactique, qui résulte de la diminution de la concentration en oxygène disponible pour les tissus. Par conséquent, l'exercice en HVB provoque une double acidose, à la fois respiratoire et métabolique.

Ces modifications physiologiques, combinant hypoxie sévère et acidose accrue, soulignent les réponses complexes du corps à l'hypoventilation volontaire et son potentiel à induire des adaptations spécifiques dans un contexte d'entraînement sportif.

✓ Effets cardiaques :

Dans les activités terrestres, l'exercice en hypoventilation volontaire en normoxie (HVB) entraîne des modifications significatives de l'activité cardiaque. Le débit cardiaque est augmenté, en raison de l'élévation simultanée de la fréquence cardiaque (Fc) et du volume d'éjection systolique (VES). Une instabilité marquée de la Fc est également observée, avec des oscillations importantes tout au long de l'exercice. Par ailleurs, les pressions artérielles systolique, diastolique et moyenne sont légèrement supérieures à celles mesurées lors d'un exercice réalisé en respiration normale.

Ces adaptations cardiaques résultent de plusieurs mécanismes physiologiques :

- 1. Augmentation de l'activité sympathique :** L'hypercapnie, seule ou associée à l'hypoxie, stimule le système nerveux sympathique, ce qui entraîne une élévation de la Fc et des pressions artérielles.
- 2. Effets de la technique respiratoire :** Les grandes inspirations profondes et rapides qui suivent les phases de blocage respiratoire caractéristiques de l'HVB augmentent le VES via un effet pompe lié aux variations de pression intrathoracique. Ces inspirations stimulent également les récepteurs cardiaques, contribuant ainsi à l'augmentation de la Fc.

Ces ajustements cardiovasculaires reflètent la réponse intégrée de l'organisme aux contraintes spécifiques de l'hypoventilation volontaire et mettent en évidence son impact potentiel sur la performance et les adaptations physiologiques dans un contexte d'entraînement.

✓ Effets musculaires :

La diminution de l'oxygénation du sang artériel induite par l'exercice en hypoventilation volontaire en normoxie (HVB) engendre une hypoxie tissulaire au niveau musculaire. Parallèlement, l'accumulation de dioxyde de carbone (CO_2) dans le sang freine son élimination au niveau musculaire, entraînant une augmentation des concentrations de CO_2 dans les tissus. Ces perturbations des concentrations gazeuses conduisent à une acidification marquée du milieu musculaire.

L'augmentation des concentrations d'ions H^+ dans les tissus musculaires résulte de plusieurs mécanismes :

1. **Augmentation de la production de lactate et d'ions H^+ :** La réduction de la disponibilité en oxygène (O_2) favorise le métabolisme anaérobie, conduisant à une production accrue de lactate.
2. **Transformation du CO_2 en HCO_3^- :** Une partie du dioxyde de carbone accumulé est convertie en bicarbonate (HCO_3^-) directement dans le muscle, libérant des ions H^+ en excès.
3. **Acidose sanguine :** La diminution du pH sanguin liée à l'accumulation de CO_2 ralentit le transfert des ions H^+ du muscle vers le sang par la voie des mécanismes de transport membranaire, contribuant à l'acidification locale.

Ces modifications physiologiques témoignent des contraintes métaboliques spécifiques imposées par l'HVB et mettent en lumière son rôle potentiel dans l'adaptation musculaire lors des entraînements en condition hypoxique et hypercapnique.

3. Problématique, Objectifs et Hypothèses

3.1. Problématique

À travers l'analyse de la littérature, nous avons saisi l'importance du développement de la capacité à répéter des sprints dans le basketball, ainsi que les bénéfices potentiels de l'entraînement en hypoventilation sur cette qualité physique. L'amélioration de cette capacité est essentielle pour permettre aux athlètes de mieux tolérer des efforts intensifs répétés et de les reproduire efficacement, favorisant ainsi leur aptitude à maintenir un haut niveau de performance tout au long d'un match exigeant.

Cette réflexion nous conduit à formuler la problématique suivante : **L'entraînement de sprint en hypoventilation à bas volume pulmonaire peut-il améliorer la capacité de répétition d'efforts maximaux chez les joueurs de basketball ?**

3.2. Objectifs

L'objectif de cette étude est d'évaluer la capacité à répéter des sprints à l'aide d'un test spécifique, dans le but de concevoir et de mettre en œuvre un protocole d'entraînement intégrant la méthode d'hypoventilation. Ce protocole vise à développer et améliorer cette qualité physique. À l'issue de la période d'entraînement, une réévaluation sera réalisée afin de déterminer si des progrès significatifs ont été observés.

Si les résultats de cette expérimentation s'avèrent concluants, ils permettront d'envisager une révision et une optimisation des méthodes employées pour le développement de la capacité de répétition de sprints au cours d'une saison sportive.

3.3. Hypothèse

Les hypothèses formulées dans le cadre de cette étude sont les suivantes :

- Hypothèse nulle (H_0) : Aucune amélioration significative n'est observée entre le début et la fin du protocole en ce qui concerne la capacité de répétition de sprints, telle que mesurée par le test Repeated Sprint Ability (RSA).
- Hypothèse alternative (H_1) : Une amélioration significative est observée entre le début et la fin du protocole sur au moins un paramètre de la capacité de répétition de sprints, telle que mesurée par le test Repeated Sprint Ability (RSA).

4. Matériels et méthodes

4.1. La structure d'accueil

Actuellement en alternance au sein du Lille Métropole Basket Club (LMBC), j'ai choisi de réaliser mon mémoire au sein de cette structure. Le club, actuellement en phase de reconstruction, a perdu

son équipe professionnelle cette année, ce qui a entraîné une rétrogradation de l'équipe de Pro B à la Nationale 3 (soit trois divisions d'écart avec la Pro B).

Le LMBC se distingue par la qualité de sa formation. En effet, toutes les équipes premières, de la catégorie U13 à U20, évoluent en championnat régional. Les catégories U15 et U18 participent au championnat national, représentant le plus haut niveau de compétition en France. Par ailleurs, les U11, équipe que j'entraîne, évoluent au niveau le plus élevé de la région (Division 1).

En termes d'infrastructures, le LMBC bénéficie d'un gymnase disposant de deux terrains de basket (Jean Zay 1 et Jean Zay 2), permettant d'organiser efficacement les entraînements en semaine ainsi que les matchs le week-end. C'est dans ces installations que j'ai exercé mes fonctions d'entraîneur pour les U11 et de préparateur physique pour les U18 et l'équipe Nationale 3.

Concernant la planification des entraînements, la structure est organisée comme suit :

- **Nationale 3 (N3)** : 3 entraînements hebdomadaires, auxquels s'ajoute une séance dédiée à la préparation physique.
- **U18** : 4 entraînements hebdomadaires, complétés par une séance de préparation physique.
- **U11** : 3 entraînements hebdomadaires spécifiques au basketball.

Chaque catégorie participe à un match le week-end. Durant la mise en œuvre du protocole, ciblant la catégorie Nationale 3, la séance de préparation physique sera consacrée au développement de la capacité à répéter des sprints.

4.2. Les sujets

Dans le cadre de mon protocole, j'ai collaboré avec l'équipe nationale 3. Ce groupe a été sélectionné en raison de sa capacité à mettre en œuvre efficacement la méthode d'entraînement, laquelle nécessite un certain niveau de compréhension.

Tous les athlètes concernés ont donné leur consentement éclairé et se sont volontairement engagés à participer à cette étude.

Nbr de sujets	Âge	Taille	Poids
14	22,8 +/- 6,3	183,2 +/- 9,1	85,7 +/- 10,1

Tableau 1- Données anthropométriques groupe nationale 3

Dans l'ensemble, les groupes seront évalués au début du protocole, et une méthodologie croisée sera mise en place afin de minimiser l'influence du facteur temps lors des analyses statistiques ultérieures.

Les évaluations seront réalisées de manière uniforme pour l'ensemble des participants, mais à des périodes distinctes. Au commencement du protocole, deux groupes de niveaux homogènes seront constitués pour garantir une répartition équilibrée des participants.

4.3. Matériels et techniques de mesures

Lors des tests, plusieurs types d'équipements seront employés pour assurer des mesures précises et fiables :

- Cellules photoélectriques :

Ces dispositifs permettront une évaluation précise des performances des athlètes dans le cadre du Repeated Sprint Ability Test. Leur précision dépasse celle d'un chronomètre manuel, ce qui est essentiel pour obtenir des résultats reproductibles.

- Capteurs de saturation en oxygène (SpO_2) :

Ces capteurs mesureront le pourcentage d'oxygène dans le sang des athlètes juste avant et après chaque sprint. Cette mesure permettra de vérifier si les athlètes évoluent dans une situation d'hypoventilation (à utiliser durant l'entraînement).

- Balance et mètre :

La masse corporelle et la taille des athlètes seront mesurées à l'aide d'une balance et d'un mètre pour compléter les données anthropométriques nécessaires.

Pour évaluer la capacité des athlètes à répéter des sprints, le Repeated Sprint Ability Test (RSA Test) sera utilisé.

Selon une étude publiée par Bishop et al. (2001), le protocole de test RSA consistant en 5 cycles de 6 sprints maximaux, avec 30 secondes de récupération entre chaque cycle, est couramment utilisé. Ce protocole peut toutefois être adapté en fonction des spécificités du sport étudié.

Dans le contexte du basketball, où les sprints sont fréquemment réalisés sur des distances de 5 à 20 mètres, avec une alternance rapide entre accélérations et décélérations (Taylor et al., 2017), la distance de 15 mètres sera retenue pour ce test.

Enfin, dans un souci d'individualisation accrue, le nombre de sprints pourra varier en fonction des joueurs et des postes occupés en match lors du test. Ainsi, l'exercice sera interrompu dès lors que

trois performances consécutives excèdent de plus de 0,3 seconde le meilleur temps réalisé par l'athlète.

Description du Test :

- Protocole : L'athlète effectue des sprints sur une distance de 15 mètres, entrecoupés de périodes de repos de 30 secondes. Le test est interrompu lorsque l'athlète enregistre trois sprints consécutifs dont les temps sont supérieurs de plus de 0,3 seconde à sa meilleure performance. Cette procédure permet une individualisation plus précise de l'évaluation en fonction des capacités propres à chaque joueur.
- Objectif : Mesurer la capacité de l'athlète à maintenir une performance de sprint élevée malgré la fatigue.
- Paramètres Mesurés :
 - ▶ Temps total : Somme des temps des sprints réalisés.
 - ▶ Meilleur temps : Temps le plus rapide enregistré sur l'un des sprints.
 - ▶ Nombre de sprints : Somme des sprints effectués durant le test
 - ▶ Indice de fatigue : Mesurer à partir de la formule suivante :

$$S_{dec} (\%) = \left(\frac{S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_{final}}{S_{meilleure} \times nombre\ de\ sprints} - 1 \right) \times 100$$

Les quatre paramètres mentionnés seront analysés statistiquement pour évaluer la progression des athlètes au fil du temps. Cette approche permettra d'identifier des améliorations potentielles et de mieux comprendre les capacités physiques de chaque athlète dans un contexte d'effort répété.

Enfin, les deux sessions de tests seront conduites dans des conditions strictement identiques afin de garantir la comparabilité des résultats.

Un protocole d'échauffement standardisé sera mis en place avant chaque session de tests. Cet échauffement visera à préparer physiquement les athlètes, à optimiser leurs performances et à réduire les risques de blessures durant les évaluations.

4.4. Le protocole expérimental

Dans ce protocole, nous diviserons le groupe expérimental en 2 et utiliserons la méthode croisée.

Ces deux groupes seront constitués lors de la première phase de test afin de créer 2 groupes homogènes pour comparer les résultats ensuite.

Après la phase de tests, le groupe 1 entamera le protocole d'entraînement incluant de l'hypoventilation et l'autre continuera les entraînements basketball classique. À l'issue des 4 semaines nous inverserons le processus. Le groupe 2 suivra un travail d'hypoventilation alors que le groupe 1 reprendra l'entraînement en basket classique (Figure 4)

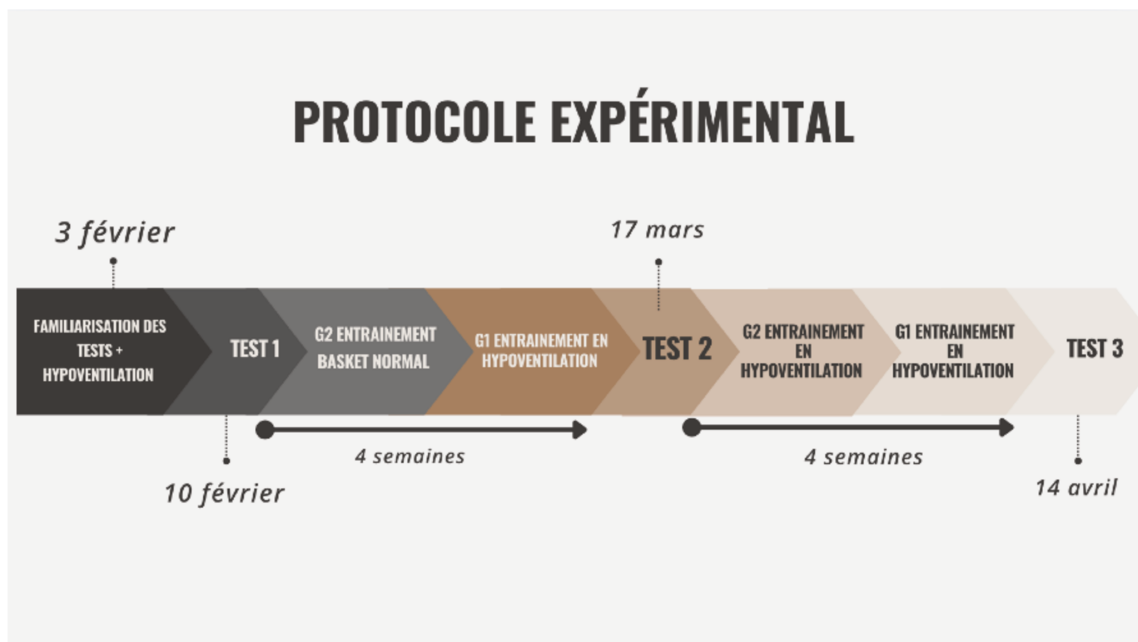


Figure 4 - Frise chronologique du protocole expérimental

Comme présenté sur la figure 4, les phases d'entraînement seront organisées en deux périodes distinctes, chacune d'une durée de quatre semaines.

Concernant le contenu du programme d'entraînement, comme indiqué précédemment, deux premières séances seront consacrées à l'apprentissage de la méthode d'hypoventilation par les joueurs.

Par la suite, un protocole de séance d'une durée de trente minutes, identique pour l'ensemble des participants, sera élaboré sur la base des protocoles décrits par Woorons (2014). Les travaux de cet auteur ont mis en évidence que l'entraînement en hypoventilation à faible volume pulmonaire présente des bénéfices notables pour les disciplines requérant des efforts intenses de courte à moyenne durée, dans lesquelles la filière anaérobie glycolytique constitue la principale source d'énergie (Annexe 2).

5. Statistiques

Avant d'effectuer l'analyse statistique, les trois derniers sprints seront exclus pour chaque paramètre, afin d'éviter que la forte baisse de performance observée en fin de période ne biaise les résultats.

Dans le cadre de l'analyse des quatre paramètres, l'ensemble des données recueillies avant et après l'intervention sera pris en compte pour chacun des deux groupes. Il est important de préciser que la seule distinction entre les groupes réside dans le moment auquel les joueurs ont effectué le programme d'entraînement.

La méthode croisée permet de structurer les résultats en deux périodes :

- **Première période** : phase au cours de laquelle aucun des groupes n'a encore suivi le protocole d'entraînement.
- **Deuxième période** : phase durant laquelle les deux groupes ont été exposés à l'intervention.

Une analyse statistique sera ensuite réalisée afin de comparer les résultats entre le groupe ayant suivi le protocole d'entraînement en hypoventilation et le groupe témoin, n'ayant pas été soumis à ce protocole.

L'analyse statistique commencera par une vérification de la normalité des distributions à l'aide du **test de Shapiro-Wilk**, ainsi que par une évaluation de l'homogénéité des variances via le **test de Levene**.

Un **ANOVA à deux facteurs** (temps × groupe) sera ensuite appliqué afin de déterminer l'existence d'éventuelles différences significatives entre les résultats obtenus avant et après l'intervention.

Le seuil de significativité sera fixé à **$p < 0,05$** . En cas de différence significative, un **test post hoc** sera réalisé pour identifier précisément la période à laquelle une amélioration significative a été observée.

Enfin, sur les graphiques, les données seront représentées en moyenne et en écart type.

6. Résultats

6.1. Nombre de sprints

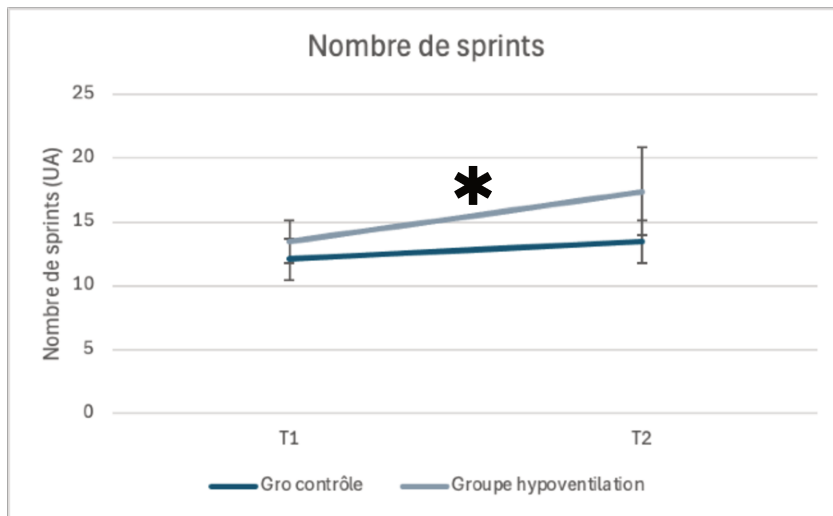


Figure 5- Représentation graphique des moyennes obtenues lors du test de répétition de sprints (nombre de sprints)

	T0-T3	P-value	
		Contrôle	Protocole
Test ANOVA	0,003		
Test T de student		0,3	0,02

Tableau 2 - Résultats aux tests ANOVA et T de student pour le nombre de sprints

* Valeur significative à $p < 0,05$

Les résultats présentés ci-dessus indiquent que l'analyse par ANOVA a révélé une différence significative au cours du protocole, la valeur de p étant inférieure au seuil de signification de 0,05.

L'analyse complémentaire du tableau met en évidence que cette progression significative concerne le groupe ayant suivi le programme d'entraînement, comme le confirme le test t de Student, également significatif ($p < 0,05$). Cette amélioration est observée spécifiquement durant la phase **d'entraînement en hypoventilation**.

6.2. Meilleur temps

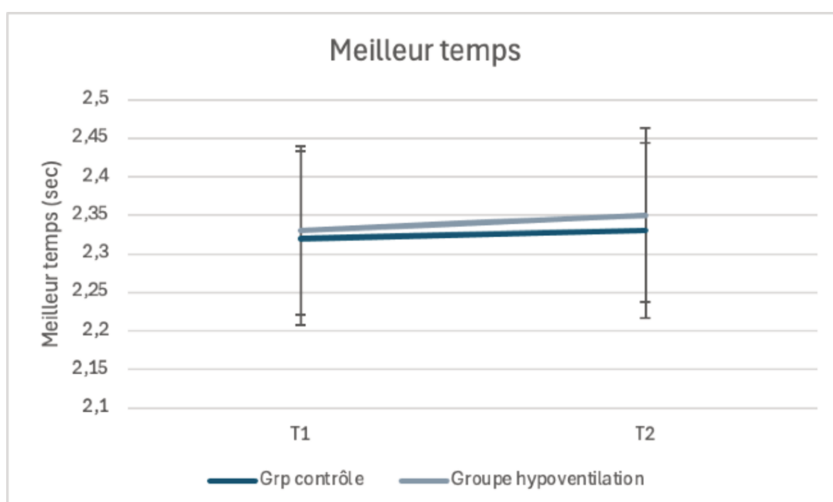


Figure 6- Représentation graphique des moyennes obtenues lors du test de répétition de sprints (meilleur temps)

	T0-T3	P-value	
		Contrôle	Protocole
Test ANOVA	0,6		
Test T de student			

Tableau 3 - Résultats aux tests ANOVA et T de student pour le meilleur temps

Comme le montrent les résultats ci-dessus, aucune différence significative n'a été observée sur l'ensemble de la période du protocole, la valeur de p étant largement supérieure au seuil de signification ($p > 0,05$).

6.3. Temps total

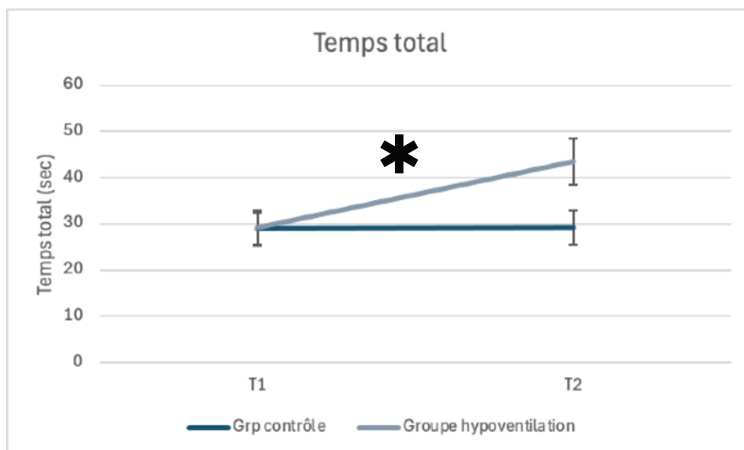


Figure 7- Représentation graphique des moyennes obtenues lors du test de répétition de sprints (temps total)

	T0-T3	P-value	
		Contrôle	Protocole
Test ANOVA	0,0003		
Test T de student		0,3	0,005

Tableau 4 - Résultats aux tests ANOVA et T de student pour le temps total

Les résultats présentés ci-dessus indiquent que l'analyse par ANOVA a révélé une différence significative au cours du protocole, la valeur de p étant inférieure au seuil de signification de 0,05.

L'analyse complémentaire du tableau met en évidence que cette progression significative concerne le groupe ayant suivi le programme d'entraînement, comme le confirme le test t de Student, également significatif ($p < 0,05$). Cette amélioration est observée spécifiquement durant la phase **d'entraînement en hypoventilation**.

6.4. Indice de fatigue

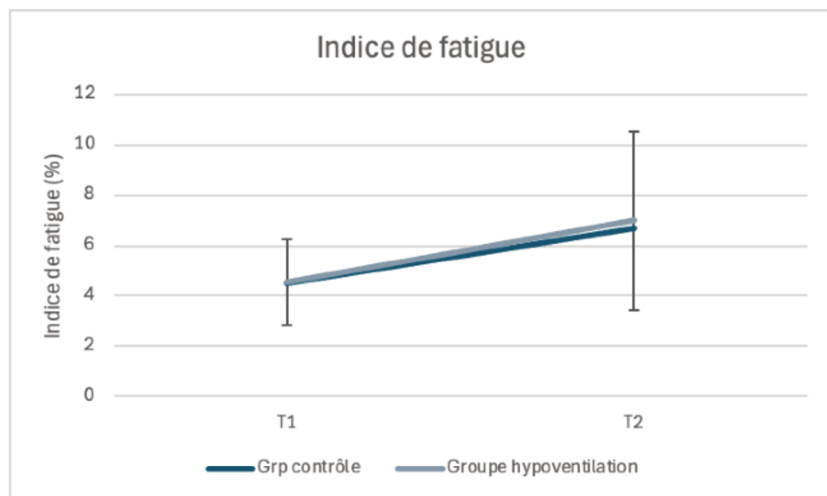


Figure 8 - Représentation graphique des moyennes obtenues lors du test de répétition de sprints (niveau de fatigabilité)

	P-value		
	T0-T3	Contrôle	Protocole
Test ANOVA	0,09		
Test T de student			

Tableau 5 - Résultats aux tests ANOVA et T de student pour l'indice de fatigue.

Comme le montrent les résultats ci-dessus, aucune différence significative n'a été observée sur l'ensemble de la période du protocole, la valeur de p étant largement supérieure au seuil de signification ($p > 0,05$).

En résumé, une différence significative a été observée, pour les deux groupes, tant au niveau du nombre de sprints réalisés que du temps total.

Ces effets significatifs se sont manifestés exclusivement au cours de la phase d'entraînement en hypoventilation.

7. Discussion

7.1. Interprétation

Nous avons observé un effet bénéfique de l'entraînement en hypoventilation sur la capacité à répéter des efforts maximaux chez des joueurs de basketball évoluant en Nationale 3. Cet effet s'est manifesté principalement par une amélioration significative de deux paramètres : le nombre total de sprints réalisés et le temps cumulé d'effort.

Ces améliorations ont été constatées exclusivement pendant les périodes d'entraînement sous hypoventilation, ce qui suggère un lien direct entre cette méthode et les gains de performance mesurés.

Dans les deux groupes étudiés, les phases correspondant à l'utilisation de l'hypoventilation (T1 → T2 pour le groupe 1 et T2 → T3 pour le groupe 2) ont coïncidé avec des progressions notables du nombre de sprints et du temps total. Cette cohérence renforce la validité des effets observés. En revanche, aucune amélioration n'a été relevée concernant la performance maximale (meilleur temps) ni l'indice de fatigabilité, ce qui pourrait indiquer que les adaptations induites par l'hypoventilation sont spécifiques à la capacité de répétition plutôt qu'à l'intensité maximale de l'effort.

Ainsi, il apparaît clairement que l'entraînement en hypoventilation améliore significativement la capacité à enchaîner les sprints, en augmentant notamment la quantité d'efforts maximaux qu'un athlète peut produire consécutivement.

Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés par Trincat et al. (2016), qui ont observé une amélioration de 35 % du nombre de sprints chez des nageurs soumis à un protocole similaire. De manière comparable, nous avons enregistré une progression de 30 % pour le groupe 1 et de 32 % pour le groupe 2 au cours des phases d'entraînement en hypoventilation.

L'amélioration du RSA, sans modification de la vitesse maximale, a également été démontrée chez des joueurs de rugby de haut niveau, avec une augmentation de 64 % du nombre de sprints jusqu'à épuisement (Fornasier-Santos et al., 2018).

Il est intéressant de noter que, dans l'ensemble des études citées, les principales améliorations concernent le nombre de sprints réalisés, tandis que d'autres paramètres comme la vitesse moyenne ou l'indice de fatigabilité restent globalement inchangés.

Ces résultats peuvent s'expliquer par les adaptations physiologiques spécifiques induites par l'hypoventilation, telles que décrites par Woorons (2014). En provoquant un stress à la fois hypoxique et hypercapnique, cette méthode stimule des mécanismes d'adaptation ventilatoire, métabolique et musculaire. L'augmentation de la tolérance à l'acidose, l'amélioration de la régénération de la phosphocréatine, ainsi qu'une meilleure régulation du CO₂ semblent contribuer au retard de l'apparition de la fatigue lors d'efforts répétés.

7.2.Limites

Bien qu'une amélioration significative du nombre de sprints réalisés ait été constatée chez les athlètes, plusieurs limites viennent nuancer ces résultats.

Tout d'abord, parmi les quatre paramètres évalués, seule cette variable a présenté une progression notable. Concernant la vitesse moyenne, il est important de rappeler que les quinze premiers mètres d'un sprint correspondent essentiellement à la phase d'accélération. Cette distance est trop courte pour permettre l'expression d'une véritable vitesse maximale. Une évaluation sur une distance plus longue, comme 30 mètres, aurait sans doute offert une mesure plus pertinente de ce paramètre.

Par ailleurs, l'indice de fatigabilité (exprimé en pourcentage de variation entre chaque sprint) est difficilement interprétable dans le cadre d'efforts très brefs (2 à 3 secondes). Les variations y sont généralement faibles, ce qui limite la sensibilité du test pour détecter d'éventuelles différences significatives.

La taille de l'échantillon constitue une autre limite. Un plus grand nombre de participants aurait permis de renforcer la validité et la généralisation des résultats obtenus.

Le maintien d'un protocole d'entraînement identique tout au long de l'étude a également pu freiner la progression. Une répétition constante des mêmes exercices peut entraîner une adaptation rapide de l'organisme, limitant ainsi les effets à long terme. Introduire davantage de variété dans les exercices aurait permis de solliciter différemment les systèmes physiologiques et potentiellement de mettre en évidence d'autres effets. Néanmoins, ce choix méthodologique était intentionnel : il visait à isoler au mieux l'effet de l'hypoventilation comme seul facteur de variation, en évitant toute confusion liée à une modification du contenu d'entraînement.

En outre, le volume hebdomadaire alloué au protocole – environ trente minutes par semaine – reste relativement modeste. Il serait pertinent d'envisager une durée plus longue ou une fréquence d'intervention plus élevée pour espérer des effets plus marqués et plus globaux sur la performance.

La maîtrise de la technique d'hypoventilation représente également un facteur limitant. Même si le recours à l'oxymètre de pouls permettait de valider ou non l'exécution correcte du sprint, la fiabilité de cet appareil doit être prise en considération.

Enfin, la motivation des joueurs lors des tests constitue un autre élément susceptible d'influencer les résultats, et donc une limite à prendre en compte.

7.3. Application terrain

Notre étude suggère que l'hypoventilation pourrait être intégrée de manière pertinente dans un cycle d'entraînement, notamment lors de la phase de reprise de saison en basketball. Elle constitue une méthode originale et efficace pour développer rapidement la capacité à répéter des efforts

maximaux, une qualité particulièrement sollicitée dans la pratique du basketball de haut niveau, où l'intensité de jeu est constamment élevée.

7.4.Perspectives

Plusieurs pistes de recherche peuvent être envisagées à la suite de cette étude.

Tout d'abord, il serait pertinent de reproduire ce protocole en utilisant des distances de sprint plus longues. Cela permettrait une évaluation plus précise des effets de l'hypoventilation sur la vitesse maximale, qui ne peut pleinement s'exprimer sur une distance de 15 mètres.

Par ailleurs, en conservant la même distance de sprint, une étude comparative pourrait être menée entre un groupe s'entraînant exclusivement en hypoventilation et un autre combinant hypoventilation et travail plyométrique. Cette approche permettrait d'examiner si l'association des deux méthodes favorise non seulement une augmentation du nombre de sprints réalisés, mais aussi une amélioration de la vitesse maximale.

Une autre perspective consisterait à classer les joueurs en fonction de leur profil de jeu (joueurs intérieurs vs extérieurs). Une telle répartition permettrait de constituer des groupes plus homogènes et de comparer leurs progressions respectives, afin de déterminer si l'un des profils bénéficie davantage de ce type d'entraînement.

Enfin, il serait également intéressant d'établir un lien entre les performances au test RSA (Repeated Sprint Ability) et celles obtenues à un test de VMA (Vitesse Maximale Aérobie). Cela permettrait de vérifier si les athlètes les plus performants en VMA le sont également en RSA, et si l'entraînement en hypoventilation induit des progrès simultanés dans ces deux domaines.

8. Conclusion

Ce travail a permis d'évaluer les effets de l'entraînement en hypoventilation volontaire sur la capacité de répétition d'efforts maximaux chez des joueurs de basketball évoluant en Nationale 3. L'objectif principal était de déterminer si cette méthode innovante pouvait constituer un levier pertinent pour améliorer les performances dans un sport exigeant en termes d'intensité répétée.

Les résultats obtenus montrent une amélioration significative du nombre de sprints réalisés ainsi que du temps total d'effort lors des phases d'entraînement en hypoventilation. Ces effets positifs,

observés dans les deux groupes testés, confirment l'intérêt de cette méthode pour développer la capacité à enchaîner des efforts intenses de manière répétée, une qualité essentielle dans la pratique du basketball. En revanche, aucun effet significatif n'a été constaté sur la vitesse moyenne ni sur l'indice de fatigabilité, suggérant que l'hypoventilation agit principalement sur la tolérance à la répétition des efforts, plus que sur l'intensité maximale de ceux-ci.

Malgré les limites identifiées (notamment un échantillon réduit, un protocole unique et une distance de sprint ne permettant pas d'exprimer pleinement la vitesse maximale) cette étude ouvre des perspectives intéressantes. L'hypoventilation pourrait être intégrée, de manière ciblée, dans les phases de préparation physique, notamment en début de saison, pour accélérer le développement de la résistance à l'effort répété.

À l'avenir, des travaux complémentaires pourraient explorer l'impact de cette méthode sur des distances plus longues, ou en combinaison avec d'autres modalités d'entraînement, comme la plyométrie, pour un développement plus global de la performance.

9. Bibliographie

- Bishop, David John & Girard, Olivier & Mendez-Villanueva, Alberto. (2011). Repeated-Sprint Ability Part II: Recommendations for Training. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*. 41. 741-56. 10.2165/11590560-000000000-00000. https://www.researchgate.net/publication/51575623_Repeated-Sprint_Ability_Part_II_Recommendations_for_Training/citation/download
- Bishop D, Spencer M, Duffield R, Lawrence S. The validity of a repeated sprint ability test. *J Sci Med Sport*. 2001 Mar;4(1):19-29. doi: 10.1016/s1440-2440(01)80004-9. PMID: 11339490. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11339490/>
- Buchheit, M., Méndez-Villanueva, A., Quod, M., Quesnel, T., & Ahmaidi, S. (2010). Improving acceleration and repeated sprint ability in well-trained adolescent handball players: speed versus sprint interval training.. *International journal of sports physiology and performance*, 5 2, 152-64 . <https://doi.org/10.1123/IJSPP.5.2.152>.
- Charron, J., García, J., Roy, P., Ferland, P., & Comtois, A. (2020). Physiological Responses to Repeated Running Sprint Ability Tests: A Systematic Review.. *International journal of exercise science*, 13 4, 1190-1205 . <https://doi.org/10.70252/nxqi1037>.
- Capranica, L., Favero, T., Francioni, F., Conte, D., Lupo, C., & Tessitore, A. (2015). Time-Motion Analysis of Italian Elite Women's Basketball Games: Individual and Team Analyses. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 29, 144–150. https://journals.lww.com/nsca-jscr/fulltext/2015/01000/time_motion_analysis_of_italian_elite_women_s.18.aspx
- Clarke, N., Delextrat, A., & Caprino, D. (2012). The effect of an official match on repeated sprint ability in junior basketball players. *Journal of Sports Sciences*, 30, 1165 - 1173. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02640414.2012.695081>
- Collins, Brandon & Pearcey, Gregory & Buckle, Natasha & Power, Kevin & Button, Duane. (2018). Neuromuscular fatigue during repeated sprint exercise: underlying physiology and methodological considerations. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*. 43. 1166-1175. 10.1139/apnm-2018-0080. <https://www.researchgate.net/publication/10.1139/apnm-2018-0080>

- Fornasier-Santos, C., Millet, G. P., and Woorons, X. (2018). Repeated-sprint training in hypoxia induced by voluntary hypoventilation improves running repeated-sprint ability in rugby players. *Eur. J. Sport Sci.* 18, 504–512. doi: 10.1080/17461391.2018.1431312
- Gharbi, Z., Dardouri, W., Haj-Sassi, R., Chamari, K., & Souissi, N. (2015). Aerobic and anaerobic determinants of repeated sprint ability in team sports athletes. *Biology of Sport*, 32, 207 - 212. <https://doi.org/10.5604/20831862.1150302>.
- Girard O, Lattier G, Micallef JP, Millet GP. Changes in exercise characteristics, maximal voluntary contraction, and explosive strength during prolonged tennis playing. *Br J Sports Med.* 2006 Jun;40(6):521-6. doi: 10.1136/bjsm.2005.023754. PMID: 16720888; PMCID: PMC2465109. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16720888/>
- Girard, O., Racinais, S., Kelly, L., Millet, G. P. et Brocherie, F. (2011). Repeated sprinting on natural grass impairs vertical stiffness but does not alter plantar loading in soccer players. *European Journal of Applied Physiology*, 111(10), 2547-2555. <https://doi.org/10.1007/s00421-011-1884-5>
- Glaister, M., Howatson, G., Pattison, J. R. et McInnes, G. (2008). The reliability and validity of fatigue measures during multiple-sprint work: An issue revisited. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 22(5), 1597-1601. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e318181ab80>
- Kyles, A., Oliver, J., Cahill, M., Lloyd, R., & Pedley, J. (2023). Linear and Change of Direction Repeated Sprint Ability Tests: A Systematic Review. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 37, 1703 - 1717. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000004447>.
- Lapointe J, Paradis-Deschênes P, Woorons X, Lemaître F and Billaut F (2020) Impact of Hypoventilation Training on Muscle Oxygenation, Myoelectrical Changes, Systemic [K⁺], and Repeated-Sprint Ability in Basketball Players. *Front. Sports Act. Living* 2:29. doi: 10.3389/fspor.2020.00029. <https://www.frontiersin.org/journals/sports-and-active-living/articles/10.3389/fspor.2020.00029/full>

- Liu, H., Li, R., Zheng, W., Ramirez-Campillo, R., De Villarreal, E., & Zhang, M. (2024). The Effect of Combined Strength, Plyometric, and Sprint Training on Repeated Sprint Ability in Team-Sport Athletes: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Sports Science and Medicine*. <https://doi.org/10.52082/jssm.2024.718>.
- Mendez-Villanueva, A., Hamer, P. et Bishop, D. (2008). Fatigue in repeated-sprint exercise is related to muscle power factors and reduced neuromuscular activity. *European Journal of Applied Physiology*, 103(4), 411-419. <https://doi.org/10.1007/s00421-008-0723-9>
- Taylor JB, Wright AA, Dischiavi SL, Townsend MA, Marmon AR. Activity Demands During Multi-Directional Team Sports: A Systematic Review. *Sports Med*. 2017 Dec;47(12):2533-2551. doi: 10.1007/s40279-017-0772-5. PMID: 28801751. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28801751/>
- Tønnessen, E., Shalfawi, S., Haugen, T., & Enoksen, E. (2011). The Effect of 40-m Repeated Sprint Training on Maximum Sprinting Speed, Repeated Sprint Speed Endurance, Vertical Jump, and Aerobic Capacity in Young Elite Male Soccer Players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25, 2364-2370. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3182023a65>.
- Torres-Torrelo, J., Rodríguez-Rosell, D., Mora-Custodio, R., Pareja-Blanco, F., Yáñez-García, J., & González-Badillo, J. (2018). Effects of Resistance Training and Combined Training Program on Repeated Sprint Ability in Futsal Players. *International Journal of Sports Medicine*, 39, 517 - 526. <https://doi.org/10.1055/a-0596-7497>.
- Tortu, E., Hazır, T., & Kin-Isler, A. (2024). Energy System Contributions in Repeated Sprint Tests: Protocol and Sex Comparison. *Journal of Human Kinetics*, 92, 87 - 98. <https://doi.org/10.5114/jhk/175862>.
- Trincat, Laurent & Woorons, Xavier & Millet, Gregoire. (2016). Repeated Sprint Training in Hypoxia Induced by Voluntary Hypoventilation in Swimming. *International journal of sports physiology and performance*. 12. 10.1123/ijsp.2015-0674. https://www.researchgate.net/publication/303458108_Repeated_Sprint_Training_in_Hypoxia_Induced_by_Voluntary_Hypoventilation_in_Swimming

- Ulupinar, S., Özbay, S., Gençoğlu, C., Franchini, E., Kışalı, N., & İnce, İ. (2021). Effects of sprint distance and repetition number on energy system contributions in soccer players. *Journal of Exercise Science and Fitness*, 19, 182 - 188. <https://doi.org/10.1016/j.jesf.2021.03.003>.
- Wadley G, Le Rossignol P. The relationship between repeated sprint ability and the aerobic and anaerobic energy systems. *J Sci Med Sport*. 1998 Jun;1(2):100-10. doi: 10.1016/s1440-2440(98)80018-2. PMID: 9732114. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9732114/>
- Woorons X, Bourdillon N, Lamberto C, Vandewalle H, Richalet JP, Mollard P, Pichon A. Cardiovascular responses during hypoventilation at exercise. *Int J Sports Med*. 32:438-445, 2011. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21563023/>
- Woorons X. Conséquences physiologiques de l'entraînement en hypoventilation volontaire réalisée à de faibles volumes pulmonaires. Thèse de Doctorat en Biologie Humaine. Bobigny, Université Paris 13, 2007, 125 p. <https://theses.fr/2007PA132026>
- Woorons, X., Bourdillon, N., Vandewalle, H. et al. Exercise with hypoventilation induces lower muscle oxygenation and higher blood lactate concentration: role of hypoxia and hypercapnia. *Eur J Appl Physiol* 110, 367–377 (2010). <https://link.springer.com/article/10.1007/s00421-010-1512-9#citeas>
- Woorons X, Gamelin FX, Lamberto C, Pichon A, Richalet JP. Swimmers can train in hypoxia at sea level through voluntary hypoventilation. *Respir Physiol Neurobiol*. 190:33-39, 2014. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24012989/>
- Xavier Woorons. L'entraînement en hypoventilation, repoussez vos limites!. *Ed. ARPEH*, Lille, France, 2014.

10. Annexes

Échauffement standardisé	
Exercice	Série
Déroulé pointe	
Ouverture de hanche	
Fermeture de hanche	
Balistic Avant arrière	
Balistic droite et gauche	
Fente + rotation du buste	1 aller retour sur 15 mètres
Travail d'appuis + montée de genoux	
Travail d'appuis 2 + talon fesses	
Travail d'appuis + course défensive	
Tipping + accélération progressive	

Annexe 1- Échauffement standardisé

Entraînement en hypoventilation		
Bloc	Temps	Exercice
1	3 min	Course normale
2	4 min	Course avec blocage de respiration à volume pulmonaire bas pendant 3 secondes
3	5 min	Course avec blocage de respiration à volume pulmonaire bas et course rapide pendant 3 secondes
4	15 min	10 sprints à volume pulmonaire bas. Ils doivent sprinter jusqu'au moment où l'envie de respirer devient obligatoire. Ils ont 30 secondes de repos entre chaque sprint. Durant ce temps de repos, je prends la saturation en O2 grâce à l'oxymètre de poignets qu'ils portent durant le sprint.

Annexe 2- Description protocole de l'entraînement en hypoventilation

<

Annexe 3 - Analyse statistique des deux groupes

S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
2,44	2,48	2,51	2,46	2,53	2,42	2,50	2,51	
2,59	2,66	2,63	2,67	2,66	2,75	2,76	2,76	
2,32	2,35	2,20	2,35	2,37	2,36	2,40	2,35	
2,30	2,21	2,34	2,29	2,35	2,27	2,39	2,32	
2,19	2,63	2,47	2,53	2,50	2,50	2,64	2,52	
2,57	2,52	2,66	2,71	2,72	2,76	2,77	2,79	
2,33	2,47	2,42	2,56	2,48	2,61	2,56	2,60	
2,37	2,40	2,46	2,47	2,50	2,48	2,59	2,58	
2,40	2,42	2,50	2,38	2,51	2,41	2,50	2,50	
2,6	2,6	2,62	2,54	2,63	2,64	2,59	2,45	
2,3	2,32	2,3	2,31	2,25	2,26	2,35	2,4	
2,43	2,45	2,43	2,47	2,45	2,39	2,42	2,45	
2,3	2,34	2,31	2,35	2,34	2,35	2,31	2,29	
2,44	2,49	2,55	2,44	2,45	2,51	2,52	2,5	
2,44	2,36	2,56	2,48	2,55	2,48	2,57	2,45	

Annexe 4 - Captures d'écrans des 9 premiers sprints des joueurs lors du test RSA - Vitesses en secondes

Résumé

Objectifs et hypothèses : L'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'effet d'un entraînement en hypoventilation sur l'amélioration de la capacité des athlètes à répéter des efforts intenses. Il est formulé l'hypothèse qu'à l'issue du protocole, au moins un des paramètres du test RSA présentera une amélioration significative.

Méthode : Quatorze joueurs de l'équipe Nationale 3 ont participé à cette étude. Ils ont été répartis en deux groupes homogènes en tenant compte de leur taille, de leur âge et de leur masse corporelle. Une méthode croisée a été adoptée : la moitié des joueurs a débuté par un entraînement en hypoventilation sur une période de quatre semaines, tandis que l'autre moitié poursuivait un entraînement classique en basketball. À l'issue du second test, les groupes ont échangé leurs modalités d'entraînement pour une nouvelle phase de quatre semaines.

L'évaluation des performances s'est appuyée sur le test Repeated Sprint Ability (RSA), qui mesure quatre indicateurs : le nombre de sprints réalisés, le temps total d'effort, la meilleure performance (temps le plus rapide) et l'indice de fatigue.

Résultats : Parmi les quatre paramètres évalués, deux ont montré une amélioration significative chez les deux groupes pendant les phases d'entraînement en hypoventilation : le nombre de sprints réalisés et le temps total d'effort. En revanche, aucune progression significative n'a été observée concernant la meilleure performance ni l'indice de fatigue.

Discussion et conclusion : Les résultats de cette étude montrent que l'entraînement en hypoventilation volontaire permet une amélioration significative de la capacité à répéter des efforts intenses, une qualité déterminante dans la performance en basketball. L'absence d'effet notable sur la meilleure performance et l'indice de fatigue laisse penser que les adaptations physiologiques induites sont ciblées, favorisant davantage la résistance à la répétition des efforts que l'augmentation de leur intensité maximale. Ainsi, cette méthode d'entraînement apparaît comme une approche innovante et prometteuse pour optimiser la performance des basketteurs sur le terrain, bien qu'une exploration plus approfondie soit nécessaire pour en affiner les modalités d'application.

Mots clefs : Hypoventilation volontaire, Repeated Sprint Ability (RSA), Basketball, Répétition d'efforts, performance sportive.

Abstract

Objectives and Hypotheses: The main objective of this study is to evaluate the effect of hypoventilation training on improving athletes' ability to repeat high-intensity efforts. It is hypothesized that, following the protocol, at least one of the RSA test parameters will show significant improvement.

Method: Fourteen players from the National 3 basketball team participated in this study. They were divided into two homogeneous groups based on height, age, and body mass.

A crossover method was used: half of the players began with hypoventilation training for four weeks, while the other half continued with standard basketball training. After the second test, the training modalities were switched between groups for another four-week phase.

Performance evaluation was based on the Repeated Sprint Ability (RSA) test, which measures four indicators: the number of sprints completed, total sprint time, best sprint performance (fastest time), and fatigue index.

Results: Of the four parameters assessed, two showed significant improvement in both groups during the hypoventilation training phases: the number of sprints performed and the total time of effort. However, no significant improvement was observed in best performance or fatigue index.

Discussion and Conclusion: The results of this study indicate that voluntary hypoventilation training significantly enhances the ability to repeat high-intensity efforts, which is a key component of basketball performance. The absence of notable changes in maximal speed and fatigue index suggests that the physiological adaptations induced by hypoventilation are specific, primarily improving tolerance to repeated effort rather than maximum intensity. This training method therefore appears to be an innovative and promising approach to enhancing basketball performance on the court, although further research is needed to refine its application.

Keywords: Voluntary hypoventilation, Repeated Sprint Ability (RSA), Basketball, Repeated efforts, Sports performance.

Compétences acquises

Au cours de ma mise en stage, j'ai acquis plusieurs compétences :

- Savoir utiliser des outils technologiques avancés
- Savoir analyser et interpréter des données statistiques
- Savoir utiliser une méthode d'entraînement innovante
- Savoir communiquer afin que les joueurs comprennent la demande de l'entraînement.