



**Université Abderrahmane-Mira Bejaia  
Faculté Des Sciences Humains Et Sociales  
Département Des Sciences Et Techniques Des Activités Physiques  
Et Sportives « STAPS »**

***Mémoire de fin de cycle***

**En vue de l'obtention d'un diplôme de Master en sciences et techniques des  
activités physiques et sportives**

**Filière : Entraînement sportif**

**Spécialité : Entraînement sportif d'élite**

**Thème**

**L'impact de l'entraînement en hypoventilation  
volontaire sur la capacité à répéter des sprints  
chez les footballeurs séniors. (cas IRBBH de Bouhamza)**

**Réalisé par :**

**HAMICHE Lounis**

**Encadré par :**

**Dr. CHETTOUH Farid**

**Année universitaire**

**2022/2023**

# *Dédicace*

*"À ma famille, ma source d'inspiration et de soutien inébranlable, à ma femme qui m'a toujours encouragé dans mes efforts, à ma fille Jana et mon fils Enzo qui sont ma plus grande fierté, à mon père et ma mère pour leur amour et leur guidance précieuse, à mes frères, à vous Yanis et Adel*

*À tous mes amis exceptionnels,. À toi mon ami Walid MAMMERI*

*À tout les membres de mon club Olympique Biziou, à leurs tête Nassim CHENNA.*

*À l'équipe commerciale de Coca Cola de Béjaia, spécialement à toi Hacem MAOUCHE.*

*Et enfin à mon encadreur, Dr. CHETTOUH Farid*

*À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire, je vous dédie ces mots de reconnaissance. Votre présence dans ma vie a apporté une valeur inestimable, et je suis honoré d'avoir pu partager cette expérience avec vous.*

*Merci du fond du cœur,*

***HAMICHE Lounis***

## ***Remerciements***

*Tout d'abord, je voudrais exprimer ma reconnaissance envers mon directeur de mémoire, Dr. CHETTOUH Farid, pour sa guidance experte tout au long du processus. Votre expertise, votre patience et votre engagement ont été d'une valeur inestimable, et j'ai énormément appris de vos précieux commentaires et suggestions.*

*Je tiens à exprimer ma gratitude envers mes proches, ma famille et mes amis, qui m'ont soutenu de manière inconditionnelle pendant cette période. Vos encouragements, votre soutien émotionnel et votre compréhension ont été essentiels pour me permettre de me concentrer sur mes recherches et d'atteindre mes objectifs.*

*Je souhaite également exprimer ma profonde reconnaissance envers tous les participants de mon étude. Leur contribution généreuse de leur temps et de leur expertise pour partager leurs connaissances et leurs expériences a grandement enrichi mon travail. Leurs perspectives précieuses et leurs témoignages ont été essentiels pour obtenir des résultats significatifs et approfondir ma compréhension du sujet.*

*En résumé, je suis pleinement conscient que la réalisation de ce mémoire n'aurait pas été possible sans le soutien et l'apport précieux de toutes les personnes mentionnées ci-dessus. Je suis profondément reconnaissant envers chacun d'entre vous et je tiens à vous exprimer ma plus sincère gratitude.*

*Cordialement,*

***HAMICHE Lounis***

## SOMMAIRE :

<b>Table d'abréviation :</b> .....	<b>I</b>
<b>Liste des tableaux :</b> .....	<b>II</b>
<b>Listes des figures :</b> .....	<b>III</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	<b>1</b>
<b>1 PROBLEMATIQUE :</b> .....	<b>5</b>
<b>1.1 Définition des concepts clés :</b> .....	<b>7</b>
<b>1 FOOTBALL</b> .....	<b>10</b>
<b>1.1 Définitionet historique du football</b> .....	<b>10</b>
<b>1.2 Exigences du football moderne</b> .....	<b>11</b>
1.2.1 Exigences techniques.....	11
1.2.2 Exigences tactiques.....	13
1.2.3 Exigences mentales.....	13
1.2.4 Exigences physique .....	14
<b>1.3 Caractéristiques de l'effort en football</b> .....	<b>15</b>
<b>1.4 Généralités sur un match de haut niveau selon le poste occupé :</b> .....	<b>18</b>
<b>1.5 Les qualités physiques requises en football</b> .....	<b>19</b>
1.5.1 L'endurance.....	20
1.5.1.1 Définition .....	20
1.5.1.2 Les modalités de l'endurance .....	20
1.5.1.3 L'importance de l'endurance.....	21
1.5.1.4 Les stratégies d'amélioration de la performance en endurance .....	21
1.5.2 La force.....	22
1.5.2.1 Définition .....	22
1.5.2.2 Les modalités de la force.....	22
1.5.2.3 L'importance de la force en football.....	23
1.5.2.4 Les méthodes d'amélioration de la force .....	24
1.5.3 La vitesse : .....	24
1.5.3.1 Définition .....	24
1.5.3.2 Les formes de la vitesse .....	25
1.5.3.3 L'importance de la vitesse en football .....	25
1.5.3.4 Les méthodes de développement de la vitesse .....	26

1.5.4	La Coordination.....	26
1.5.4.1	Définition .....	26
	L'importance de la coordination en football .....	27
1.5.4.2	Les méthodes de développement de la vitesse .....	27
1.5.5	La souplesse.....	27
1.5.5.1	Définition .....	27
1.5.5.2	Les formes de souplesse .....	28
1.5.5.3	Les méthodes de développement de la souplesse.....	28
<b>2</b>	<b>L'ENTRAINEMENT EN FOOTBALL.....</b>	<b>29</b>
<b>2.1</b>	<b>Définition de l'entraînement.....</b>	<b>29</b>
<b>2.2</b>	<b>Les objectifs de l'entraînement en football :.....</b>	<b>30</b>
<b>2.3</b>	<b>Les principales méthodes d'entraînement utilisées dans le football .....</b>	<b>31</b>
2.3.1	La méthode régulière ou continue. ....	31
2.3.2	Méthode par intervalle :.....	31
2.3.2.1	L'avantage de l'intervalle training : .....	32
2.3.3	Méthode circulaire ou circuit training : .....	32
2.3.4	Méthode de compétition : .....	33
<b>2.4</b>	<b>Les Différentes filières Les énergétiques :.....</b>	<b>34</b>
2.4.1	La filière anaérobie alactique : .....	34
2.4.2	La filière anaérobie lactique : .....	34
2.4.3	La filière aérobie :.....	34
<b>1</b>	<b>CAPACITE A REPETER DES SPRINTS .....</b>	<b>36</b>
<b>1.1</b>	<b>Définition.....</b>	<b>36</b>
<b>1.2</b>	<b>Évaluation de la capacité à répéter des sprints et son impact sur la performance globale.....</b>	<b>37</b>
<b>1.3</b>	<b>Facteurs restreignant la capacité de répéter des sprints .....</b>	<b>39</b>
1.3.1	L'excitabilité musculaire dans la répétition des sprints .....	40
1.3.2	Filières énergétiques et disponibilité des substrats.....	40
1.3.3	Accumulation de métabolites .....	42
<b>1.4</b>	<b>L'entraînement de la capacité à répéter des sprints .....</b>	<b>42</b>
1.4.1	L'entraînement en sprint isolé : .....	42
1.4.2	L'entraînement intermittent en sprints avec récupération complète : .....	42
1.4.3	L'entraînement à base de répétition de sprints de courte durée : .....	43
1.4.4	L'entraînement intermittent de longue durée .....	43
1.4.5	L'entraînement sous forme de jeux réduits : .....	43

<b>2</b>	<b>ENTRAINEMENT EN HYPOXIE .....</b>	<b>44</b>
<b>2.1</b>	<b>L'utilisation de l'hypoxie pour améliorer la capacité aérobie.....</b>	<b>45</b>
2.1.1	Les sources de l'hypoxie .....	45
2.1.2	Les méthodes d'entraînement en hypoxie .....	46
<b>2.2</b>	<b>Optimisation de la RSA par l'exposition à l'hypoxie .....</b>	<b>48</b>
2.2.1	Les sources du RSH (Répétition de Sprints en Hypoxie).....	48
2.2.2	Impacts physiologiques sur la performance .....	51
2.2.3	Hypoventilation et répétitions de sprints .....	53
2.2.3.1	Historique de L'hypoventilation .....	53
2.2.3.2	Les stratégies d'hypoventilation volontaire .....	53
2.2.3.3	Les réponses physiologiques de l'exercice en VHL .....	54
2.2.3.4	Effets de l'entraînement en RSH-VHL sur la performance.....	55
2.2.3.5	Effets physiologiques de l'entraînement en RSH-VHL.....	56
<b>1</b>	<b>OBJECTIFS DE LA RECHERCHE : .....</b>	<b>59</b>
<b>2</b>	<b>IMPORTANCE DE LA RECHERCHE : .....</b>	<b>59</b>
<b>3</b>	<b>TACHES DE LA RECHERCHE :.....</b>	<b>60</b>
<b>4</b>	<b>ÉCHANTILLON DE LA RECHERCHE : .....</b>	<b>61</b>
<b>5</b>	<b>OUTILS ET MOYENS DE RECHERCHE UTILISES : .....</b>	<b>61</b>
<b>5.1</b>	<b>Analyse bibliographique :.....</b>	<b>61</b>
<b>5.2</b>	<b>Méthode expérimentale : .....</b>	<b>62</b>
<b>5.3</b>	<b>Méthode descriptive :.....</b>	<b>62</b>
<b>5.4</b>	<b>Démarche pratique : .....</b>	<b>62</b>
<b>5.5</b>	<b>Le test de terrain : .....</b>	<b>63</b>
5.5.1	Test de RAST: .....	63
5.5.1.1	Protocole : .....	63
5.5.1.2	Mesure des performances:.....	64
5.5.2	Le RPE (Rating of Perceived Exertion) .....	64
<b>5.6</b>	<b>Le protocole d'entraînement: .....</b>	<b>65</b>
5.6.1	Matériels utilisé pendant l'entraînement : .....	65
<b>5.7</b>	<b>Méthode statistique : .....</b>	<b>66</b>

<b>1</b>	<b>VALEURS PRE-TEST ET POST-TEST : .....</b>	<b>69</b>
	<b>Groupe témoin .....</b>	<b>69</b>
	Commentaire : .....	72
	<b>Groupe expérimental .....</b>	<b>75</b>
	Commentaire : .....	78
	Commentaire : .....	81
<b>2</b>	<b>DISCUSSION GENERALE DES RESULTATS :.....</b>	<b>84</b>

**Conclusion**

**Limites et perspectives**

**Bibliographie**

---

## Liste des abréviations :

[HHb] : Concentration de désoxyhémoglobine

[K<sup>+</sup>] : Concentration d'ions potassium

[Lac<sup>-</sup>] : Concentration d'ions lactates

[Na<sup>+</sup>] : Concentration d'ions sodium

[tHb] : Concentration totale d'hémoglobine

ATP : Adénosine triphosphate

ADN : Acide Désoxyribonucléique

CO<sub>2</sub> : dioxyde de carbone

CP : Créatine phosphate

FC : Fréquence cardiaque

FI : Indice de fatigue (fatigue index)

H<sup>+</sup> : Ions hydrogène

HbO<sub>2</sub> : Oxyhémoglobine

HHb : Désoxyhémoglobine

HV : hyperventilation

K<sup>+</sup> : Ions potassium

Lac<sup>-</sup> : Ions lactates

LHTH : live high train high

LHTL : live high train low

LLTH : live low train high

LHTLH : live high train low and high

MCT : Transporteur de monocarboxylate musculaire

Na<sup>+</sup> : Ions sodium

N.S : Non significative

PAO<sub>2</sub> : pression alvéolaire en oxygène

PCO<sub>2</sub> : Pression partielle de CO<sub>2</sub>

PCr : Phosphocréatine

pH : Potentiel hydrogène

Pi : Phosphate inorganique

P<sub>max</sub> : Puissance maximale

P<sub>moy</sub> : Puissance moyenne

P<sub>min</sub> : Puissance minimale

PO<sub>2</sub> : Pression partielle d'O<sub>2</sub>

Rép : Répétitions

RPE : Échelle de perception de l'effort (rating of perceived exertion)

RS : Sprints répétés (repeated sprints)

---

**RAST** : *Running Anaerobic-based Sprint*

**RSA** : *la capacité à répéter des sprint (repeated-sprints ability)*

**RSN** : *répétition de sprints en normoxie*

**RSH** : *répétition de sprints en hypoxie*

**Sa O<sub>2</sub>** : *saturation en oxygène artérielle*

**SMD** : *la différence moyenne standardisée*

**T cal** : *t calculé*

**T tab** : *t tabulé*

**T.M** : *test maximale*

**VHL** ; *hypoventilation à bas volume pulmonaire*

**VO<sub>2</sub> max** : *volume de la consommation maximale d'oxygène*

**VMA** : *vitesse maximale aérobie*

**VE** : *ventilation*

**VO<sub>2</sub>** : *volume d'oxygène*

---

## Liste des tableaux :

Tableau 1: Les attitudes mentales qui influent sur la performance en football. (GREBOT 2006) .....	14
Tableau 2: Distance totale parcourue aux différentes allures, selon le poste occupé et le niveau , (Verheijen,1998).....	16
Tableau 3: Distance totale parcourue aux différentes allures et selon le niveau de jeu, (Bangsbo, 1994a). .....	17
Tableau 4: Effets des différentes études réalisées sur l'entraînement par répétitions de .....	49
Tableau 5: caractéristiques de l'échantillon. ....	61
Tableau 6: recueil de valeurs pré test pour le groupe témoin. ....	69
Tableau 7: recueil des valeurs du post test RAST pour le groupe témoin.....	70
Tableau 8: Les performances enregistrées lors du pré et post test RAST pour le groupe témoin. ....	71
Tableau 9: Les valeurs de la perception d'efforts RPE enregistrées après le pré et post test RAST pour le groupe témoin.....	71
Tableau 10: Analyse statistique des performances moyennes enregistrées Lors du pré et post test RAST du groupe témoin.....	72
Tableau 11: recueil de valeurs pré test RAST pour le groupe expérimental. ....	75
Tableau 12: recueil des valeurs du post test RAST pour le groupe expérimental. ....	76
Tableau 13: Les performances enregistrées lors du pré et post test RAST pour le groupe expérimental. ....	77
Tableau 14: Les valeurs de la perception d'efforts RPE enregistrées après le pré et post test RAST pour le groupe témoin.....	77
Tableau 15: Analyse statistique des performances moyennes enregistrées Lors du pré et post test RST du groupe expérimental. ....	78
Tableau 16: Analyse statistique des performances moyennes du groupe témoin et expérimental après six semaines d'entraînements. ....	81

## Listes des figures :

Figure 1: corrélation entre les facteurs de qualités physiques (Weineck, 1992). .....	22
Figure 2: corrélation entre les trois formes principales de force (Weineck, 1992). .....	23
Figure 3: Évolution des puissances moyennes au cours des 10 sprints du test RSA de type boucle fermée. Le protocole de test était de 10 sprints de 6-s sur ergocycle avec 30-s de récupération passive entre les répétitions (Mendez-Villanueva, Hamer, et Bishop 2008). .....	39
Figure 4: Méthodes d'entraînement contribuant à l'amélioration de la performance de la RSA. ....	44
Figure 5: Mécanismes physiologiques induits par l'hypoxie et amenant à une diminution de l'apport en O <sub>2</sub> aux différents tissus de l'organisme. (Millet et al., 2015). .....	46
Figure 6: Panorama des différentes méthodes d'entraînement en altitude/hypoxie pour .....	47
Figure 7: Graphique en forêt de la différence moyenne standardisée (SMD) entre l'effet de .....	49
Figure 8: Figure 6 : Mécanismes physiologiques sous-jacents à l'efficacité du RSH. D'après (Brecht, 2018; Millet et al., 2015) .....	52
Figure 9: Techniques d'hypoventilation volontaire. ....	54
Figure 10: démarche pratique de notre étude. ....	62
Figure 11: Mise en place du test RAST .....	64
Figure 12: Histogramme démontrant la différence enregistrée entre le pré et post test RAST des sprints moyens (Smoy) de chaque sujet du groupe Témoin .....	74
Figure 13: Histogramme du pré et post test RAST démontrant la progression du groupe témoin en sprint moyen .....	74
Figure 14 : Courbes démontrant la progression du groupe témoin en RSA après un entraînement spécifique de six semaines .....	75
Figure 15: Histogramme démontrant la différence enregistrée entre le pré et post test RAST des sprints moyens (Smoy) de chaque sujet du groupe Témoin .....	79
Figure 16: Histogramme du pré et post test RAST démontrant la progression du groupe expérimental en terme de RSA après un protocole d'entraînement en hypoventilation volontaire (VHL) de six semaines. ....	80
Figure 17: Histogramme de la moyenne générale des sprints (Smoy) de chaque groupe au pré et post test RAST, démontrant l'impact de la méthode d'entraînement suivi sur la performance de RSA .....	83
Figure 18: Courbes démontrant la différence entre les deux groupes en terme de RSA après un mésocycle de compétition de six semaines. ....	83

# **Introduction générale**

# Introduction générale

---

## Introduction générale

Le football est un sport d'équipe qui exige des qualités physiques, habilités techniques et une maîtrise tactique inégalée pour atteindre l'excellence sur le terrain. Sur le plan physique, les joueurs doivent effectuer de nombreuses actions intermittentes intenses tout au long des 90 minutes de jeu, entrecoupées de périodes de marche ou de course moins intenses de quelques secondes à quelques minutes, permettant ainsi une certaine récupération.

Au cours d'un match de football, il est nécessaire de répéter rapidement des actions sans diminution de la vitesse. Les joueurs doivent donc être capables de réaliser ces actions explosives à plusieurs reprises, avec des temps de récupération semi-active d'environ 20 à 40 secondes. Selon Gilles Cometti dans "La préparation physique en football - Chiron", les efforts explosifs représentent environ 5 % de tous les efforts fournis au cours d'un match, et la plupart de ces efforts explosifs durent moins de 7 secondes (sprints, sauts, enchaînements suivis de frappes, etc.). Bien que le nombre de mouvements explosifs soit faible par rapport à l'ensemble du match, c'est lors de ces actions que l'efficacité et la différence entre les joueurs de différents niveaux se manifestent.

Dans la quête incessante d'optimisation de l'entraînement, les scientifiques du sport et préparateurs physiques ont recours à des stratégies variées afin d'augmenter le stress imposé aux athlètes lors des séances d'entraînement. Par exemple, les entraînements par intervalles de haute intensité, les aides nutritionnelles et les environnements extrêmes sont autant de possibilités devenues très populaires. Au cours de la dernière décennie, toutefois, l'utilisation d'un stress hypoxique (i.e. un environnement appauvri en oxygène) a fait l'objet d'un grand nombre d'études scientifiques expérimentales et a montré un fort potentiel d'amélioration de la RSA comparativement à un entraînement similaire réalisé en normoxie (Billaut et al., 2012; Brocherie et al., 2017).

Pour améliorer la condition physique des joueurs et retarder l'apparition de la fatigue neuromusculaire, les programmes d'entraînements visent à améliorer, entre autres, la capacité à répéter des sprints (Repeated-Sprints Ability, RSA). Toutefois, l'organisation d'un camp d'entraînement en altitude et/ou l'utilisation d'appareils hypoxiques demande beaucoup de logistique et d'équipement, ce qui peut limiter la faisabilité et l'engouement pour cette modalité d'entraînement. Des chercheurs se sont alors intéressés à d'autres moyens d'induire un stress hypoxique. Dans ce contexte, l'entraînement en hypoventilation volontaire (VHL) émerge comme une approche novatrice visant à améliorer cette capacité spécifique.

# Introduction générale

---

Cette étude se penche sur l'impact de l'entraînement en hypoventilation volontaire sur la capacité à répéter des sprints chez les joueurs de football séniors. Notre échantillon de cette étude est constitué de deux groupes distincts : un groupe expérimental (IRBBH) soumis à l'entraînement en hypoventilation volontaire et un groupe témoin (RCS) s'entraînant dans des conditions de respiration normale (en normoxie). Les deux groupes ont été soumis au même test, le Running Anaerobic-based Sprint Test (RAST), afin d'évaluer leur capacité à répéter des sprints.

Ce mémoire est structuré en deux grandes parties. La première partie est consacrée au cadre théorique et se divise en deux chapitres. Le premier chapitre met en lumière les particularités du football en termes d'exigences, de caractéristiques, et des qualités physiques nécessaires. Il aborde également les objectifs de l'entraînement en football et les filières énergétiques sollicitées dans ce sport. Le deuxième chapitre se concentre spécifiquement sur la capacité à répéter des sprints, en explorant ses facteurs limitants, les méthodes d'évaluation, les sources d'énergie impliquées, ainsi que les différentes approches d'entraînement, y compris l'entraînement en hypoxie. Une attention particulière est accordée à l'optimisation de la récupération de la capacité à répéter des sprints par l'exposition à l'hypoxie, et finalement, à l'entraînement de cette capacité en utilisant l'hypoventilation volontaire (VHL).

La deuxième partie de ce travail se concentre sur le cadre pratique de la recherche et est structurée en deux chapitres. Le premier chapitre aborde le cadre méthodologique de l'étude, détaillant les objectifs spécifiques, les tâches entreprises, ainsi que les ressources humaines et matérielles mobilisées. Une attention particulière est accordée aux méthodes d'analyse utilisées, qui ont permis de faciliter l'atteinte des objectifs fixés.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation et à la discussion des résultats obtenus. Les performances des deux groupes, à savoir le groupe expérimental soumis à l'entraînement en hypoventilation volontaire (IRBBH) et le groupe témoin s'entraînant dans des conditions normales de respiration (RCS), sont exposées et comparées de manière approfondie. Les données recueillies sont analysées et interprétées avec rigueur, mettant en évidence les différences significatives entre les deux groupes. Cette discussion permet de tirer des conclusions éclairées et d'apporter des éléments de réponse aux questions de recherche soulevées.

L'ensemble de cette démarche méthodologique et analytique a permis de générer des résultats pertinents et fiables, contribuant ainsi à une meilleure compréhension de l'impact de

## Introduction générale

---

l'entraînement en hypoventilation volontaire sur la capacité à répéter des sprints chez les joueurs de football séniors.

Les résultats obtenus et les discussions qui en découlent offrent des perspectives intéressantes pour optimiser la performance des joueurs sur le terrain. Ces avancées ouvrent également de nouvelles pistes de recherche dans le domaine de l'entraînement en hypoventilation volontaire et de ses effets sur les capacités physiques des athlètes.

# **Problématique**

## 1 Problématique :

Le football est un sport dynamique et exigeant qui sollicite à la fois les capacités aérobies et anaérobies des joueurs. La capacité à répéter des sprints de haute intensité tout au long du match est cruciale pour maintenir un niveau de performance élevé. Dans le cadre de l'entraînement spécifique au football, différentes méthodes ont été développées pour améliorer cette capacité, parmi ces méthodes, l'entraînement en hypoventilation volontaire émerge comme une approche innovante et prometteuse. Cette méthode consiste à restreindre volontairement la quantité d'air qui atteint les poumons pendant l'exercice, ce qui peut potentiellement engendrer des adaptations physiologiques bénéfiques pour la performance, permettant une meilleure réoxygénation musculaire, et une amélioration de la glycolyse anaérobie (Trincatet al., 2017).

Cette méthode a été l'objet de plusieurs études, telle que celles réalisées par Woorons et ses collaborateurs sur les effets d'un entraînement de 4 semaines avec hypoventilation volontaire réalisé à de faibles volumes pulmonaires (2008), l'entraînement en hypoxie au niveau de la mer grâce à l'hypoventilation volontaire chez les nageurs (2014), et les effets aigus de répétitions de sprints cyclistes en hypoxie induite par l'hypoventilation volontaire (2017).

La préparation physique en altitude rencontre un manque d'engouement, dû aux difficultés d'organisation d'un camp d'entraînement en altitude ou l'utilisation d'appareils hypoxiques qui demandent beaucoup de logistique, d'équipement et d'argent. Cependant, l'utilisation de la méthode d'entraînement en hypoventilation qui a démontré par le passé des avantages notables à travers les performances de plusieurs champions en général, et les exploits de ZATOPEK en particulier (spécialiste de course de fonds dans les années 1950, avec 5 médailles olympiques, et 4 médailles continentales, il a également battu 18 records du monde sur des distances variées, en pratiquant un entraînement en hypoventilation), peut-elle se substituer à l'entraînement en altitude beaucoup plus onéreux ?

## Problématique

---

ce qui nous emmène aujourd'hui à faire cette étude dans le but de démontrer l'efficacité et la validité de cette méthode dans l'amélioration de la condition physique en général et de certaines capacités physiques et physiologique en se posant la question suivante :

*- Existe-t-il un impact de l'entraînement en hypoventilation volontaire sur la capacité à répéter des sprints chez les footballeurs?*

### **Hypothèses:**

- En repoussant la fatigue musculaire et en améliorant la capacité de récupération, la perception de l'effort et la puissance musculaire, un programme d'entraînement en hypoventilation volontaire impacte positivement la capacité à répéter des sprints.

# Définition des concepts

---

## 1.1 Définition des concepts clés :

- **Football :** Le football est un sport collectif qui se joue avec un ballon sphérique sur un terrain rectangulaire. Le but du jeu est de marquer des buts en faisant passer le ballon dans le but adverse, tout en empêchant l'équipe adverse de marquer.

- **Entraînement:** L'entraînement sportif est l'ensemble des méthodes et exercices physiques visant l'entretien et l'amélioration des performances sportives, chez le sportif amateur ou professionnel ; cet entraînement comprend notamment la préparation physique, technique, tactique et mentale.

- **Capacité et puissance:** Chaque filière énergétique peut être caractérisée par un Capacité qui permet une durée de fonctionnement (indépendante du débit) : plus l'exercice est puissant, moins longue est la durée de fonctionnement et inversement.

La capacité: c'est la quantité totale (contenance) d'énergie disponible dans le réservoir.  
La puissance: c'est la quantité maximale d'énergie utilisable par unité de temps (débit du robinet).

- **La capacité à répéter des sprints (RSA):** Elle se définit par la capacité à répéter de brèves périodes d'effort à intensité maximale ou quasi maximale séparées par de courtes périodes de récupérations souvent passives ou à basse intensité (i.e. marche ou course). La durée des intervalles à haute intensité est souvent inférieure à 10 secondes et les périodes de récupération sont d'une durée inférieure à 60 secondes. Ces intervalles d'effort sont répétés sur des périodes allant d'une heure à quatre heures et exceptionnellement jusqu'à 10 heures lors de parties de tennis (Girard et al., 2011). De plus, les sprints répétés sont souvent combinés à de nombreux changements de direction et à un grand éventail de mouvements variés faits à haute intensité (e.g. sauts, déplacements latéraux).

- **L'entraînement en hypoventilation volontaire (VHL):** consiste à alterner des périodes d'effort avec une réduction volontaire de la fréquence respiratoire et des périodes d'effort en respiration normale. Cette technique a pour but d'effectuer des blocages respiratoires de quelques secondes qui vont engendrer une hypoxémie (diminution de la quantité d'oxygène dans le sang) ainsi qu'une hypercapnie (augmentation de la quantité de dioxyde de carbone) et par conséquent une acidification du sang. Dans le cas d'un entraînement de ce type, l'hypoventilation est produite par une réduction volontaire de la fréquence respiratoire.

## Définition des concepts

---

- **NORMOXIE:** c'est l'état du corps pour lequel le dioxygène en concentration normale dans le sang permet une activité normale.
- **HYPOXY:** c'est l'insuffisance des apports en oxygène aux besoins tissulaires, donc, c'est la diminution de la quantité d'oxygène apportée par le sang aux tissus.

# Partie théorique

# **Chapitre 1 : Le Football**

## 1 Football

### 1.1 Définition et historique du football

Le football est un sport collectif qui se joue avec un ballon sphérique sur un terrain rectangulaire. Le but du jeu est de marquer des buts en faisant passer le ballon dans le but adverse, tout en empêchant l'équipe adverse de marquer. Le football est l'un des sports les plus populaires dans le monde entier et est pratiqué à tous les niveaux, du niveau amateur au niveau professionnel. Il est également connu sous le nom de soccer dans certains pays.

Le Football est le jeu le plus populaire au monde, il possède le Statut de numéro un dans la majorité des pays. Certains continents comme l'Europe, l'Amérique de sud et l'Afrique sont presque entièrement dominés par cette discipline qui connaît une évolution croissante sur les plans techniques, tactique, physique, psychologique et mental (Vigne.G, 2011) et (Williams.A, 2000).

Le football moderne a été inventé en Angleterre au 19e siècle, mais le jeu de ballon a des origines bien plus anciennes. Le jeu de kemari issu d'un sport chinois puis popularisé au Japon au 7e siècle serait le véritable ancêtre du football. Il s'agissait d'un jeu de jongle avec la jambe droite, qui consistait à maintenir le ballon en l'air le plus longtemps possible sans le faire tomber. Le football tirerait aussi ses origines de la soule, un jeu du Moyen-âge qui se pratiquait autant avec les pieds qu'avec les mains, et qui aurait également inspiré le handball et le rugby.

Le jeu de ballon était pratiqué en Angleterre comme partout ailleurs, mais avec des règles très variables selon les écoles et les régions. Dès 1843, l'Université de Cambridge propose une tentative de normalisation et de codification des règles du jeu. Les « règles de Cambridge » de 1848 constituent le premier règlement officiel du football.

La date de naissance officielle du football est donc 1848, bien que les règles édictées ne furent pas tout de suite appliquées dans toute l'Angleterre. C'est en 1863 qu'un groupe de 11 écoles et clubs de Londres adoptent un règlement commun, et en 1877 que la Football Association fraîchement créée convient d'un code uniforme respecté par les 43 clubs du pays.

Le premier match officiel de football s'est par ailleurs déroulé en 1860 et il opposait le Sheffield FC au Hallam FC (deux villes de Sheffield, au nord de l'Angleterre). C'est en 1866

# Chapitre 1 : le football

---

que la durée d'un match de football est fixée à 90 minutes, et en 1870 que la règle des deux équipes de onze joueurs sur le terrain est définitivement adoptée.

Le football s'est ensuite rapidement internationalisé, notamment sous l'influence d'immigrants britanniques en Amérique du Sud, par la création de fédérations et d'associations au Brésil, en Argentine, en France et en Hollande.

## 1.2 Exigences du football moderne

L'évolution des caractéristiques de la compétition en football au cours des quinze dernières années a entraîné de profondes révisions, parfois radicales, des conceptions de certains aspects de l'entraînement et de la formation du joueur. Actuellement, les contenus d'entraînement s'appuient de plus en plus sur les exigences imposées par le match et sur le niveau des capacités du joueur (Cazorla et Ferhi, 1998, p.1). En effet, se fondant dans la dialectique de confrontation (Grehaine, J. 1994), le football moderne propose des rôles complexes et impose une participation agissante à toutes les actions de jeu (marquage, démarquage, harcèlement, couverture, récupération et conservation du ballon, appui et soutien). La réalisation de ces actions à différents rythmes et l'adaptation aux efforts qu'impliquent ; dribble, tirs, passes et duels, indiquent qu'une préparation multiforme et spécifique au football est indispensable, pour répondre aux exigences de l'activité motrice des footballeurs. Selon les études menées sur ce plan par (Cazorla, G. et Farhi, A. (1998) Morosov, A. 1974).

Aujourd'hui, Le football moderne est devenu de plus en plus exigeant en termes de tactique, technique, mental, et de condition physique.

### 1.2.1 Exigences techniques

La technique est la base pour atteindre de bons résultats en football. La mission tactique au sein de l'équipe ne pourrait être remplie d'une manière satisfaisante que si les joueurs présentent les aptitudes techniques nécessaires. Selon (F.GIL, 2007) une réalisation efficace des actions technico-tactiques, il faut obligatoirement une mesure technique;

- Capacité d'exécuter et reproduire des schémas moteurs et des gestes de football en référence à des principes consolidés d'ergonomie et de mécanique du mouvement (modèle technique fondamental).
- Automatisation d'adresses techniques spécifiques (de type ouverte, c'est-à-dire apte à s'adapter à la situation).

## Chapitre 1 : le football

---

- Efficacité des fonctions neuromusculaires (régulation de l'activité en relation à l'objectif, précision) et des capacités de coordination.
- Maintenir un control technique proportionné dans les conditions de complexité de coordination (demande de rapidité, perte partielle d'équilibre, etc..) et de fatigue physique;
- Exécuter des solutions techniques personnelles et créatrices.

La technique et la tactique sont complètement fusionnées et combinées au cours du jeu, lors d'une action technico-tactique. Un joueur qui maîtrise parfaitement le ballon peut se consacrer pleinement et entièrement à l'aspect tactique du jeu de son équipe sans qu'il soit gêné par l'aspect technique.

Une bonne maîtrise technique permet au joueur, au cours d'une situation de jeu de faire des conversions de sa propre action technique (contrôle orienté du ballon) en tenant compte de la façon dont l'environnement évolue. Le football moderne se caractérise par une vitesse de jeu, un rythme et une intensité élevée, ce qui est illustré par le nombre de touche de balle moyen effectué par possession de balle (1,7 – 2,2 tdb) et une durée totale de possession dépassant rarement 1min ou 1,30 min, ainsi que le pourcentage des passes réussies entre 75 et 81%. La notion de duel est également centrale en football, (Dellal et al, 2011, cité par DELLAL, 2013, p.6).

D'après Yves Calvin & Jocelyn Waty;

- La technique s'affirme toujours plus comme un élément déterminant du succès.
- La qualité et la vérité technique du joueur.
- Plus de duels, plus de vitesse et moins d'espace exigent une technique en mouvement Appropriée et aux facettes multiples.
- Capacité à évoluer dans de petits espaces sans perdre la balle.
- Volonté de réaliser des gestes difficiles dans les zones offensives orientés vers l'avant avec un souci d'efficacité.
- Prises de balle, conservation, protection du ballon malgré l'opposition.
- Force, vitesse et précision de la première passe pour déclencher l'action offensive.
- Eliminer l'adversaire en un contre un.
- Jeu long en diagonale pour trouver un partenaire démarqué ou porter le danger rapidement devant le but adverse.

# Chapitre 1 : le football

---

- La technique défensive s'est améliorée afin d'éviter les fautes (moins de tacles).

Pour conclure, une bonne maîtrise technique, permet au joueur de se démarquer des autres, en réalisant des gestes clés dans le match.

## **1.2.2 Exigences tactiques**

Une équipe forte sur le plan tactique, c'est celle qui a la capacité de résoudre les problèmes de jeu plus efficacement et plus rapidement que l'adversaire. ce qui nécessite d'avoir des joueurs doter d'une grande capacité d'analyse, capables à prendre des décisions avant d'agir, et trouver la solution la mieux adaptée à la situation de jeu.

Pour répondre à ces exigences tactiques, le joueur doit posséder une bonne rapidité mentale, avec une bonne rapidité physique et une grande maîtrise technique.

## **1.2.3 Exigences mentales**

Le football psychologiquement, est un sport exige tant du point de vue intellectuel qu'affectif. Il exige entre autres un traitement rapide et efficace de l'information, une motivation constante, une capacité d'intégration dans un groupe. La préparation à la compétition nécessite de prendre en compte l'ensemble des composantes psychologiques requises pour l'engagement compétitif.

La force du mental est l'un des composantes de la performance exigé par le football moderne, tout Comme les autres exigences (technique, tactique, athlétique), d'après (GREBOT, 2006) voici une liste des attitudes mentales qui influent sur la performance en football (tableau 1).

# Chapitre 1 : le football

**Tableau 1:** Les attitudes mentales qui influent sur la performance en football. (GREBOT 2006)

<p><b>Concentration, attention, rigueur</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– L’art de traiter la bonne information au bon moment</li> <li>– Focaliser son attention et la maintenir</li> <li>– Pouvoir rester concentré longtemps</li> <li>– Ne pas faire de fautes techniques grossières</li> </ul>	<p><b>Le contrôle de soi</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Résistance aux provocations</li> <li>– Maîtrise personnelle dans les moments difficiles</li> <li>– Capacité à réagir en fonction de l’évolution du score</li> <li>– Solidité psychique</li> </ul>	<p><b>Confiance en soi</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Se sentir capable de “déplacer une montagne”</li> <li>– Lucidité</li> <li>– Conscience de sa propre valeur</li> <li>– Bonne estime de soi</li> </ul>
<p><b>Résistance au stress</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– S’adapter aux circonstances</li> <li>– Jouer à son meilleur niveau lors de match à gros enjeu</li> <li>– Maîtriser les peurs, gérer les émotions</li> </ul>	<p><b>Agressivité</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Aptitude au duel, virilité</li> <li>– Volonté de s’imposer Physiquement, engagement physique</li> <li>– Esprit de compétition</li> <li>– Cran, courage</li> </ul>	<p><b>Prise de risques</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Imagination, créativité, spontanéité</li> <li>– Capacité à débloquer des situations difficiles</li> <li>– Oser tenter des “choses”</li> </ul>
<p><b>Endurance psychologique</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Capacité à répéter des efforts, constance dans l’effort</li> <li>– Détermination, obstination, volonté</li> <li>– Persévérance malgré les échecs</li> <li>– Résistance à la fatigue</li> </ul>	<p><b>Compétitivité</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Capacité de surpassement, combativité</li> <li>– Volonté de prendre le dessus sur son adversaire direct</li> <li>– Volonté de gagner</li> <li>– Passion de la compétition</li> <li>– Goût du combat</li> </ul>	<p><b>Jouer pour l’équipe</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Refus des attitudes individualistes</li> <li>– Sens de l’abnégation</li> <li>– Primauté permanente du collectif</li> <li>– Coopération, solidarité</li> <li>– Communication</li> </ul>
<p><b>Motivation élevée, accomplissement personnel</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Volonté de réussir, de faire des sacrifices</li> <li>– Passion du football</li> <li>– Accord entre ses possibilités et ses performances</li> </ul>		<p><b>Chercher à progresser</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Vouloir apprendre</li> <li>– Se remettre en question</li> <li>– Travailler ses points faibles</li> <li>– Ne pas se satisfaire de l’acquis</li> <li>– Aller au bout de ses possibilités</li> </ul>

## 1.2.4 Exigences physique

Les joueurs de football modernes doivent être en excellente condition physique pour pouvoir jouer à un rythme élevé pendant 90 minutes. car le football est un sport de répétitions d’efforts brefs et intenses, où la distance totale parcourue, généralement comprise entre 9 à 12 kilomètres par match, ainsi que l’intensité des déplacements, peuvent varier en fonction de nombreux paramètres comme le poste de jeu (Carling, 2012), ainsi que le système de jeu mis en place soit l’orientation tactique (Vigne, 2011).

# Chapitre 1 : le football

---

Les analyses de l'activité physique en football ont montré que celle-ci requière de manière principale de l'endurance aérobie, mais aussi de manière indépendante et en interaction, de la force, de la vitesse, de la puissance, de la coordination, de l'agilité, de la mobilité articulaire et musculaire. (Dellal, 2008, Vigne, 2011). En d'autres termes, des efforts brefs et intenses avec des changements de directions sur un fond aérobie.

De plus, combiné à ces efforts, le joueur doit être en capacité d'enchaîner des actions comme des sauts, des réceptions, des accélérations, des décélérations, des changements de directions à 360° (Vigne, 2011), (Warren et coll., 2001) qui vont impacter sur l'orientation du travail physique. Ces répétitions d'efforts sont dépendantes des qualités de force et de vitesse des membres inférieurs.

De façon générale, l'analyse a permis de constater que, les joueurs de football moderne doivent être rapides, agiles, endurants et avoir une bonne résistance à la fatigue. Enfin une coordination générale et spécifique est nécessaire pour s'adapter aux multiples changements de motricité et de déplacements, en plus de la maîtrise du jeu et du ballon (Cometti Gilles, 1998, p. 1).

## **1.3 Caractéristiques de l'effort en football**

Le football est un sport intermittent où de courtes périodes de grande intensité sont entrecoupées au hasard par de plus longues périodes de récupération soit actives (marche), soit passives (immobilité). La durée de chaque sprint dépasse rarement cinq secondes avec en plus de la phase d'accélération une phase de décélération brutale avec changement de direction (Mombaerts, 1991).

Un joueur effectue entre 825 et 1632 déplacements par match (Bangsbo, 1994b). D'après (Bangsbo, 1994a) et (Verheijen, 1998), Ce sont des déplacements de type courses à différentes intensités, des déplacements latéraux, des sauts, des tacles, des courses arrières et autres (tableau 2 et 3).

# Chapitre 1 : le football

**Tableau 2:** Distance totale parcourue aux différentes allures, selon le poste occupé et le niveau , (Verheijen,1998).

	INTERNATIONAL JUNIORA			PROFESSIONNEL					
	DEFENSEURS	MILIEUX	ATTAQUANTS	DEFENSEURS		MILIEUX		ATTAQUANTS	
				Central	latéral	défensif	offensif		
MARCHE	3km	1,9km	4,6km	4,2km	2,8km	2,4km	2,2km	4,4km	2,2km
TROT	2,5km	5,9km	2,2km	2,7km	4,2km	9,4km	6,8km	2,1km	5,0km
COURSE	1,2km	1,2km	1,0km	0,5km	1,3km	0,6km	2,6km	1,3km	0,6km
SPRINT	0,9km	0,8km	1,4km	0,5km	0,6km	0,6km	0,6km	0,9km	

## Chapitre 1 : le football

---

**Tableau 3:** Distance totale parcourue aux différentes allures et selon le niveau de jeu, (Bangsbo, 1994a).

	<b>International Danois</b>	<b>1ère ligue Anglaise</b>
<b>ARRET</b>	7'	
<b>MARCHE</b>	3,4k m	3,2k m
<b>TROT</b>	2,2k m	2,4k m
<b>COURSELEN TE</b>	3,2k m	3,1k m
<b>COURSEMO YENNE</b>	1,3k m	1,2k m
<b>COURSERAP IDE</b>	0,6k m	0,7k m
<b>SPRINT MAX</b>	0,4k m	0,3k m
<b>MARCHEAR RIERE</b>	0,4k m	0,35 km

Selon (Mombaerts, 1991), un match de football d'élite c'est 10 à 14 km en fonction des postes, du type d'animation et des systèmes de jeu. Sur 90 minutes de jeu on compte environ 60 minutes de jeu effectif. Sur ces 60 minutes on compte en moyenne 3km de marche et 7km de course avec environ 62% de course lente aérobie, 24% de course à allure moyenne aérobie (10 à 17km/h) et 14% de course à haute intensité (18 à 30km/h) qui bascule souvent un match.

- La majorité des demandes énergétiques pendant les périodes de faibles activités (marche et course) et de récupération des périodes intensives sont couvertes par la production d'énergie aérobie.

# Chapitre 1 : le football

---

- La majorité des demandes d'énergie pendant les périodes d'activité physique intense (course rapide, sprint, demi-tour, saut et shoot) sont couvertes par la filière anaérobie (alactique et lactique).
- Le nombre de sprint courts (10 à 15m) a augmenté, ainsi que les actions technico-tactiques à intensité élevée et sur des espaces réduits qui sont passés de 88 en 1980 à 119 aujourd'hui. Le nombre de duels est en constante augmentation.

Selon (G. Cazorla et Ferhi, 1998), à propos des Actions du match et évaluation des métabolismes sollicités;

- Métabolisme à priorité anaérobie alactique : 14,9% sprint + actions intenses et courtes souvent déterminantes.
- Métabolisme à priorité mixte : 14,3% course intense (aérobie et anaérobie lactique).
- Métabolisme à priorité aérobie : 70,8% marche + course lente.
- L'énergie fournie en cours de matchs proviendrait de deux sources principales :
- Le catabolisme des phosphagènes (ATP – PCr).
- La glycolyse aérobie largement alimentée lors d'exercices intermittents courts par les réserves en oxygène de l'organisme.
- Et une source secondaire ; la glycolyse lactique dont l'utilisation dépend de l'intensité de jeu imposée par l'adversaire.
- Une des conséquences est que l'entraînement « systématique » en glycolyse lactique ne s'impose pas comme une priorité en football.
- Les distances les plus longues sont parcourues par les milieux de terrain et les arrières latéraux, alors que les arrières centraux parcourent les distances les plus courtes ; les attaquants se situent entre ces deux extrémités.

Pour conclure, Le joueur moderne doit posséder une grande vitesse gestuelle et de déplacement, une vitesse d'exécution importante associée à une grande maîtrise, technique, de la puissance musculaire et une grande capacité de récupération qui lui permettent de reproduire des actions brèves et intenses à de nombreuses reprises (F. Lambertin, 2000).

## **1.4 Généralités sur un match de haut niveau selon le poste occupé :**

Pendant une rencontre en football, on remarque que les distances parcourues sont relativement élevées et comprises entre dix et douze kilomètres en moyenne (Di Salvo et coll, 2007). Ces résultats ont d'ailleurs été retrouvés dans d'autres études telles que celle de (Rampinini et coll,

# Chapitre 1 : le football

---

2007a), ceci sans tenir compte des différentes intensités de courses. Certains joueurs peuvent parcourir des distances bien plus grandes allant parfois jusqu'à quatorze kilomètres par match. De plus, il existe des différences entre les postes. En effet, les défenseurs centraux sont ceux qui couvrent la distance la moins importante (10 627 m) par rapport aux autres postes. Les milieux axiaux sont en revanche ceux qui parcourent la plus grande distance sur le terrain (12 027 m) (Di Salvo et coll, 2007). En outre, cette distance parcourue plus importante par les milieux de terrains peut s'expliquer par le fait que ceux-ci ont des  $\dot{V}O_2\text{max}$  en moyenne plus élevée que leurs homologues défenseurs centraux (Di Salvo et coll, 2007).

## 1.5 Les qualités physiques requises en football

Selon l'analyse des données d'un match de football de haut niveau, il est évident que les joueurs ont besoin de capacités physiques importantes pour maintenir leur performance tout au long du match, tout en préservant leur efficacité technique et en respectant leur rôle tactique.

Une bonne condition physique est primordial en football, D'ailleurs, la grande majorité des staffs techniques intègrent au moins un préparateur physique ayant pour objectif d'optimiser la performance (Lippi, 2007). La présence du « fitness coach » coïncide avec le fait qu'un joueur en parfaite condition physique pourra exploiter au mieux ses qualités techniques et tactiques (Bangsbo, 1994b). Pour illustration, les plus grands joueurs de l'histoire du football tels que Maradona, Pelé, Messi et Zidane avaient besoin d'être bien physiquement afin de pouvoir effectuer des gestes d'une bonne qualité à la suite de longues courses, de duels au sol, après plusieurs accélérations ou encore en fin de match (Zauli, 2002). De même, cette qualité va directement influencer sur la lucidité des placements tactiques des joueurs et sur la capacité de remplacement. La performance en football de haut-niveau se joue sur des détails et le fait qu'un joueur n'ait pu faire un remplacement de quelques mètres peut directement entraîner un but (Trapattoni, 1999). Cité par (Dellal, 2008).

Les composantes de l'aspect athlétique du footballeur, peuvent être divisé en cinq (5) parts;

- L'endurance
- La Force
- La Vitesse
- La Coordination
- La Souplesse

# Chapitre 1 : le football

---

Chaque élément est présent en permanence dans l'effort au football mais selon les situations, une ou l'autre composante sera dominante.

## 1.5.1 L'endurance

L'endurance est une qualité physique très importantes chez les footballeurs, si ce n'est pas la plus importantes, car dans un match de football, le joueur a besoin de répéter un grand nombre de fois des actions à vitesse maximale (Arnaud Lesserteur, 2009, p.114), en gardant un rythme élevé jusqu'à la fin du match.

### 1.5.1.1 Définition

Elle est définie par Zatsiorsky, comme étant la faculté d'effectuer, pendant une durée prolongée, une activité d'intensité donnée sans baisse d'efficacité. Donc, L'endurance est la capacité physique et psychique que possède l'athlète pour résister à la fatigue. Cette capacité de maintenir un effort le plus longtemps possible dépend d'un certain nombre de critères mis en jeu, tels que la musculature concernée, le type de contraction musculaire demandé, les qualités physiques sollicitées, les processus énergétiques dominants, la durée et l'intensité de l'effort et la discipline pratiquée. L'endurance correspond à des efforts dynamiques, courir, sauter, nager, ramer, pédaler... en faisant appel au processus énergétique.

En effet, la représentation qui est souvent associée à l'endurance, illustre par des activités de très longue durée, d'intensité modérée par rapport à l'intensité maximale d'effort possible, et faisant de se fait appel très majoritairement au processus aérobie comme source d'énergie pour la contraction musculaire (Martin-Krumm, 2016).

Plus un sportif a un VO<sub>2</sub> max élevé, plus il peut maintenir un pourcentage important de ce VO<sub>2</sub> max pendant un effort de longue durée. Cette capacité à maintenir un pourcentage élevé du VO<sub>2</sub> max est appelée « endurance » (Dècle-Lacoste et al, 2014).

### 1.5.1.2 Les modalités de l'endurance

Selon (Weineck, 1997), on distingue quatre forme d'endurance;

- L'endurance aérobie et l'endurance anaérobie ;
- L'endurance de courte durée, moyenne et longue durée ;
- L'endurance-force, l'endurance de force-vitesse et l'endurance-vitesse ;
- L'endurance dynamique (se rapportant au travail avec mouvement) et l'endurance statique (impliquant quant à elle, un travail musculaire sans déplacement).

### 1.5.1.3 L'importance de l'endurance

Selon (Blazevic. M, et Dujmovic . P ,1978) l'endurance permet d'effectuer des efforts relativement intenses pendant une longue période, sans donner de signe de fatigue et sans que le rendement en soit influencé. Plus cette qualité est développée, plus le rythme des matchs pourra être soutenu. L'endurance dépend du système cardio-vasculaire et du système respiratoire. Elle est inévitablement associée autres qualités physiques. Mais en football, c'est l'endurance-vitesse qui est importante, L'endurance sert au footballeur à rester efficace dans la répétition des sprints, de dribbles, des sauts, de changements de direction, de l'explosivité tout au long du match. Une bonne capacité aérobie permet une meilleure récupération de la puissance musculaire entre les efforts.

### 1.5.1.4 Les stratégies d'amélioration de la performance en endurance

L'amélioration de l'endurance d'un joueur revient à l'amélioration des processus énergétiques, c'est-à-dire, augmenter leurs potentiel d'une part en terme de puissance en travaillant sur la qualité de l'effort (intensité de l'action) d'autre part en terme de capacité en travaillant sur son aspect quantitatif (durée de l'action), (Lambertin. F, 2000).

Théoriquement, pour améliorer la performance en endurance, plusieurs stratégies sont utilisables :

- Augmenter la quantité totale d'énergie disponible (capacité) ;
- Elever au maximum le niveau d'énergie utilisé pendant une durée donnée (puissance maximale) ;
- Augmenter le temps limité pendant lequel un pourcentage donné de la puissance maximale peut être maintenue (endurance) ;
- Augmenter le travail mécanique utile fourni pour un même niveau de dépense énergétique (rendement).

Concrètement, les objectifs visés sont essentiellement ;

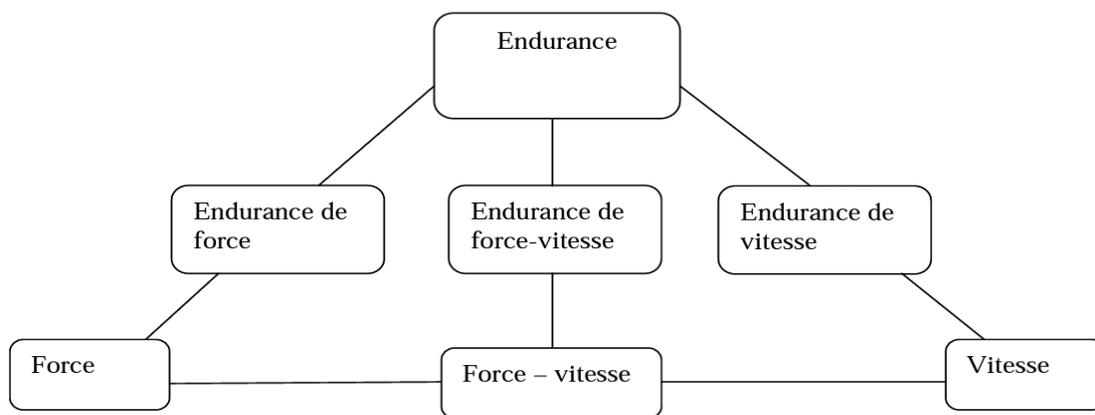
- Améliorer la rapidité de fourniture d'énergie aérobie ;
  - Maintenir l'équilibre énergétique et thermique dans le temps ;
  - Améliorer l'économie ou le rendement ;
- (Millet et Le Gallais, 2007).

# Chapitre 1 : le football

Les tests à utiliser comme moyens de contrôle de l'endurance sont, d'après (.J. Leguyader, 1999):

- Test de cooper : courir la plus grande distance possible en 12mn ;
- Test progressif de course navette de 20m avec paliers de 1minute ;
- Test progressif de course sur piste avec paliers de 2mn ;

Ces tests permettent de connaître la VO<sub>2</sub> max du sportif, la vitesse maximale aérobie (VMA) et les pulsations cardiaques atteintes.



**Figure 1:** corrélation entre les facteurs de qualités physiques (Weineck, 1992).

## 1.5.2 La force

### 1.5.2.1 Définition

« La force de l'homme peut se définir comme la faculté de vaincre une résistance extérieure ou d'y résister grâce à des efforts musculaires » (Zatsiorski, 1966).

Selon (Manno, 1982), *La force* est la capacité d'un muscle ou d'un groupe musculaire à développer une tension ou, la capacité motrice qui permet à l'homme de vaincre une résistance ou de s'y opposer par un effort intense de sa musculature.

### 1.5.2.2 Les modalités de la force

On peut distinguer quatre formes principales de la force à savoir:

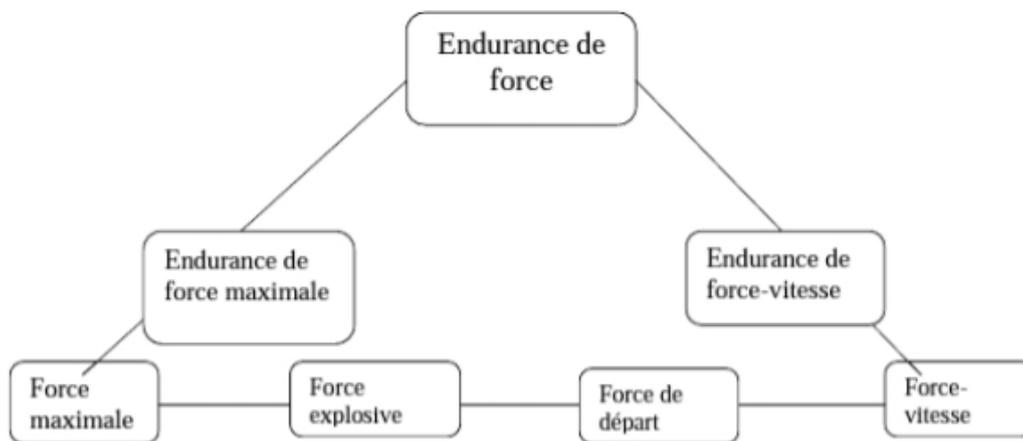
- a) **Force maximale:** C'est le maximum de force qui peut déployer le système neuromusculaire pour une contraction maximale volontaire (Weineck, 1986).

# Chapitre 1 : le football

Il existe deux types de force maximale : dynamique (en mouvement) et statique (sans mouvement).

L'ensemble des autres catégories de force dépendent directement de la force maximale. (Millet et Le Gallais, 2007).

- b) **Force-vitesse**: la combinaison de ses deux qualités donne la puissance, qui est la capacité du système neuromusculaire à surmonter des résistances avec la plus grande vitesse de contraction possible (Weineck, 1986).
- c) **Endurance de force** : c'est la capacité à résister à la fatigue dans des efforts de longue durée à dominante force. Elle est en fonction de : l'intensité des stimulations (% de la force maximale), l'amplitude des stimulations (nombre de répétitions), la durée de l'exercice. Suivant les disciplines, on peut trouver une endurance de force-dynamique, une endurance de force-statique ou une endurance de force-vitesse.
- d) **La force explosive** : c'est la capacité à accélérer un mouvement déjà lancé et l'augmentation maximale de production de la force au départ du mouvement. D'un point de vue mécanique, l'explosivité se définit comme la capacité du système neuromusculaire à augmenter brusquement le niveau des forces qu'il exprime (Weineck, 1986 cité par Millet et Le Gallais, 2007).



**Figure 2:** corrélation entre les trois formes principales de force (Weineck, 1992).

### 1.5.2.3 L'importance de la force en football

Le football est caractérisé par des efforts courts et intenses, d'où la qualité de force d'un joueur joue un rôle déterminant, en faisant la différence lors des matchs. Selon (Arnaud Lesserteur, 2009), Le joueur qui va « vite » possède le plus souvent des qualités de force musculaires très

# Chapitre 1 : le football

---

intéressantes, Cette force va donc intervenir sur les démarrages de sprint. Plus un muscle est fort, plus le joueur va sauter plus haut, frapper plus fort, et courir plus vite. En d'autre terme, la présence de la force associée avec la vitesse donne un joueur puissant.

## **1.5.2.4 Les méthodes d'amélioration de la force**

Pour améliorer cette qualité, le meilleur moyen est d'utiliser la musculation avec charge additionnelle et notamment avec des charges lourdes, en effectuant des efforts de charges répétés. En football on cible les exercices sur les muscles des membres inférieurs comme les quadriceps, les ischio-jambiers, les triceps suraux (mollets) d'une part, et d'une autre part sur les muscle de la partie supérieur, à savoir les abdominaux et les dorsaux afin d'équilibré le développement de la force sur le haut et le bas du corps.

La pliométrie est une autres méthode de travail pour développer cette qualité d'une façon très simple, et qui n'exige pas du matériel de musculation. Cette méthode est constituée de bondissements : tout d'abord des bondissements horizontaux (corde à sauter, des foulées bondissantes, appuis décalés avec cerceaux...) ou réaliser de la pliométrie plus lourde avec des bondissements verticaux (travail avec les haies, bancs ou sauts...). Comme cité précédemment, il ne faudra pas oublier de réaliser des abdominaux et des dorsaux soit sous forme isométrique (gainage du grand droit et des obliques) soit en concentrique sous forme d'abdominaux « Crunch » qui permet de garder les lombaires bien à plat sur le sol (Baptiste, 2007). On répertorie 3 types d'actions qui illustrent la nécessité de posséder de la force dans le football actuel (les duels, les sauts et les sprints). Courir vite, gagner ses duels et dominer les « airs » sont des actions qui font souvent la différence pour gagner « physiquement » un match (Arnaud Lesserteur, 2009).

Les tests d'évaluation et contrôle des aptitudes de force des joueurs sont :

le demi-squat et le développé couché, qui concernent respectivement les membres inférieurs et les membres supérieurs (Lambertin, F. 2000).

## **1.5.3 La vitesse :**

### **1.5.3.1 Définition**

C'est la qualité physique qui permet d'exécuter un mouvement très rapidement ou de répéter un grand nombre de mouvements dans un temps donné.

# Chapitre 1 : le football

---

Frey (1977), définit la vitesse comme « la capacité qui permet, sur la base de la mobilité des processus du système neuromusculaire et de la propriété qu'a le muscle de développer de la force, d'accomplir dans des conditions données des actions motrices en un temps maximal.

Grosser (1991) la définit comme « la capacité sur la base des processus cognitifs, de la volonté maximale et de fonctionnellement du système neuromusculaire, d'atteindre dans certaines conditions la plus grande rapidité de réaction et de mouvements ». (Weineck, 1997).

Selon Pradet (1996), la vitesse est « la faculté d'un athlète à parcourir, ou à faire parcourir à l'ensemble ou à une partie de son corps, la plus grande distance possible dans le temps le plus bref, en ayant à lutter que contre sa propre masse ».

## 1.5.3.2 Les formes de la vitesse

On distingue plusieurs formes de vitesse :

- La force-vitesse (force de démarrage) : capacité de repousser des résistances à une vitesse maximale, en un temps donné ;
- La vitesse-endurance : capacité de résister à la perte de vitesse due à la fatigue pour les vitesses de contractions maximales dans l'exécution de mouvements acycliques avec des résistances renforcées.
- La vitesse-endurance maximale : capacité de résister à la perte de vitesse due à la fatigue pour les vitesses de contractions maximales dans l'exécution de mouvements cycliques.

## 1.5.3.3 L'importance de la vitesse en football

Le footballeur doit être rapide dans les appels et ballon au pied, sa vitesse est spécifique, et elle se distingue par la nécessité de changer de direction, d'exécuter des courses sur des distances variables, de s'adapter à la trajectoire du ballon et à la présence de l'adversaire (Arnaud Lesserteur, 2009). Des études ont montré que, lors d'un match de football, les efforts intenses (comme les sprints) correspondaient à environ 6 à 13% de l'effort total fourni. Mais ce sont également ces efforts qui permettent de faire la différence.

Les sprints en football ne dépassent généralement les 30 m. D'ailleurs, c'est les sprints de 10m qui distinguent entre un joueur de niveau moyen et celui de haut niveau.

## 1.5.3.4 Les méthodes de développement de la vitesse

Pour développer cette qualité, Il faut veiller à travailler autant les sprints que lors d'un match, donc sur des distances équivalentes, dans situations équivalentes (avec ou sans ballon, avec ou sans adversaire). Les temps de récupérations doivent être respectés sans quoi le travail sera inefficace, comme il a précisé (Gilles Cometti, 1998), L'importance dans le travail de vitesse est de bien respecter le temps de récupération car la vitesse est un travail qualitatif. De plus pour travailler les réflexes et la gestuelle il faut multiplier les situations : sollicitations visuelles, auditives, et type de départ.

On peut aussi ajouter une sous composante appelé l'endurance vitesse qui le travail de l'explosivité. Ainsi le joueur travaille son réflexe sur les démarrages et est de plus en plus efficace sur démarrage. Là aussi on va travailler cela à l'aide de la pliométrie mais on aura aussi recours aux bonds avec cerceaux, lattes ou bancs.

Selon (J. Leguyader, 1999) Parmi les moyens de contrôle, on trouve:

- Le chronomètre sur des distances courtes ;
- L'appréciation de la vivacité dans l'exécution des gestes techniques.

## 1.5.4 La Coordination

### 1.5.4.1 Définition

La capacité de coordination est déterminée avant tout par les processus de contrôle et de régulation du mouvement (Hirtz, 1981). Elle permet au sportif de maîtriser des actions dans des situations prévisibles (stéréotype) ou imprévisible (adaptation), de les exécuter de façon économique et d'apprendre assez rapidement les mouvements sportif (Frey, 1977).

Donc Elle est la capacité de réaliser un mouvement en combinant l'action de plusieurs groupes musculaires avec un maximum d'efficacité et d'économie. Cette qualité est une condition de base pour l'expression de toutes les autres qualités physiques. Elle est la possibilité d'exploiter le maximum des capacités fondamentales, force, endurance et vitesse. La coordination est déterminée par la capacité du système nerveux central de capter, conduire, traiter des informations souvent multiples :

- **Extéroceptives** : venues du milieu extérieur,
- **Intéroceptives** : venues du corps propre.

## **L'importance de la coordination en football**

D'après (G. Cometti, 1998), un joueur avec une bonne coordination est capable non seulement de bien exécuter une habileté, mais aussi de résoudre rapidement une tâche d'entraînement. Elle va permettre d'être efficace, rapide et réactif tout en utilisant le moins de ressources physiques. Ainsi le joueur est plus réactif à des situations déjà rencontrées ou inédites. Il sera meilleur dans l'anticipation et l'approche ainsi que dans la réalisation des mouvements. C'est un facteur de la performance indispensable au football. Courir, sauter, bloquer et redémarrer sa course, tirer passer et récupérer le ballon sont autant d'actions motrices retrouvées dans le football, chacune d'entre elles fait appel à une coordination générale (musculaire et segmentaire) au service de l'activité sportive, indispensable, elle se doit d'être développée puis améliorée dès le jeune âge Philippe Lambert, cité par (A. Dellal, 2013), en mentionnant que les joueurs effectueraient durant un match entre 1110 et 1200 actions (dont 200 intensives), 400 changement de direction, 30 à 40 sauts, un nombre important de courses combinant des appuis avant, arrières et latéraux ou encore une combinaison d'actions techniques très intenses (1 à 3 touches de balle).

### **1.5.4.2 Les méthodes de développement de la vitesse**

Cette qualité ce développe tout on passant par des automatismes divers, d'après (Martin-Krumm, 2016) ;

- La création d'automatisme ;
- L'adoption de postures initiales inhabituelles ;
- L'exécution simultanée de plusieurs actions ;
- Exécution d'un geste en miroir ;
- Augmentation des moyens d'exécution d'une tâche ;
- Faire varier la vitesse d'exécution d'un exercice ;
- Faire varier la nature de l'opposition ;
- Modifier les limites spatiales dans lesquelles s'exécute l'action.

## **1.5.5 La souplesse**

### **1.5.5.1 Définition**

Synonyme de mobilité articulaire, la souplesse est considérée comme « la capacité d'accomplir des gestes avec la plus grande amplitude possible, que ce soit de façon active ou

passive » (R. Manno, 1992). Donc elle est synonyme de flexibilité, d'amplitude articulaire et de mobilité.

## 1.5.5.2 Les formes de souplesse

Il y a deux formes de souplesse, selon R. Manno :

- *La souplesse active* : c'est la capacité d'obtention d'une grande amplitude du mouvement par le biais de la contraction de groupes musculaires liés à l'articulation concernée.
- *La souplesse passive* : c'est la capacité d'obtention d'une grande amplitude de mouvement par le biais de l'application, sur la partie mobile, des charges ou des tensions extérieures supplémentaires.

## 1.5.5.3 Les méthodes de développement de la souplesse

D'après Wei neck (1992), la méthode la plus efficace pour développer la souplesse est la méthode par répétition exercices (étirements passifs, étirements actifs, étirement statiques ou stretching).

Lors de l'entraînement, on développe la souplesse générale et la souplesse spécifique :

- *La souplesse générale* : c'est la somme de toutes les mobilités de toutes les articulations permettant d'exécuter les différents mouvements avec la plus grande amplitude.
- *La souplesse spécifique* : elle réside dans la mobilité maximale au niveau des articulations, en fonction de sollicitations du sport choisi.

La souplesse ne doit pas être développée qu'en fonction des besoins d'amélioration optimale de la technique sportive et de l'efficacité des actions motrices (Matwejew, 1998).

Pour conclure, d'après (Bangsbo, 2007). Les qualités physiques sont dépendantes l'une de l'autre, elles sont en interaction. De plus, elles interfèrent directement avec la performance technique et tactique au cours d'un match.

Dans le deuxième axe de ce chapitre, nous allons percer dans les détails de l'entraînement en football, pour mieux comprendre son fonctionnement.

## 2 L'entraînement en football

L'entraînement en football joue un rôle crucial dans l'amélioration des performances individuelles des joueurs et dans le succès collectif de l'équipe. Il revêt une importance capitale de mettre en place un plan d'entraînement adapté, qui tient compte des besoins spécifiques et des objectifs de l'équipe.

Ce plan d'entraînement complet peut englober différents aspects, tels que la condition physique, le travail technique et tactique, les matchs amicaux, les séances vidéo et les séances de récupération. Chaque composante contribue à l'amélioration des compétences individuelles des joueurs et à la cohésion de l'équipe sur le terrain.

L'élaboration d'un plan d'entraînement efficace requiert une planification minutieuse. Il est essentiel de veiller à une progression constante, en adaptant les exercices et les charges d'entraînement au fur et à mesure que les joueurs développent leurs compétences. Cela permet de stimuler leur progression tout en minimisant les risques de blessures.

L'entraînement en football est un élément clé pour améliorer les performances des joueurs et de l'équipe dans son ensemble. Il est essentiel de mettre en place un plan d'entraînement adapté aux besoins et aux objectifs de l'équipe. Cela peut inclure des exercices de condition physique, des séances de travail technique et tactique, des matchs amicaux, des séances vidéo et des séances de récupération. L'entraînement doit être planifié de manière à permettre une progression constante et à éviter les blessures. Les joueurs doivent également être motivés et engagés dans le processus d'entraînement pour maximiser leur potentiel et leur performance sur le terrain.

### 2.1 Définition de l'entraînement

Selon le dictionnaire Larousse;

- a) c'est la préparation régulière et méthodique à un exercice physique ou intellectuel
- b) c'est un ensemble d'exercices physiques variés, mêlés à la pratique régulière du sport lui-même, destinés à préparer méthodiquement quelqu'un à une compétition.

D'après (Matveiev1972), l'entraînement sportif est tout ce qui comprend la préparation physique, technico-tactique, intellectuelle et morale de l'athlète à l'aide d'exercices physiques.

# Chapitre 1 : le football

---

Selon (Gallet, D et al 2007), l'entraînement sportif comprend l'ensemble des tâches qui assurent une bonne santé, une éducation, un développement du physique harmonieux, une maîtrise technique et tactique et un haut niveau de l'amélioration des qualités spécifiques.

Selon (R.MANNO, 1992), l'entraînement est un processus complexe d'intervention visant à développer les qualités d'un individu lui permettant d'atteindre des performances sportives maximales compte tenu de ses potentialités.

A partir de ces déférentes définitions, en conclu que, l'entraînement sportif est un ensemble des méthodes et exercices physiques, visant l'entretien et l'amélioration des performances sportives, sur tous les plans (physiques, technique, tactique et Mentale).

## 2.2 Les objectifs de l'entraînement en football :

L'entraînement en football vise à atteindre plusieurs objectifs clés, à la fois sur le plan individuel et collectif. Voici ces objectifs d'une façon générale en quelques points :

-Améliorer la performance physique: Développement de la vitesse et de l'agilité: des exercices spécifiques pour améliorer la vitesse de course et l'agilité des joueurs. (Reilly et al., 2009)

Renforcement musculaire: des programmes d'entraînement en force pour améliorer la puissance et la résistance musculaire des joueurs. (Wisloff et al., 2004).

- Optimiser la condition physique: Amélioration de l'endurance aérobie: des méthodes d'entraînement par intervalles pour améliorer la capacité aérobie des joueurs. (Bangsbo, 2006)

Développement de la résistance anaérobie: des exercices à haute intensité pour améliorer la capacité à maintenir un effort intense pendant une courte période. (Rampinini et al., 2007)

-Développer les compétences techniques: Précision de passe et de tir: des exercices de précision et de technique de passe et de tir. (Hill-Haas et al. 2011) Contrôle de balle et dribbles: des exercices spécifiques pour améliorer la maîtrise du contrôle de balle et les compétences en dribble. ( Reilly et al., 2009).

-Renforcer les compétences tactiques : Amélioration de la compréhension du jeu : des exercices de positionnement et de prise de décision pour développer la compréhension tactique des joueurs. (Lago-Peñas et al., 2012), Coordination et communication: des exercices pour améliorer la coordination et la communication entre les joueurs sur le terrain. (Williams et al. 2004).

- Favoriser le développement mental et émotionnel : Gestion du stress et de la pression : des techniques de préparation mentale pour aider les joueurs à faire face au stress et à la pression des matchs. (Weinberg et Gould, 2014) Développement de la confiance et de la motivation : des stratégies de coaching mental pour renforcer la confiance et la motivation des joueurs.

## **2.3 Les principales méthodes d'entraînement utilisées dans le football**

### **2.3.1 La méthode régulière ou continue.**

La méthode de compétition est basée sur la réalisation d'exercices dans des conditions similaires à celles de la compétition réelle. Cela crée une atmosphère propice à un impact maximal des exercices physiques sur le corps, permettant ainsi une expression optimale des capacités fonctionnelles. Son objectif est de développer les qualités psychologiques et intellectuelles des joueurs, d'améliorer leurs habitudes motrices et de favoriser leur utilisation rationnelle dans des situations complexes.

Cette méthode peut être appliquée de différentes manières. Elle peut prendre une forme élémentaire en se concentrant sur l'exécution technique optimale lors des entraînements. Elle peut également se traduire par des compétitions d'entraînement et des matchs amicaux visant à préparer les joueurs aux compétitions officielles.

La méthode de compétition permet principalement de développer l'endurance spécifique à la discipline. Elle offre l'occasion d'acquérir une expérience en compétition, d'améliorer la tactique et d'étudier les stratégies adverses. Dans cette approche, les compétitions sont intégrées comme élément central de l'entraînement. C'est une méthode complexe qui vise à développer les compétences spécifiques adaptées à la discipline considérée.

### **2.3.2 Méthode par intervalle :**

La méthode répétitive présente des similarités avec la méthode de l'interval-training. Les deux méthodes se caractérisent par des répétitions d'efforts suivies d'intervalles de récupération déterminés. Dans la méthode répétitive, l'impact sur l'organisme est principalement déterminé par la durée et l'intensité de l'effort lui-même.

En revanche, dans l'interval-training, les intervalles de récupération jouent également un rôle important. Cette méthode est largement utilisée dans l'entraînement sportif et s'applique à de nombreux sports tels que la course à pied, l'aviron et les sports collectifs. L'idée est de doser l'intensité des répétitions de manière à ce que la fréquence cardiaque ne dépasse pas 160 à 180

# Chapitre 1 : le football

---

battements par minute à la fin de l'exercice. Étant donné que la durée de l'effort n'est pas prolongée, la consommation d'oxygène n'atteint pas son maximum.

Dans l'interval-training, l'impact de l'entraînement se produit principalement pendant les intervalles de repos, d'où le nom de cette méthode. La durée et l'intensité des intervalles de récupération sont déterminées selon des principes spécifiques. La fréquence cardiaque au début de la reprise de l'exercice est contrôlée et l'autre effort est réalisé sans une récupération complète. Le repos peut être actif ou passif.

Les exercices sont répétés par séries, et la série est interrompue dès que la fréquence cardiaque ne descend pas à 120-140 battements par minute à la fin des intervalles de repos. Le nombre de répétitions peut varier, généralement entre 10 et 30. L'interval-training contribue au développement du muscle cardiaque et améliore les capacités aérobies de l'organisme. Cette méthode est principalement utilisée pour le développement de l'endurance générale et spécifique.

Il existe plusieurs variantes de l'interval-training, avec différentes combinaisons de moyens d'entraînement tels que la durée, l'intensité et le nombre de répétitions. Bien que les variantes diffèrent, le mécanisme physiologique de base est le même. On distingue l'interval-training dans les régimes anaérobie et aérobie. Cette méthode a été étudiée par des chercheurs tels que Fox et Mathews en 1983.

### **2.3.2.1 L'avantage de l'intervalle training :**

La méthode en question offre la possibilité de gérer avec précision les charges d'entraînement. Son utilisation permet de gagner du temps dans l'organisation des séances grâce à une intensité élevée et une amélioration rapide de l'endurance. Cependant, elle présente un inconvénient lié à une alternance monotone des charges, ce qui peut avoir un impact négatif sur l'état mental de l'athlète. De plus, l'organisme s'adapte rapidement aux charges d'entraînement, ce qui peut entraîner une perte rapide des progrès réalisés. L'endurance développée par cette méthode peut se dégrader plus rapidement que celle acquise avec d'autres approches.

### **2.3.3 Méthode circulaire ou circuit training :**

Il s'agit principalement d'un système de travail méthodique qui repose sur différentes variantes de méthodes. Il consiste en une exécution séquentielle d'exercices spécialement sélectionnés, avec une indication précise du nombre d'exercices, de la durée de leur réalisation, des

# Chapitre 1 : le football

---

intervalles de repos entre les différents types d'exercices, du nombre de séries et des intervalles de repos entre les séries.

La charge peut être modifiée en ajustant l'un de ces éléments mentionnés. L'athlète passe d'un travail à un autre, d'un agrès à un autre, d'un atelier à un autre, d'où le terme "entraînement circulaire" (circuit training).

L'entraînement circulaire présente certaines caractéristiques méthodiques :

- Le développement méthodique des qualités physiques.
- Un dosage rigoureux des charges et du temps de récupération.
- Une évaluation stricte du travail effectué.
- La possibilité de travailler uniquement avec des exercices bien maîtrisés.
- Il existe différentes variantes du circuit training.
- Le travail est effectué selon la méthode continue.

## **2.3.4 Méthode de compétition :**

La méthode de compétition est basée sur la réalisation d'exercices dans des conditions similaires à celles de la compétition réelle. Cela crée une atmosphère propice à un impact maximal des exercices physiques sur le corps, permettant ainsi une expression optimale des capacités fonctionnelles. Son objectif est de développer les qualités psychologiques et intellectuelles des joueurs, d'améliorer leurs habitudes motrices et de favoriser leur utilisation rationnelle dans des situations complexes.

Cette méthode peut être appliquée de différentes manières. Elle peut prendre une forme élémentaire en se concentrant sur l'exécution technique optimale lors des entraînements. Elle peut également se traduire par des compétitions d'entraînement et des matchs amicaux visant à préparer les joueurs aux compétitions officielles.

La méthode de compétition permet principalement de développer l'endurance spécifique à la discipline. Elle offre l'occasion d'acquérir une expérience en compétition, d'améliorer la tactique et d'étudier les stratégies adverses. Dans cette approche, les compétitions sont intégrées comme élément central de l'entraînement. C'est une méthode complexe qui vise à développer les compétences spécifiques adaptées à la discipline considérée.

## **2.4 Les Différentes filières Les énergétiques :**

Trois voies énergétiques sont utilisées lors de l'exercice physique. L'intervention ou de l'autre dépend de l'intensité de la durée de l'exercice. Selon qu'elles font, ou non, appel à l'oxygène pour les dégradations métaboliques, ou qu'elles produisent de l'acide lactique, ces voies métaboliques sont appelées : anaérobie alactique, anaérobie lactique et aérobie.

### **2.4.1 La filière anaérobie alactique :**

Utilise directement l'hydrolyse immédiate de l'ATP et celle de la créatine phosphate, ou phosphocréatine en réserve dans le muscle. Sa mise en jeu ne nécessite aucun délai, elle peut fournir, immédiatement, l'énergie nécessaire avec un débit très élevé. C'est pourquoi elle constitue le substrat essentiel lors des exercices dits « explosifs ». L'organisme doit faire davantage appel aux autres voies métaboliques si l'exercice se prolonge.

### **2.4.2 La filière anaérobie lactique :**

Où glycogénolyse est très rapide également, elle consiste en une dégradation partielle du glycogène en acide lactique qui s'accompagne de la formation d'ATP. Le glycogène est le sucre d'énergie de choix, il est stocké dans le muscle. L'énergie libérée par cette voie est immédiate et augmente très rapidement. Elle est essentielle pour tous les exercices brefs et intenses (exemple : les exercices de sprint). Ici, la différence de la filière énergétique précédente, ce n'est pas la quantité de substrat, en l'occurrence le glycogène, qui limite l'exercice, mais la baisse du pH cellulaire ; l'acidose cellulaire induite est très mal tolérée (apparition de crampes musculaires).

### **2.4.3 La filière aérobie :**

À la différence des deux autres filières énergétiques, nécessite de l'oxygène. L'apport en oxygène est assuré par un ensemble d'ajustements du système cardio-respiratoire, lesquels nécessitent un délai. Elle fonctionne bien sûr en permanence, mais elle devient la voie prépondérante pour les exercices dépassant deux minutes. Les principaux substrats utilisés sont les glucides, avec un « rendement » important, et les lipides, avec une vitesse de formation de l'énergie très lente (L. Permuter, 2006).

# **Chapitre 2 : La capacité à répéter des sprints**

### 1 Capacité à répéter des sprints

#### 1.1 Définition

La capacité à répéter des sprints est la capacité d'un individu à effectuer plusieurs sprints de haute intensité avec une récupération limitée entre chaque sprint. Cette capacité est importante dans les sports qui exigent des efforts intermittents, tels que le football, le basketball, le rugby, le hockey et le tennis. La RSA est un facteur clé de la performance physique en sports collectifs, car elle influence le résultat final d'un match (Gabbett et al., 2013; Johnston and Gabbett, 2011; King et al., 2009; Rampinini et al., 2007; Sirotic et al., 2009; Spencer et al., 2004). Elle est souvent mesurée par le nombre de sprints qu'un individu peut effectuer avant de ressentir une fatigue significative ou de diminuer sa performance.

Selon Bishop *et al.* (2003), la résistance à la vitesse nommée également Repeated Sprint Ability (RSA) est "la capacité à sprinter, récupérer, et sprinter à nouveau, cette séquence pouvant être réitérer une ou plusieurs fois". Autrement dit, cette qualité se traduit par une aptitude à répéter des sprints de haute intensité sans observer de baisse de la performance entre le premier et le dernier sprint. Elle peut être considérée comme une performance de type intermittente courte, mais à vitesse maximale car les caractéristiques qui peuvent la décrire sont relativement similaires à ce genre d'exercices intermittents (Saltin, 1960).

Nous pouvons noter les critères d'intensité, de durée de l'exercice, d'intensité et de durée de la récupération, ou encore du nombre de répétitions de l'exercice. Cette qualité physique est parfois, voire même souvent, sa propre méthode d'entraînement. En d'autres termes, un entraîneur ou un préparateur physique utilise régulièrement des procédés liés à la répétition de sprints pour développer cette qualité physique (Hill-Hass *et al.*, 2007). La capacité à répéter des sprints peut être améliorée par un entraînement spécifique, qui vise à augmenter la résistance à la fatigue et à améliorer la récupération entre les sprints. Avant d'explorer les méthodes d'entraînement, il est important de bien comprendre les facteurs qui contribuent à l'apparition de la fatigue et leur impact sur la performance sportive.

### 1.2 Évaluation de la capacité à répéter des sprints et son impact sur la performance globale

Lors de compétitions ou d'entraînements, il est difficile d'évaluer précisément la charge et la fatigue associées aux répétitions de sprints (RS). Malgré l'utilisation de différentes stratégies telles que les accéléromètres intégrés et les systèmes GPS, l'analyse de la capacité à répéter les sprints (RSA) est compliquée en raison du contexte de jeu, de la diversité des mouvements et des stratégies (Edwards et al., 2018).

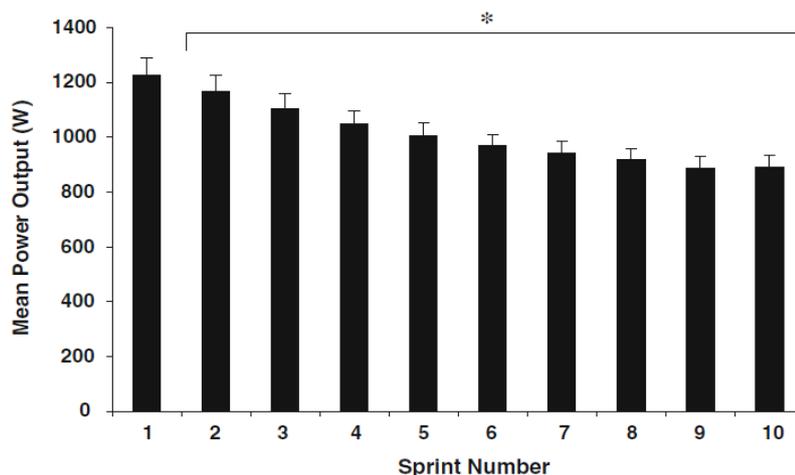
Pour surmonter cette problématique, la RSA est étudiée à travers des tests sur le terrain ou en laboratoire, où la détérioration de la performance est directement mesurée par la puissance mécanique développée. Deux types de tests existent : les tests en boucle fermée et en boucle ouverte. Avant chaque test, une séance de familiarisation est nécessaire pour établir une performance de référence. Dans cette reformulation, nous utiliserons la course en sprint comme modalité de test, où la vitesse maximale ( $V_{max}$ ) est considérée comme la mesure de référence. Cependant, il convient de noter que les tests de RSA peuvent être réalisés selon différentes modalités (par exemple, ergocycle, double poussée en ski de fond, etc.) et que la mesure de référence varie en fonction de la modalité utilisée. Peu importe le type de test utilisé, le premier sprint doit être effectué à au moins 95% de la vitesse de référence. La durée des sprints et des périodes de récupération est standardisée, et quelques exemples sont présentés dans le Tableau 1. La différence entre les deux types de tests réside dans le critère d'arrêt du test. Dans le test en boucle ouverte, le participant effectue le maximum de sprints jusqu'à l'épuisement, généralement prédéfini à 85% de la vitesse de référence. La performance est alors mesurée en fonction du nombre de sprints réalisés avant l'épuisement, de la performance individuelle de chaque sprint ( $S$ ) ou de la performance moyenne. Le test en boucle fermée implique un nombre fixe de sprints, et le test se termine lorsque le dernier sprint est complété (Figure 1). La performance peut être évaluée en fonction des performances individuelles des sprints, de leurs moyennes, de l'indice de fatigue (FI) ou du score de détérioration de la performance ( $S_{dec}$ ). L'avantage de la boucle fermée est de pouvoir comparer chacun des sprints à l'ensemble du test de RSA. Voici les calculs utilisés où le symbole  $S$  correspond à la performance d'un sprint (Girard et al., 2011; Glaister et al., 2008).

$$FI = 100 \times \frac{S_{Meilleure} - S_{Pire}}{S_{meilleure}}$$

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

Il convient de noter que pour calculer Sdec, si le temps de sprint est utilisé comme paramètre S, la formule précédente s'applique. Cependant, si la performance est mesurée en termes de vitesse ou de puissance, l'équation suivante doit être utilisée.

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



**Figure 3:** Évolution des puissances moyennes au cours des 10 sprints du test RSA de type boucle fermée. Le protocole de test était de 10 sprints de 6-s sur ergocycle avec 30-s de récupération passive entre les répétitions (Mendez-Villanueva, Hamer, et Bishop 2008).

Selon la littérature, le calcul de Sdec est considéré comme une méthode plus valide être productible pour quantifier la fatigue comparativement à l'utilisation de FI (Glaister et al., 2008). En effet, le calcul de Sdec prend en compte l'ensemble des sprints alors que le FI considère seulement les deux extrêmes. De plus, le premier sprint a un impact considérable sur le Sdec comme l'exprime la formule où la meilleure performance est habituellement le premier sprint. Plusieurs auteurs ont en effet observé une corrélation positive entre la performance du premier sprint et la détérioration de performance des sprints subséquents (Bishop et al., 2003; Mendez-Villanueva et al., 2008; Yanagiya et al., 2003). En d'autres termes, plus la performance du premier sprint est élevée, plus les perturbations physiologiques qui s'ensuivent (et engendrant une fatigue neuromusculaire) sont importantes. C'est pour cette raison qu'un seuil de 95% de la vitesse de référence est utilisé lors du premier sprint.

Divers autres paramètres influencent le test RSA, tels que le contexte environnemental et l'heure de la journée lors de sa réalisation, les différences entre les sexes, l'âge et le niveau de formation des participants, parmi d'autres. Ainsi, la diminution de la performance mesurée lors du test RSA a permis d'évaluer et de quantifier l'apparition de la fatigue. Les principaux facteurs physiologiques associés à la performance RSA sont détaillés dans la section suivante. Une meilleure compréhension de ces facteurs contribuera à influencer les interventions visant à optimiser la RSA.

### 1.3 Facteurs restreignant la capacité de répéter des sprints

La RSA se trouve limitée par l'apparition d'un phénomène psycho-physiologique, la fatigue. Elle se définit comme étant « *une incapacité progressive à maintenir une force de manière*

## Chapitre 02 : la capacité à répéter les sprints

---

*continue ou répétée* » (Enoka and Stuart, 1985). Elle se caractérise au cours d'une répétition de sprints par une diminution de performance progressive qui est la conséquence d'altération au niveau central et périphérique dont l'influence varie selon les athlètes. La fatigue « *centrale* » affecte le système nerveux, en amont de la jonction neuromusculaire entraînant une altération du recrutement des unités motrices. Selon Tim Noakes, la fatigue est très dépendante du « *gouverneur central* ». Le cerveau utilise les symptômes de la fatigue au niveau musculaire qui vont entraîner un retour d'afférences sensorielles spinales et corticales mettant en alerte le cerveau (Noakes, 2012). La fatigue « *périphérique* » quant à elle altère la production de force au niveau musculaire. Cette fatigue musculaire est influencée sur le plan physiologique par plusieurs facteurs limitants tels que l'excitabilité neuromusculaire, la perturbation de la fourniture en énergie (*i.e.*, resynthèse de la PCr (Mendez-Villanueva et al., 2012), glycolyse anaérobie et aérobie) et l'accumulation de métabolites (*i.e.*, protons H<sup>+</sup>, phosphate inorganique [Pi]) (Spriet et al., 1989) (Bishop et al., 2011).

### 1.3.1 L'excitabilité musculaire dans la répétition des sprints

La réalisation d'un sprint requiert des niveaux considérables d'activation nerveuse (Ross et al., 2001). Lors de sprints répétés, la capacité à activer de manière volontaire les muscles impliqués dans la course et à maintenir le recrutement musculaire joue un rôle dans la résistance à la fatigue. Cette altération de l'activation musculaire est liée à des changements dans l'excitabilité neuromusculaire. Elle est la conséquence de perturbations ioniques liées à la diminution de l'activité de la pompe sodium (Na<sup>+</sup>)/potassium (K<sup>+</sup>) ATPase (Fraser et al., 2002) qui entraîne une accumulation de K<sup>+</sup> dans le milieu extra-cellulaire (Juel et al., 2000). Cet excès de K<sup>+</sup> va modifier l'excitabilité de la membrane cellulaire et diminuer la force produite qui résulte probablement d'une inactivation progressive des canaux Na<sup>+</sup> (Ruff et al., 1988).

### 1.3.2 Filières énergétiques et disponibilité des substrats

La perturbation de l'approvisionnement énergétique affecte la capacité à répéter des sprints au niveau de la resynthèse de la phosphocréatine (PCr), de la glycolyse anaérobie et de l'aérobie. Un élément clé qui influence la capacité à répéter des sprints est le taux de déplétion/réplétion de la PCr, qui est la principale source d'énergie pour la reconstitution de l'ATP. La déplétion de la PCr est importante à l'issue de chaque sprint au cours de la répétition de sprints (Gaitanos et al., 1993) et reliée d'une part à la durée du sprint, d'autre part au niveau d'entraînement des athlètes (Hirvonen et al., 1987) ainsi qu'à la typologie musculaire (*i.e.*, déplétion plus rapide dans les fibres rapides) (Karatzaféri et al., 2001; Söderlund and

## Chapitre 02 : la capacité à répéter les sprints

---

Hultman, 1991). Au cours de la récupération suivant un sprint, la durée de la réplétion de la PCr est reliée à l'importance de sa déplétion (Dawson et al., 1997), au type de récupération (Spencer et al., 2006) ainsi qu'au niveau aérobie (Tomlin and Wenger, 2001).

La phase de réplétion de la PCr se découpe en deux parties :

- une phase rapide (21 à 57 secondes ; (Bogdanis et al., 1995) dépendante de la disponibilité en oxygène (Haseler et al., 1999) .
- une phase lente (5 à 6 minutes(Bogdanis et al., 1995) pour une récupération quasi-complète des stocks de PCr.

Au cours d'un exercice de répétition de sprints, la réplétion de la PCr n'est jamais complète démontrant l'importance d'une vitesse de réplétion élevée pour maintenir la performance ( $r = 0.67$  ;  $p < 0.05$ ) (Mendez-Villanueva et al., 2012).

La contribution énergétique de la glycolyse anaérobie représente environ 40% lors d'un sprint de six secondes puis diminue au cours de la répétition de sprints sans variation de la lactatémie durant les dix sprints malgré une diminution importante de la puissance moyenne lors du dernier sprint (Gaitanos et al., 1993). Cette diminution de la fourniture énergétique de glycolyse anaérobie au cours de la répétition de sprints serait compensée par une plus grande contribution du métabolisme aérobie (Spencer et al., 2005). Alors que la contribution énergétique de la filière aérobie sur un premier sprint, elle représente environ 40% de la fourniture énergétique lors des derniers sprints d'un exercice de répétition de sprints permettant la resynthèse de la PCr (McGawley and Bishop, 2008). De plus, les joueurs de sports collectifs atteignent leur  $VO_{2max}$  au cours du dernier sprint (Dupont et al., 2005) laissant suggérer que la  $VO_{2max}$  serait un facteur limitant de la performance au test RSA (Bishop et al., 2004). De plus, une composante de temps rapide de la consommation en oxygène est associée à une meilleure performance au test RSA (Dupont et al., 2005). Enfin, la capacité d'extraction de l'oxygène par le muscle n'est pas impactée par la répétition de sprints malgré la progressive désoxygénation musculaire au cours des sprints répétés (Billaut and Smith,

2010; Racinais et al., 2007). Toutefois, la vitesse de réoxygénation musculaire durant les périodes de récupération entre les sprints serait améliorée après un entraînement de répétitions de sprints navette de 8 semaines et serait donc un paramètre déterminant de la performance (Buchheit and Uffland, 2011).

### 1.3.3 Accumulation de métabolites

La répétition de sprints induit également une accumulation d'ions hydrogène (H<sup>+</sup>) dans les muscles (Bishop and Edge, 2006) et dans le sang (Bishop et al., 2003), responsables d'une baisse du pH musculaire communément appelé acidose. Cette acidose musculaire affecterait la performance (Bishop and Edge, 2006; Bishop et al., 2003) en inhibant la production d'ATP par la glycolyse suite à une perturbation de certaines enzymes (*i.e.*, phosphorylase, Phosphofructokinase) (Spriet et al., 1989). L'accumulation de H<sup>+</sup> est contrée par un système tampon au niveau musculaire (ions bicarbonates ; transporteurs de monocarboxylate, MCT1, Lactate déshydrogénase) qui apparaît être déterminant dans la performance au test RSA (Bishop et al., 2004; Edge et al., 2006a). Enfin, l'accumulation de Pi musculaire entraînerait une réduction du nombre et/ou de la force des ponts actine-myosine à cause d'une inhibition du relargage du calcium par le réticulum sarcoplasmique (Dutka and Lamb, 2004; Westerblad et al., 2002). Dans ce cadre, pour améliorer la performance au test de capacité à répéter des sprints, il est nécessaire d'adopter différentes méthodes d'entraînement visant à améliorer les facteurs limitants.

### 1.4 L'entraînement de la capacité à répéter des sprints

D'après des recherches précédentes, diverses méthodes d'entraînement se sont avérées efficaces pour améliorer la capacité à répéter les sprints. La sélection de la méthode appropriée dépendra des objectifs et des exigences propres à la discipline. Parmi les approches prometteuses, on peut citer : l'entraînement en force et en puissance (Edge et al., 2006b), l'entraînement en sprint isolé (Rosset et al., 2001), l'entraînement intermittent en sprint (Roberts et al., 1982), l'entraînement par répétition de sprints (Taylor et al., 2015), l'entraînement intermittent de plus longue durée (Bishop et al., 2008; Edge et al., 2005) et enfin l'entraînement sous forme de jeux réduits (Buchheit et al., 2009).

#### 1.4.1 L'entraînement en sprint isolé :

entrecoupé de récupération complète permet l'amélioration du temps moyen au test RSA (Pyne et al., 2008; Ross et al., 2001). De plus, un entraînement basé sur un protocole de sprints et d'agilité incluant des périodes de repos incomplètes améliore le temps moyen de 2.2% dans un groupe de jeunes handballeurs (Buchheit et al., 2010).

#### 1.4.2 L'entraînement intermittent en sprints avec récupération complète :

(*e.g.*, sprint 30s ; récupération = 10 min) produit une lactatémie élevée ([La]<sub>max</sub> ≥ 10 mmol.l<sup>-1</sup>).

## Chapitre 02 : la capacité à répéter les sprints

---

1) et permettrait l'amélioration de l'activité des enzymes glycolytiques (Lactico Déshydrogénase; Phosphofructokinase) améliorant ainsi la capacité anaérobie (Roberts et al., 1982; Sharp et al., 1986).

### **1.4.3 L'entraînement à base de répétition de sprints de courte durée :**

est une stratégie efficace pour améliorer plusieurs paramètres de la performance des joueurs de sports collectifs tels que la puissance, la vitesse, la capacité à répéter des sprints et l'endurance (Taylor et al., 2015). L'entraînement par répétition de sprints semble apporter des bénéfices sur un sprint isolé et sur la performance moyenne au RSA grâce à une amélioration de VO<sub>2</sub>max (Bravo et al., 2008; Edge et al., 2005) et un probable impact sur la phase rapide de la vitesse de resynthèse de la PCr (Bishop et al., 2011). Enfin, l'accumulation de H<sup>+</sup> et/ou de lactate au cours d'un entraînement en répétition de sprints est un stimulus important pour améliorer les systèmes de régulation du pH musculaire. Cependant, accroître l'accumulation de H<sup>+</sup> durant l'entraînement ne majore pas ces adaptations (Bishop et al., 2011).

### **1.4.4 L'entraînement intermittent de longue durée**

((Bishop et al., 2008; Edge et al., 2005)) qui se base sur l'utilisation de la vVO<sub>2</sub>max améliore la capacité de récupération entre les sprints (Bishop et al., 2011). Par exemple, les durées d'effort à haute intensité entrecoupées de périodes de récupération inférieures à celles d'efforts (*i.e.*, 6-12 x [2 min (90-100% vVO<sub>2</sub>max)] ;récupération = 1 min) ont un impact significatif sur l'amélioration de différents paramètres physiologiques (Bishop et al., 2008). En effet, cela entraîne une plus grande capacité respiratoire mitochondriale (Thomas et al., 2004), une cinétique de consommation d'oxygène plus rapide (Dupont et al., 2005; Rampinini et al., 2009), une plus grande vitesse de resynthèse de la PCr, une meilleure capacité tampon (Bishop et al., 2008), une accélération de la fréquence de réoxygénation musculaire post-sprint (Buchheit and Ufland, 2011) et un plus grand VO<sub>2</sub>max (Rampinini et al., 2009).

### **1.4.5 L'entraînement sous forme de jeux réduits :**

permettrait d'améliorer la RSA grâce à une amélioration du niveau aérobie (VO<sub>2</sub>max) des joueurs et des paramètres neuromusculaires (*i.e.*, accélérations et changements de direction) sollicités lors de ce type d'exercice permettant un transfert direct vers la spécificité de l'activité (Buchheit et al., 2009; Hill-Haas et al., 2009). La combinaison de ces méthodes d'entraînement de la RSA apparaît donc être la meilleure stratégie d'optimisation de la capacité à répéter des sprints pour les sports collectifs (Bishop et al., 2011) pour améliorer la

## Chapitre 02 : la capacité à répéter les sprints

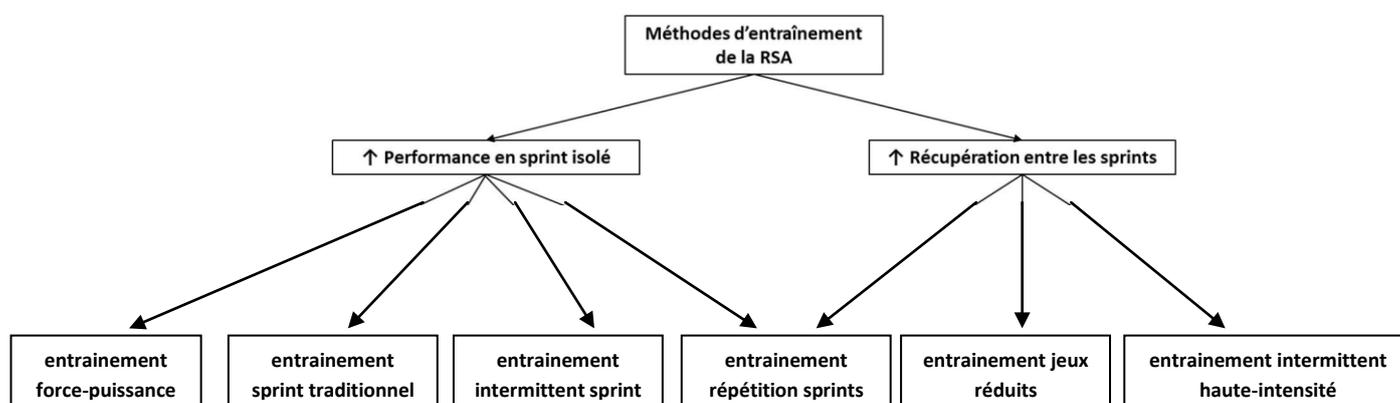
performance sur un sprint isolé et la récupération entre les sprints(Figure 2). D'une part, la performance sur un sprint isolé s'améliore grâce à;

- l'entraînement en force et puissance.
- l'entraînement traditionnel en sprint.
- l'entraînement par répétition de sprints.
- l'entraînement intermittent en sprint pour augmenter la capacité anaérobie (e.g.,sprints de 30 s ; récupération = 10 min).

D'autre part, la récupération entre les sprints s'améliore grâce à l'utilisation de;

- l'entraînement intermittent à haute intensité (80-90% VO<sub>2</sub>max).
- l'entraînement sous forme de jeux réduits.
- l'entraînement par répétition de sprints.

Une approche couplant l'utilisation de l'entraînement par répétition de sprints à un stress hypoxique permettrait de majorer la capacité des joueurs de sports collectifs à repousser l'apparition de la fatigue en jouant notamment sur l'amélioration de la récupération entre les sprints.



**Figure 4:** Méthodes d'entraînement contribuant à l'amélioration de la performance de la RSA.

## 2 Entraînement en hypoxie

La deuxième section de ce chapitre aborde l'association entre l'entraînement par répétition de sprints et l'exposition à l'hypoxie, qui se réfère à une insuffisance d'apport en oxygène par rapport aux besoins de l'organisme, La deuxième partie de ce chapitre sur laRSA porte sur la

## Chapitre 02 : la capacité à répéter les sprints

---

combinaison de l'entraînement par répétition de sprints à l'exposition hypoxique (*i.e.*, apport insuffisant en oxygène par rapport aux besoins de l'organisme).

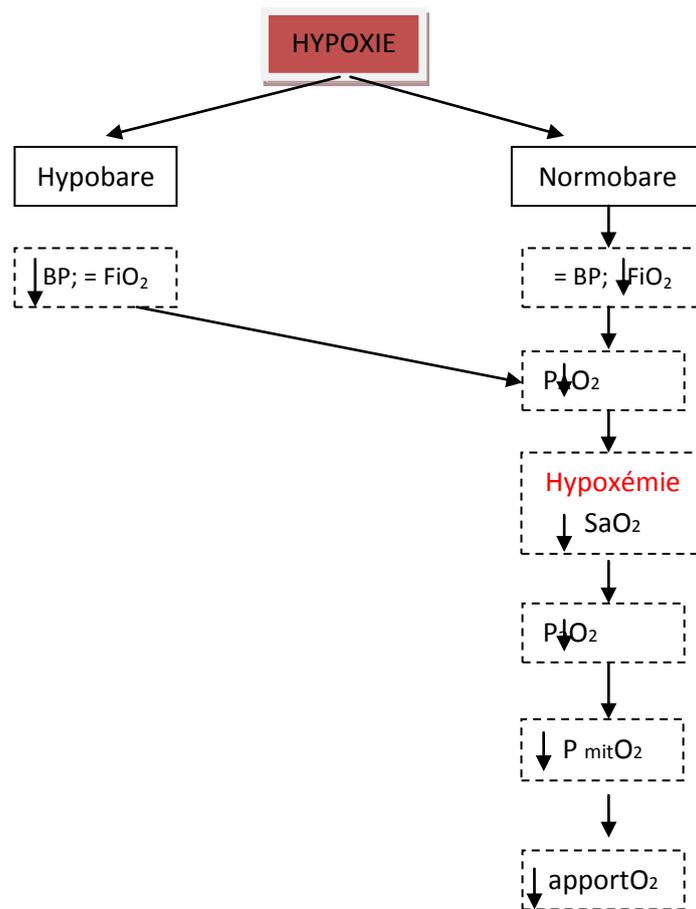
### 2.1 L'utilisation de l'hypoxie pour améliorer la capacité aérobie

#### 2.1.1 Les sources de l'hypoxie

L'hypoxie, également connue sous le nom d'hypoxia en anglais, se réfère à la réduction de l'apport en oxygène à un tissu ou à un organe de l'organisme. Cela peut être causé par une diminution de la pression atmosphérique (par exemple en altitude) ou par une diminution de la fraction d'oxygène dans le mélange respiratoire au profit de celle de l'azote (par exemple dans une chambre ou avec un masque hypoxique). Cette diminution de l'oxygène a un impact sur l'organisme en réduisant la pression partielle d'oxygène dans le sang artériel et la saturation en oxygène ( $SpO_2$ ).

Historiquement, les athlètes d'endurance ont utilisé l'exposition à un environnement hypoxique pour améliorer leur  $VO_{2max}$ , qui se traduit par une meilleure capacité de transport de l'oxygène dans le sang grâce à une augmentation de la production de globules rouges (érythropoïèse), qui sont les transporteurs d'oxygène. En effet, qu'elle soit hypobare (c'est-à-dire une diminution de la pression barométrique sans modification de la fraction inspirée d'oxygène) ou normobare (c'est-à-dire une diminution de la fraction inspirée d'oxygène sans modification de la pression barométrique), l'hypoxie entraîne une baisse de la pression alvéolaire en oxygène ( $PAO_2$ ). Cette diminution de la  $PAO_2$  est responsable de l'adaptation physiologique qui favorise la production accrue de globules rouges et améliore ainsi le transport de l'oxygène dans le corps.

Cela entraîne une diminution de la fixation de l'oxygène sur l'hémoglobine, une baisse de saturation du sang artériel en oxygène ( $SaO_2$ ), une baisse de pression artérielle en oxygène ( $PaO_2$ ) qui se répercute dans les mitochondries ( $P_{mitO_2}$ ). Au final, cela entraîne une diminution de l'apport en oxygène dans les différents tissus. L'intérêt de l'entraînement en hypoxie va être d'améliorer l'apport en oxygène aux muscles actifs en compensant la diminution de  $PAO_2$  et donc la moindre  $SaO_2$  (Figure 3) (Millet et al., 2015).



**Figure 5:** Mécanismes physiologiques induits par l'hypoxie et amenant à une diminution de l'apport en O<sub>2</sub> aux différents tissus de l'organisme. (Millet et al., 2015).

### 2.1.2 Les méthodes d'entraînement en hypoxie

Le panorama des différentes méthodes d'entraînement en hypoxie propose plusieurs combinaisons aux effets différents apportant ainsi des bénéfices spécifiques aux athlètes d'endurance ou de sports collectifs (Figure 4) (Girard et al., 2017). L'entraînement en altitude est utilisé depuis les années 1960 par les athlètes des sports d'endurance sous la forme « *vivre en haut s'entraîner en haut* » (*i.e.*, Live High-Train High ;LHTH) (Dill and Adams, 1971) . L'objectif de cette méthode est de solliciter une exposition prolongée dans des conditions hypoxiques afin d'augmenter la concentration en hémoglobine et la masse en globules rouges (Berglund, 1992), qui sont des déterminants majeurs pour la performance en endurance (Kanstrup and Ekblom, 1984). De plus, les sports collectifs utilisent de plus en plus ce stimulus d'entraînement en période d'acclimatation à une compétition se déroulant en altitude

## Chapitre 02 : la capacité à répéter les sprints

ou lors de stage d'avant-saison (Billaut and Aughey, 2013). Toutefois, l'exposition prolongée à un environnement hypoxique (*i.e.*, hypoxie chronique) peut avoir des effets délétères qui se manifestent par : 1- une diminution de l'intensité d'entraînement pouvant conduire au désentraînement, 2- au mal aiguë des montagnes, 3- aux difficultés d'acclimatation (Böning, 1997), et 4- à la dégradation musculaire à des altitudes élevées (Hoppeler et al., 1990).

Afin de bénéficier des effets d'une exposition prolongée à l'hypoxie sans avoir les impacts délétères cités précédemment, de nouvelles modalités d'entraînement en hypoxie sont récemment apparues avec le « *vivre en haut s'entraîner en bas* » (Live High-Train Low ;LHTL) (Levine and Stray-Gundersen, 1997) et proposent différentes modalités : méthodes terrestres, artificielles, et/ou avec supplémentations en oxygène.

Dernièrement, « *le vivre en bas s'entraîner en haut* » (Live Low-Train high ; LLTH) (Geiser et al., 2001) est une troisième et dernière méthode de travail en condition hypoxique qui consiste à réaliser des expositions locales ou en environnement ambiant (*i.e.*, chambre hypoxique contenant un mélange appauvri en oxygène). Cette modalité s'avère être la plus pertinente pour les sports collectifs d'un point de vu application pratique et impacts physiologiques sur la performance. En effet, le LLTH propose diverses combinaisons parmi lesquelles on retrouve la répétition de sprints en hypoxie (RSH) (Faiss et al., 2013a) et celle induite par hypoventilation à bas volume pulmonaire (RSH-VHL) (Trincat et al., 2017). Ces modalités d'entraînement révolutionnaires pour les sports collectifs consistent à répéter des sprints de courtes durées entrecoupés de brèves périodes de récupération.

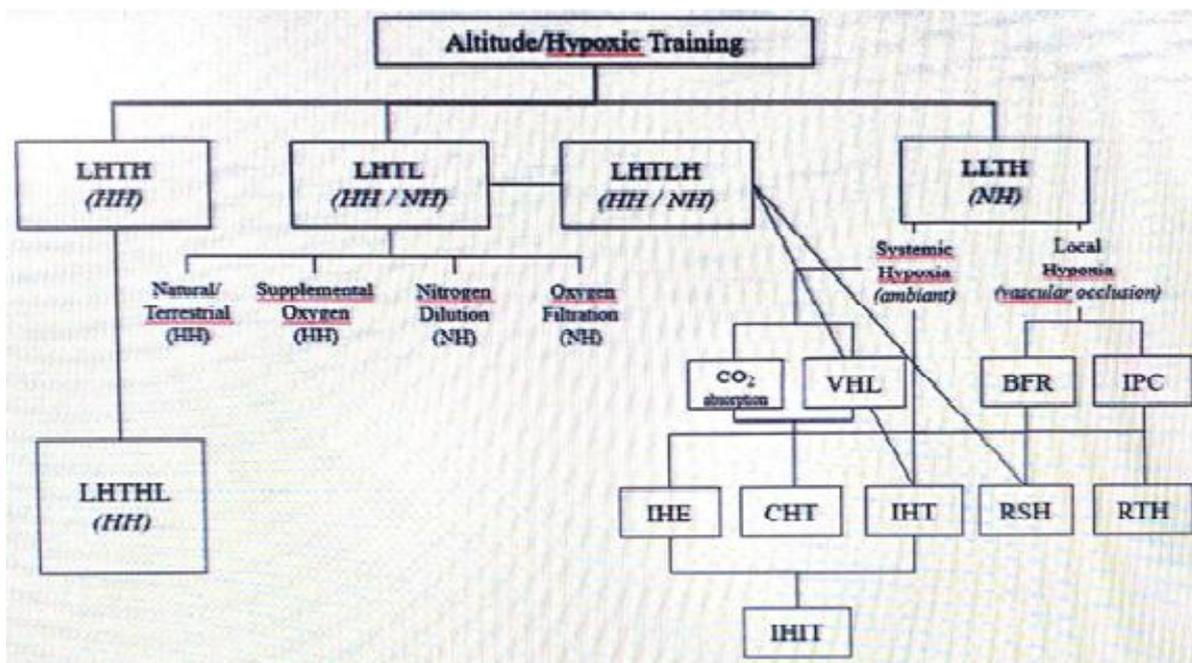


Figure 6: Panorama des différentes méthodes d'entraînement en altitude/hypoxie pour

## Chapitre 02 : la capacité à répéter les sprints

---

*différents athlètes. D'après Girard et al. (2017).*

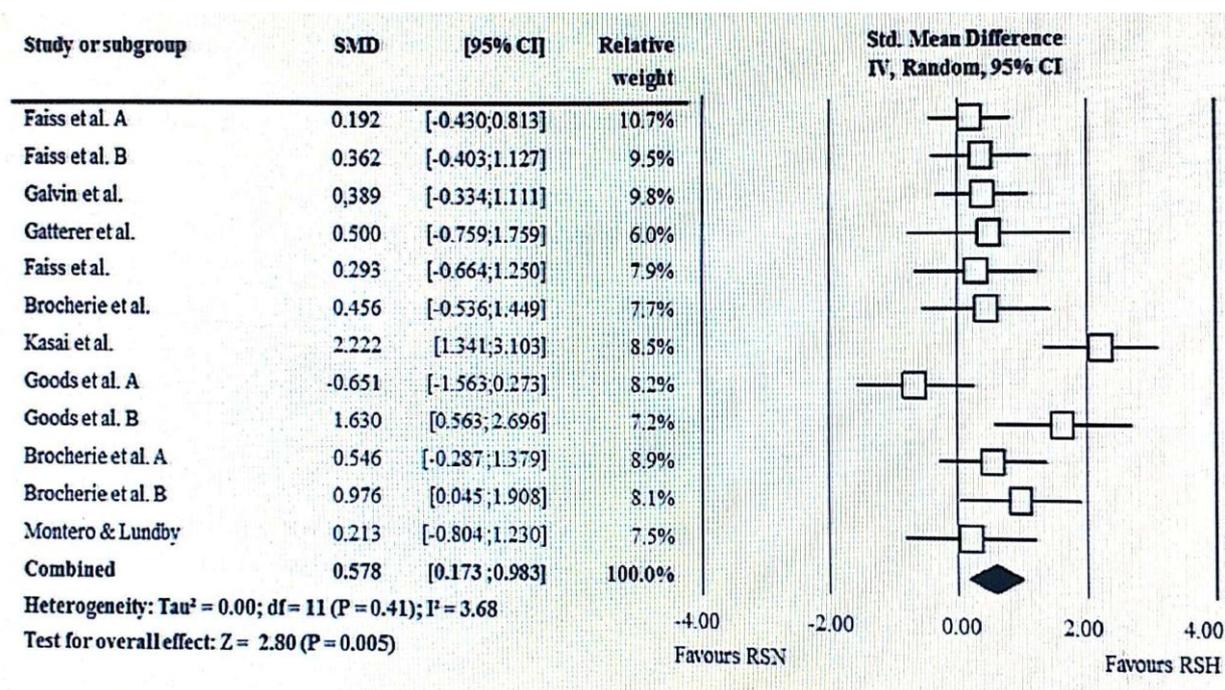
*BFR, blood flow restriction; CHT, continuous hypoxic training; CO2 absorption, rebreathing with a mask; HH, hypobaric hypoxia; IHE, intermittent hypoxic exposure; IHIT, IHE during interval-training; IHT, interval hypoxic training; IPC, ischemic pre-conditioning; LHTH, live-high train high; LHTL, live high-train low; LLTH, live low-train high; LHTHL, live high-train high and low; LHLLH, live high-train low and high; NH, normobaric hypoxia; RSH, repeated sprint in hypoxia; RTH, resistance training in hypoxia; VHL, voluntary hypoventilation at low lung volume.*

### 2.2 Optimisation de la RSA par l'exposition à l'hypoxie

#### 2.2.1 Les sources du RSH (Répétition de Sprints en Hypoxie)

La répétition de sprints en hypoxie (RSH) présente des effets positifs et significatifs sur l'amélioration de la performance dans les sports collectifs. Cette méthode d'entraînement permet de renforcer la performance globale de l'équipe en retardant l'apparition de la fatigue chez les joueurs lors d'efforts intenses et répétés tels que les courses (Figure 5). Plusieurs études ont comparé l'efficacité de l'entraînement en RSH à l'entraînement en répétitions de sprints en normoxie (RSN) (Tableau 1) et ont démontré que la RSH était une méthode d'entraînement efficace pour améliorer la performance physique. En effet, elle permet d'augmenter à la fois la performance maximale et la performance moyenne lors de répétitions de sprints jusqu'à l'épuisement. Dans une récente méta-analyse (Brocherie et al., 2017) réalisée à partir des données de 9 études, la performance maximale (SMD = 0.46 ; p = 0.05) et la performance moyenne (SMD = 0.58 ; p = 0.005) étaient améliorées avec le RSH en comparaison au RSN durant une répétition de sprints mais pas le VO<sub>2</sub>max (SMD = 0.23 ; p = 0.20). Ces améliorations sur la performance résultent d'adaptations physiologiques permettant à l'organisme de répéter un plus grand nombre de sprints.

## Chapitre 02 : la capacité à répéter les sprints



**Figure 7:** Graphique en forêt de la différence moyenne standardisée (SMD) entre l'effet de *Les carrés représentent la SMD pour chaque étude et le diamant représente la moyenne des SMD des études. Trois articles présentaient des groupes d'études différents distingués par la lettre A (vs. RSN) et la lettre B (vs. Groupe contrôle). 95% CI, intervalle de confiance ; df, degrés de liberté ; IV, variance inverse. (Brocherie et al., 2015; Faiss et al., 2013b, 2015; Galvin et al., 2013; Gatterer et al., 2014; Goods et al., 2015; Kasai et al., 2015; Montero and Lundby, 2017)*

**Tableau 4:** Effets des différentes études réalisées sur l'entraînement par répétitions de *sprints en hypoxie et les effets sur la performance.*

*NH, normobaric hypoxia ; RSN, repeated-sprint training in hypoxia ; RSN, repeated-sprint training in normoxia; Pmax, puissance maximale; VO2max, consommation maximale en oxygène ; Pmoy, puissance moyenne ; NR, non renseigné; SIH, intermittent sprint training in hypoxia ; YYIR, Yo-Yo intermittent recovery; r, récupération entre répétition; R, récupération entre série. La couleur verte fait référence à une amélioration significative après un entraînement RSH*

Hauteur	Sujets	Altitude (m)	Groupe & sujets (n)	Exercice protocole entraînement	Protocole type (Séances / Semaine / Série / répétition / Récupération)	Effets entraînement RSH	Effets entraînement RSN
Galvin et coll. (2013)	Joueurs de rugby à XV	3500 (NH)	RSH (15) RSN (15)	Course tapis roulant	12 séances en 4 semaines : 10 x 6 s r = 30 s	<b>+33% Yo-Yo IR</b>	+14% Yo-Yo IR
Faiss et coll. (2013)	Cyclistes modérément entraînés	3000 (NH)	RSH (20) RSN (20) CON (10)	Cyclisme	8 séances en 4 semaines : 3 x 5 x (10 s ; r = 20 s) R = 5 min	<b>+6% Pmoy sprints</b> <b>+38% sprints en plus lors d'un RSA</b>	+7% Pmoy sprints Pas plus de sprints lors d'un RSA
Gatterer et coll. (2014)	Joueurs de football	3000 (NH)	RSH (5)	Course	7-8 séances en 5 semaines : 3 x 5 x 10 s course navette 4.5 m aller-retour r = 20 s	<b>+20% Yo-yo IR</b> <b>-38% pente courbe fatigue RSA</b>	+21% Yo-yo IR +9% pente courbe fatigue RSA
Brocheri et coll. (2015)	Joueurs de football	2900 (NH)	RSH (8) RSN (8)	Course	10 séances en 5 semaines : 5 x 4 (5 s ; r = 45 s)	<b>-4% temps 1er sprint</b> <b>-4% temps sprint cumulé</b>	-2% temps 1er sprint -2% temps sprint cumulé
Faiss et coll. (2015)	Skieurs de fond très entraînés	3000 (NH)	RSH (9) RSN (8)	Ski de Fond ergomètre double poussée	6 séances en 2 semaines : 4 x 5 (10 s ; r = 20 s) R1 & R3 = 4 min 50, R2 = 9 min 50	<b>+25% Pmax sprints</b> <b>+57% sprints en plus lors d'un RSA</b>	+21% Pmax sprints Pas plus de sprints lors d'un RSA
Kasai et coll. (2015)	Joueurs de Lacrosse	3000 (NH)	RSH (16) RSN (16)	Cyclisme	8 séances en 4 semaines : 2 x 10 (7 s ; r = 30 s)	<b>+5% Pmax sprints sur ergocycle</b> <b>+9.7% Pmoy sprints</b> Evolution VO2max non significative	+1.5% Pmax sprints RSN +6% Pmoy sprints Evolution VO2max non significative
Montero et Lundby (2015)	Cyclistes entraînés en endurance	3000 (NH)	Crossover: RSN RSH (15)	Cyclisme	12 séances en 4 semaines : 2 x 10 (7 s ; r = 30 s)	Des progrès sont observés avec les deux méthodes, sans différence entre les deux.	Des progrès sont observés avec les deux méthodes, sans différence entre les deux.
Goods et coll. (2015)	Joueurs de football australien « semi-élite »	3000 (NH)	RSH (5) RSH (9) RSN (10) Contrôle (9)	Cyclisme	15 séances en 5 semaines : 3 x 7 (5 s ; r = 15-35 s) R = 3 min ; + 1 sprint/série/semaine	<b>+4.7% Pmax</b> <b>+10.3% Pmoy</b> <b>+2.3% temps moyen sprint (course)</b>	<b>+8.6% Pmax</b> <b>+13.6% Pmoy</b> <b>+1.8% temps moyen sprints (course)</b>
Hamlin et coll. (2017)	Joueurs de rugby bien entraînés	3000 (NH)	RSH (8) ; RSN (10)	Cyclisme	6 séances en 3 semaines + 3 post-tests en 2 semaines + 2 séances en 1 semaines : 4 x 5 (5 s – 25 s actif) R = 5 min	-2.0 ± 2.4% -2.2 ± 2.4% , -1.6 ± 2.4% RSA Post 3, Post 4, Post 5, respectivement. La pente de vitesse lors des 8 sprints répétés était significativement améliorée après RSH.	Pas de différence entre les groupes sur les performances du YYIR1.
Kasai et coll. (2017)	Sprinters universitaires	3000 (NH)	RSH (10) RSN (9)	Courseur tapis	10 séances en 5 jours : <b>Matin</b> : 3 x (5 x 6 s – 24 s) R = 8 min + R = 15 min 1 x 4 x 20 s r1 & r3 = 5 min, r2 = 15 min) <b>Après-midi</b> : 3 x 5 (6 s -36 s) R = 8 min + R = 15 min 1 x 4 x 20 s – 40 s	<b>+3% Pmax</b> <b>+79.9 ± 10.4% glycogène musculaire</b> <b>+3.9 ± 1.4% PCr</b>	<b>+56.3 ± 11.2%</b> <b>+2.7 ± 1.1%.PCr (RSN)</b>
Brechbuhl et coll. (2018)	Tennisman professionnel Rookie	3300 (NH)	RSH (1)	Course en navette	6 séances en 2 semaines : 4 x 5 (6 s – 24 s actif)	-4.5% temps sprint isolé ; -3.1% durée totale RSA ; -16.7% diminution de sprint ; +21.4% distance totale couverte YYIR2	NR
Gatterer et coll. (2018)	Athlètes de sports collectifs	2200 (NH)	RSH (6) ; SIH (5)	Cyclisme	9 séances en 3 semaines : RSH = 3 x 5 x (10 s – 20 s) R = 5 min ; SIH = 4 x 30 s ; R = 5 min	<b>+96.7 ± 145.6 m YYIR2</b> ; -0.138 ± 0.14 s temps moyen RSA ; Amélioration de la réoxygénation durant la répétition de sprints	<b>SIH = +100.0 ± 51.6 m YYIR2</b> ; -0.107 ± 0.08 s. Pas d'amélioration de la ré-oxygénation durant la répétition de sprints

### 2.2.2 Impacts physiologiques sur la performance

L'entraînement dans un milieu hypoxique provoque des réponses complexes. Cela entraîne des perturbations au niveau physiologique telles que la resynthèse de la PCr, l'activité enzymatique  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ -ATPase, l'oxygénation cérébrale qui vont impacter négativement la réalisation d'accélération, et le travail à haute intensité (Balsom et al., 1994). De plus, l'entraînement en hypoxie impacte les fonctions musculaires et un grand nombre de gènes intermédiaires des facteurs induisant l'hypoxie (HIFs) (Lundby et al., 2009). De manière plus spécifique, la RSH impacterait plusieurs mécanismes physiologiques (Faiss et al., 2013a) que nous allons énumérer par la suite.

Tout d'abord, il y aurait une amélioration de l'extraction et de l'utilisation de l'oxygène microvasculaire au niveau des fibres rapides (fibres de type 2). En effet, elles sont recrutées de manière préférentielles durant les sprints d'un entraînement RSH (Hautier et al., 1996) et ajusteraient une plus grande demande énergétique avec une plus grande extraction d'oxygène que les fibres lentes (fibres de type 1) (McDonough et al., 2005) lorsque le niveau d'oxygène diminue dans le muscle. De ce fait, la RSH induirait des adaptations bénéfiques au niveau musculaire en améliorant l'hémoglobine totale (indicateur de la perfusion musculaire), l'oxygénation musculaire, et l'utilisation de l'oxygène par les fibres rapides (Faiss et al., 2013b). De plus, il a été récemment démontré que l'oxygénation cérébrale diminuait au cours d'un exercice de type RSH expliquant la diminution de la capacité de travail durant l'effort (Galvin et al., 2013). Toutefois, un protocole de type RSH sur ergocycle en aigüe (Curtelin et al., 2018), et un entraînement comprenant 12 sessions de 10 sprints de 6 s (Galvin et al., 2013) entraîne une augmentation de l'oxygénation cérébrale qui permettrait de maintenir la commande nerveuse centrale contribuant ainsi à améliorer la capacité de travail.

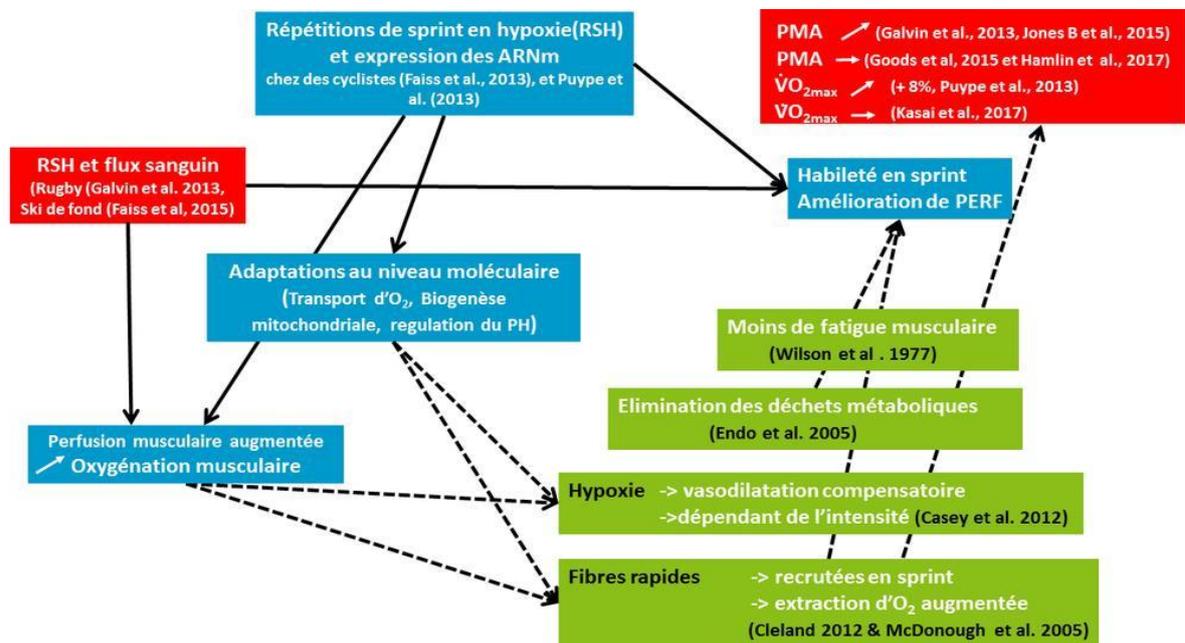
Une limitation de la disponibilité en oxygène dans le sang entraîne une vasodilatation compensatoire du flux sanguin afin d'ajuster efficacement l'apport d'oxygène au niveau musculaire. De plus, cette vasodilatation compensatoire est influencée par l'intensité de l'exercice, et la vasodilatation sera d'autant plus importante que l'intensité de l'effort sera maximale (Casey and Joyner, 2012). Au plus l'intensité d'effort est importante, au plus les fibres rapides vont être recrutées et vont bénéficier d'une meilleure perfusion sanguine par la vasodilatation dans la mesure où ces fibres rapides ont une meilleure capacité d'extraction de l' $\text{O}_2$  pour mieux exploiter les faibles niveaux d'oxygène (Cleland et al., 2012; McDonough et al., 2005).

L'intensité de l'entraînement en hypoxie influence les adaptations moléculaires au niveau

## Chapitre 02 : la capacité à répéter les sprints

musculaire avec des adaptations compensant la réduction de disponibilité de l'oxygène (Hoppeler and Vogt, 2001). Effectivement, certaines études (Faiss et al., 2013b) ont démontré une augmentation de l'expression des ARNm impliqués dans la signalisation (HIF-1 $\alpha$ ), le transport de l'oxygène (Mb), la régulation du pH (CA3 et lactico-déshydrogénase) et la glycolyse (MCT-4). Parallèlement, on observe une diminution des facteurs impliqués dans la biogénèse mitochondriale (TFAM et PGC-1 $\alpha$ ). Ces adaptations moléculaires suite à un protocole d'entraînement RSH suggèrent une amélioration potentielle de l'activité glycolytique en complément de l'activité oxydative au niveau musculaire (Figure 6).

L'amélioration de la performance se traduit également par la capacité à maintenir une puissance élevée au cours des différents sprints qui semble liée à la disponibilité de [PCr] et des ions H<sup>+</sup>. En effet, la resynthèse de la PCr est augmentée avec une accumulation de phosphate inorganique (Pi) dans le muscle après un entraînement en répétition de sprints (Bogdanis et al., 1996). Deux études qui ont réalisé des biopsies musculaires (Faiss et al., 2013b ; Puype et al., 2013) ont observé une amélioration de la capacité tampon dans des conditions de flux sanguin élevé. Cela a pour effet de retarder l'apparition de la fatigue musculaire.



**Figure 8 :** Figure 6 : Mécanismes physiologiques sous-jacents à l'efficacité du RSH. D'après (Brechtbuhl, 2018; Millet et al., 2015)

O<sub>2</sub>, Oxygène ; ARNm, acide ribonucléique messenger ; pH, potentiel hydrogène (unité de mesure de l'acidité).

### 2.2.3 Hypoventilation et répétitions de sprints

#### 2.2.3.1 Historique de L'hypoventilation

Pendant les années 1950, les premières formes d'entraînement en hypoventilation ont émergé, principalement chez les coureurs à pied des pays de l'Est. Parmi eux, Emil Zatopek est l'un des plus célèbres. Durant cette période, ces coureurs avaient pour habitude de s'entraîner en réduisant volontairement leur fréquence respiratoire.

Vers les années 1970, des réflexions autour des effets de l'altitude sur les performances sportives, amenèrent un des plus grands entraîneurs de natation de l'époque (James Counsilman) à émettre l'hypothèse que le fait de respirer moins fréquemment pourrait simuler un entraînement en altitude et donc apporter des adaptations physiologiques dans le but d'améliorer la performance. C'est ainsi que l'entraînement en réduction respiratoire, par la suite appelé «entraînement en hypoxie», connut un grand succès dans le monde de la natation (Woorons, 2014).

À partir des années 1980, les premières études scientifiques sur l'entraînement en hypoventilation ont été publiées. Bien que cette méthode commençait à gagner en popularité, même dans des sports autres que la natation (comme l'athlétisme), certaines recherches ont montré qu'elle n'avait qu'un effet hypercapnique, sans réelle réduction de l'oxygène dans le sang.

Dans les années 2000, le Dr Xavier Woorons et ses collaborateurs ont trouvé une solution pour résoudre ce problème de réduction de l'oxygène, ce qui a conduit à la création de la technique de l'expirer-bloquer (hypoventilation à bas volume pulmonaire). Cette nouvelle approche visait à améliorer l'efficacité de l'entraînement en hypoventilation en augmentant la réduction de l'oxygène dans le sang.

#### 2.2.3.2 Les stratégies d'hypoventilation volontaire

L'entraînement en hypoventilation est une méthode qui vise à restreindre la quantité d'air qui pénètre dans les poumons pendant l'exercice. Elle implique l'utilisation de blocages respiratoires précisément dosés. Il existe deux types d'hypoventilation en fonction de la manière dont les blocages respiratoires sont réalisés : l'hypoventilation à haut volume pulmonaire et l'hypoventilation à bas volume pulmonaire.

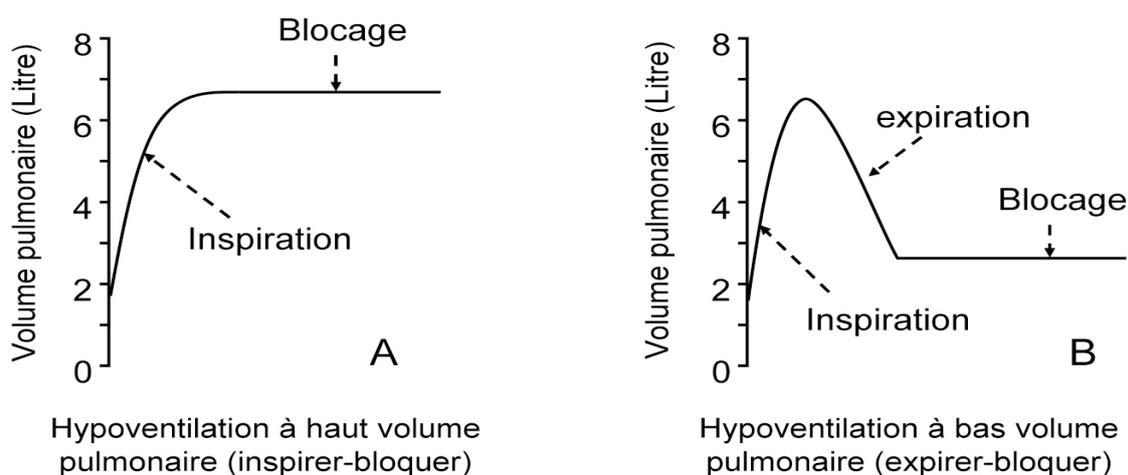
L'hypoventilation à haut volume pulmonaire consiste à retenir une quantité maximale d'air dans les poumons lors des blocages respiratoires. Pour cela, il faut bloquer sa respiration juste après avoir inspiré.

En revanche, lors de l'hypoventilation à bas volume pulmonaire, les blocages respiratoires

## Chapitre 02 : la capacité à répéter les sprints

sont effectués après avoir partiellement vidé les poumons de leur air. Pour réaliser cette forme d'hypoventilation, il faut d'abord expirer, puis bloquer sa respiration pendant quelques secondes. C'est ce qu'on appelle la technique de l'"expirer-bloquer".

Dans notre étude, nous nous intéressons spécifiquement à cette approche novatrice d'hypoventilation à bas volume pulmonaire pendant l'exercice, connue sous le nom voluntary hypoventilation at low lung volume (VHL). L'utilisation de cette méthode respiratoire pendant l'exercice entraîne des effets d'hypoxie (réduction de l'oxygène) et d'hypercapnie (augmentation du dioxyde de carbone).



**Figure 9:** Techniques d'hypoventilation volontaire.

(<https://www.hypoventilation-training.com/expirer-bloquer.jpg>)

### 2.2.3.3 Les réponses physiologiques de l'exercice en VHL

L'exercice couplé à une expiration prolongée jusqu'au volume résiduel permet d'obtenir une hypoxémie et une augmentation de la pression artérielle en dioxyde de carbone ( $\text{PaCO}_2$ ) (effet hypercapnique) (Woorons et al., 2007b). Tout d'abord, pour obtenir une diminution significative de  $\text{SpO}_2$  sans être dans un environnement hypoxique, il faut que l'hypoventilation volontaire soit réalisée à bas volume pulmonaire proche de la capacité résiduelle fonctionnelle ou de la réserve ventilatoire (Woorons al., 2007a; Yamamoto et al., 1987). Cette technique de blocage respiratoire induit une diminution des réserves alvéolaires en oxygène et conduit à une plus grande inégalité dans le ratio ventilation/perfusion (V/Q) (Morrison et al., 1982) entraînant par conséquent une différence alvéolaire-artérielle en oxygène plus large ( $\text{PAO}_2 - \text{PaO}_2$ ) et une désaturation artérielle en oxygène sévère (Woorons et al., 2007a) (*i.e.*,  $(\text{SpO}_2) < 88\%$ , (Dempsey and Wagner, 1999). Cette modalité d'entraînement est ainsi reconnue comme étant une variante des méthodes d'entraînements

## Chapitre 02 : la capacité à répéter les sprints

---

hypoxiques (Girard et al., 2017).

Ensuite, l'exercice sous-maximal associé à la VHL induit en complément d'une désaturation artérielle sévère, une augmentation de PaCO<sub>2</sub>, un plus faible niveau de pH et une augmentation de la lactatémie (Woorons et al., 2007b). L'effet hypercapnique est un phénomène qui survient lorsque la PaCO<sub>2</sub> devient importante et induit une acidose respiratoire. L'exercice en VHL augmenterait la contribution de la filière anaérobie glycolytique et entraînerait des adaptations au niveau musculaire pour une meilleure utilisation de l'oxygène et probablement une plus grande capacité tampon pour avoir un impact positif sur la performance anaérobie (Woorons et al., 2010).

De plus, l'exercice sous-maximal (65% VO<sub>2</sub>max) avec VHL augmente la désoxygénation musculaire ainsi que la lactatémie en comparaison à un exercice réalisé avec une respiration normale (Woorons et al., 2010).

Enfin, il a été démontré qu'après un protocole d'entraînement de 4 semaines comprenant 12 séances de 24 minutes à 70% VO<sub>2</sub>max, le pH et la concentration en bicarbonate étaient augmentés à intensité sous-maximale mais pas à l'exercice maximal (Woorons et al., 2008). Grâce à la combinaison des effets hypoxique et hypercapnique, ce type d'exercice pourrait donc induire une plus faible oxygénation musculaire que le même exercice réalisé en hypoxie avec une respiration normale et induire à l'issue d'une période d'entraînement une amélioration de performance similaire à celle obtenue avec le RSH (Woorons et al., 2010).

### **2.2.3.4 Effets de l'entraînement en RSH-VHL sur la performance**

L'hypoventilation à haute intensité d'exercice consiste à répéter des sprints en bloquant sa respiration à bas volume pulmonaire (*i.e.*, RSH-VHL) (Trincat et al., 2017; Woorons et al., 2017). Une première étude (Woorons et al., 2017) ne rapporte pas de différences en termes de puissance pic et moyenne développées durant une exposition aiguë (2 séries de 8 répétitions (6s sprint – 24 s récupération)). Après six sessions d'entraînement de RSH-VHL chez des nageurs compétitifs (2 séries de 16 sprints sur 15m ; 30 s récupération), une amélioration de la performance au RSA (+35%) est retrouvée pour le groupe RSH-VHL chez les nageurs (Trincat et al., 2017) similaire aux résultats retrouvés en RSH chez des cyclistes (+38% ; (Faiss et al., 2013b)) et chez des skieurs de fonds (+58% ; (Faiss et al., 2015)).

### 2.2.3.5 Effets physiologiques de l'entraînement en RSH-VHL

À ce jour, deux études ont examiné les réponses, tant aiguës que chroniques, en termes de saturation pulsée de l'hémoglobine en oxygène (SpO<sub>2</sub>), d'oxygénation musculaire (concentration en oxyhémoglobine musculaire [O<sub>2</sub>Hb], concentration en désoxyhémoglobine/myoglobine musculaire [HHb]), de lactatémie ([La]), de consommation d'oxygène et de perception de l'effort lors de l'exercice (rating of perceived exertion, RPE) (Trincat et al., 2017; Woorons et al., 2017).

La RSH-VHL induit une désaturation artérielle et une désoxygénation musculaire durant l'exercice (Woorons et al., 2010, 2017) amenant à un état hypoxique similaire à celui obtenu à des altitudes supérieures à 2000 m (Woorons et al., 2011). Effectivement, une première étude (Woorons et al., 2017) indique que le groupe RSH-VHL a passé 5,1% de son temps d'entraînement en état d'hypoxémie sévère (< 88%), tandis qu'une autre étude (Trincat et al., 2017) mentionne une durée d'hypoxémie sévère plus élevée, soit 12% du temps d'entraînement.

De plus, le RSH-VHL entraîne une plus grande désoxygénation musculaire lors de la deuxième partie de l'entraînement. En effet, les concentrations musculaires d'oxyhémoglobine/myoglobine ([O<sub>2</sub>Hb]) diminuent de manière significative en RSH-VHL lors des sprints 1, 5, 6, 7 et 8 de la deuxième série, tandis que les concentrations musculaires de désoxyhémoglobine/myoglobine ([HHb]) augmentent en RSH-VHL du sprint 5 au sprint 8 de la deuxième série. De plus, la [La] max du groupe RSH-VHL était significativement plus faible que celle du groupe normoxie ( $10.3 \pm 2.9$  vs.  $13.8 \pm 3.5$  mmol.l<sup>-1</sup>) à la fin d'un exercice aiguë (Woorons et al., 2017). Toutefois, après six séances d'entraînement, il a été montré que la [La]max du groupe RSH-VHL avait significativement augmenté ( $11.5 \pm 3.9$  vs.  $7.9 \pm 3.7$  mmol.l<sup>-1</sup>) alors que la [La]max demeurait inchangée dans le groupe normoxie ( $10.2 \pm 2.0$  vs.  $9.0 \pm 3.5$  mmol.l<sup>-1</sup>). Les auteurs de cette étude ont ainsi établi une forte corrélation entre l'augmentation du nombre de sprints réalisé et la [La]max pour le groupe RSH-VHL, probablement grâce à une amélioration de la glycolyse anaérobie (Trincat et al., 2017). Enfin, le RSH-VHL entraîne une plus grande consommation d'oxygène durant les périodes de récupération suivant les sprints dans la deuxième moitié de l'entraînement (Woorons et al., 2017). Enfin, la RPE était similaire entre les groupes RSH-VHL et contrôle à l'issue d'un entraînement de répétition de sprints (Trincat et al., 2017; Woorons et al., 2017).

Dans la prochaine section de ce mémoire, nous présenterons la méthodologie de notre étude. Ensuite, nous aborderons la mise en pratique de cette technique innovante dans le contexte du

## Chapitre 02 : la capacité à répéter les sprints

---

football, en sollicitant d'une part la filière énergétique anaérobie lactique par le biais de la répétition de sprints, et d'autre part en induisant une hypoxémie grâce à la technique d'hypoventilation volontaire à bas volume pulmonaire.

# Cadre pratique

# **Chapitre 1 : Méthodologie de la recherche**

## 1 Objectifs de la recherche :

Les objectifs principaux de notre projet de recherche sont:

- 1) Évaluer l'efficacité de l'entraînement en hypoventilation volontaire pour améliorer la capacité à répéter des sprints chez les footballeurs.
- 2) Comparer les performances des footballeurs qui ont suivi un programme d'entraînement en hypoventilation volontaire avec ceux qui ont suivi un programme d'entraînement en normoxie, afin de déterminer les avantages potentiels de cette méthode spécifique.
- 3) Analyser les changements dans la capacité à récupérer entre les sprints chez les footballeurs qui ont été soumis à un entraînement en hypoventilation volontaire, en mettant l'accent sur la fatigue et la performance subséquente.

## 2 Importance de la recherche :

La recherche sur l'impact de l'entraînement en hypoventilation volontaire sur la capacité à répéter des sprints chez les footballeurs de l' R.B.B.H présente plusieurs implications et importance potentielle. Voici quelques raisons pour lesquelles cette recherche peut être considérée comme importante :

- 1) Amélioration des performances athlétiques : Comprendre comment l'entraînement en hypoventilation volontaire peut affecter la capacité des footballeurs à répéter des sprints peut ouvrir de nouvelles possibilités pour améliorer leurs performances. Si cette méthode d'entraînement s'avère efficace, elle peut être intégrée aux programmes d'entraînement existants pour aider les joueurs à atteindre un meilleur niveau de forme physique et d'endurance.
- 2) Optimisation de l'entraînement : En étudiant les effets physiologiques de l'entraînement en hypoventilation volontaire, cette recherche peut contribuer à une meilleure compréhension des mécanismes sous-jacents et des adaptations spécifiques induites par cette méthode d'entraînement. Ces connaissances peuvent permettre de développer des protocoles d'entraînement plus précis et efficaces, adaptés aux besoins spécifiques des footballeurs.
- 3) Prévention des blessures : L'amélioration de la capacité à répéter des sprints peut avoir un impact sur la fatigue musculaire et la prévention des blessures chez les footballeurs.

Une meilleure endurance peut réduire les risques de blessures liées à la fatigue et permettre aux joueurs de maintenir un niveau de performance élevé tout au long d'un match.

- 4) Avancement des connaissances scientifiques : La recherche sur l'entraînement en hypoventilation volontaire dans le contexte du football contribue à l'expansion des connaissances scientifiques dans le domaine de la performance sportive. En explorant cette méthode d'entraînement spécifique, vous contribuez à la littérature existante et à la compréhension globale des stratégies d'entraînement pour les athlètes.

En bref, la recherche sur l'impact de l'entraînement en hypoventilation volontaire sur la capacité à répéter des sprints chez les footballeurs de R.B.B.H Bouhamza, pourrait avoir des contributions importantes pour l'amélioration des performances athlétiques, l'optimisation de l'entraînement, la prévention des blessures, et l'avancement des connaissances scientifiques.

### **3 Tâches de la recherche :**

Afin d'atteindre les objectifs de cette recherche on a suivi les tâches suivantes :

- 1) Revue de littérature : Effectuation d'une revue approfondie de la littérature existante sur l'entraînement en hypoventilation volontaire, la capacité à répéter les sprints et la récupération chez les footballeurs. Identification des travaux antérieurs pertinents, les lacunes dans les connaissances actuelles et les théories sous-jacentes.
- Définition des critères de sélections des participants pour les footballeurs de R.B.B.H de Bouhamza et R.C.Seddouk qui participeront à cette étude.
  - Evaluation de la RSA des sujets avant d'entamer l'entraînement en hypoventilation volontaire
  - Elaboration d'un programme d'entraînement en hypoventilation volontaire pour les participants, avec des instructions claires sur les techniques à utiliser, la fréquence et l'intensité de l'entraînement.
  - Superviser l'entraînement des participants pour assurer que les protocoles sont respectés et que les exercices sont effectués en toute sécurité.
  - Evaluation de la RSA des participants juste après l'entraînement en hypoventilation volontaire.
  - Analyse des données : Analyse des données collectées à l'aide de méthodes statistiques appropriées. Examiner les résultats pour déterminer si l'entraînement en

## Chapitre 01 : méthodologie de la recherche

hypoventilation volontaire a eu un impact significatif sur la capacité à répéter des sprints chez les footballeurs.

- Interprétation des résultats : Interprétation des résultats de notre étude et comparaison avec nos hypothèses de recherche. Discussion des implications et de la signification des résultats obtenus, en tenant compte des travaux antérieurs et des limites de votre étude.
- Rédaction du mémoire : Présentation de nos résultats, nos analyses et nos conclusions de manière claire et organisée dans notre mémoire de fin d'études. Fournir un contexte théorique solide, une méthodologie détaillée, une discussion approfondie des résultats et des références appropriées.

### 4 Échantillon de la recherche :

L'échantillon de cette étude était constitué de 30 footballeurs amateurs seniors masculins dont 15 joueurs du club de Bouhamza (I.R.B.B.H) représentant l'échantillon expérimental et 15 joueurs du club de Seddouk (R.C.S) représentant l'échantillon témoin, de la saison 2022/2023.

**Tableau 5:** caractéristiques de l'échantillon.

Indices	groupe témoin	groupe expérimental	T. Calculé	T. Tabulé	Signification au seuil 0,05
Taille (cm)	175 ± 6,24	174,20 ± 6,09	0,5	2,04	NS
Poids (kg)	71,46 ± 6,28	74,73 ± 8,88	1,6	2,04	NS
S <sub>moy</sub> (sec)	5,57 ± 0,20	5,70 ± 0,15	1,87	2,04	NS
P <sub>moy</sub> (w)	528,01 ± 43,64	504,98 ± 30,87	1,74	2,04	NS
S <sub>dec</sub> (%)	13,22 ± 4,83	17,06 ± 7,47	1,67	2,04	NS
FI	5,52 ± 1,47	6,40 ± 2,46	1,18	2,04	NS
RPE	7,8 ± 0,77	7,33 ± 0,82	1,60	2,04	NS

### 5 Outils et moyens de recherche utilisés :

#### 5.1 Analyse bibliographique :

La méthode que nous utiliserons pour réaliser notre travail consiste en une revue de la littérature sur notre thème. Cette approche implique l'analyse de divers documents tels que des

# Chapitre 01 : méthodologie de la recherche

---

livres, des revues, des mémoires de fin d'études et des conférences. Nous utiliserons également des sites Internet pertinents pour compléter notre recherche. Cette analyse documentaire nous permettra d'obtenir des informations théoriques importantes pour mener à bien notre travail.

## 5.2 Méthode expérimentale :

Dans la présente étude on a suivi la méthode expérimentale. Cette méthode consistait de tester un protocole d'entraînement en hypoventilation volontaire sur la capacité à répéter des sprints sur 15 footballeurs (groupe expérimentale). Afin de déterminer l'impact de cette méthode d'entraînement et son apport par rapport à un autre groupe (témoin) qui s'entraînait dans des conditions de respiration normale, en comparant leurs résultats aux tests de terrains programmés.

## 5.3 Méthode descriptive :

Pour analyser les données recueillies, une approche descriptive a été adoptée. Cette méthode statistique a permis de décrire les caractéristiques des variables étudiées, telles que les moyennes, les écarts-types, et les distributions. Elle a également été utilisée pour présenter les résultats sous forme de tableaux, de graphiques et de commentaires. L'approche descriptive a fourni une vision détaillée et claire des données collectées, facilitant ainsi leur interprétation et leur compréhension.

## 5.4 Démarche pratique :

Nous avons prévu de suivre plusieurs étapes;

- 1) Effectuer le même test physique sur les deux groupes.
- 2) mettre en place un protocole d'entraînement en hypoventilation volontaire de 6 semaines (12 séances d'entraînement).
- 3) Utilisez l'échelle de Borg pour évaluer la perception de l'effort des participants lors des sprints et de la récupération.
- 4) Trois à quatre jours de la fin du protocole d'entraînement on refait les mêmes tests physiques.
- 5) recueil de données sur les performances enregistrés avant et après le protocole d'entraînement.

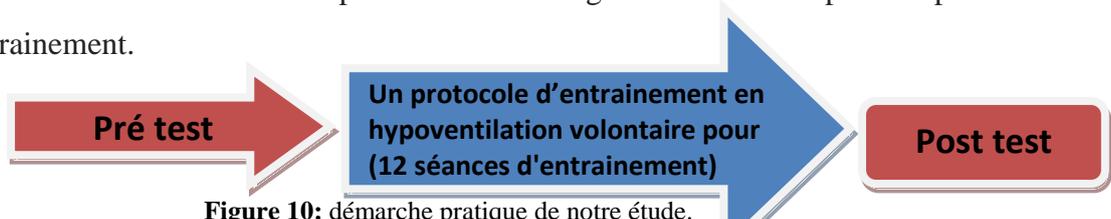


Figure 10: démarche pratique de notre étude.

### 5.5 Le test de terrain :

Pour évaluer la capacité à répéter des sprints de notre échantillon de recherche, on a choisis le test RAST (Running Anaerobic-based *Sprint*).

#### 5.5.1 Test de RAST:

Ce test consiste à Réaliser 6 courses de 35 mètres à vitesse maximale (10 secondes de récupération sont autorisées entre chaque sprint afin de faire un demi-tour au niveau de chaque repère et revenir se positionner pour le sprint qui suit).

Pour obtenir des résultats bien précis, on à utilisé l'application "*SECONDS COUNT*" *timing systems*, version 1.6.0, pour filmer nos tests et les analysés ultérieurement.

##### 5.5.1.1 Protocole :

Les pré-tests et post-tests du RSA ont été réalisés sur un terrain de football en salle pour éviter l'impact des intervenants externes comme le vent, sur les sprints de nos joueurs. un couloir en ligne droite de 35 mètres délimitée par deux repères, un chronomètre (cellules photo-électriques) pour filmer, un trépieds, et deux personnes, une à la ligne A et l'autre à la ligne B pour chronométrer les temps de récupérations et annoncer le départ à chaque sprints.

Le protocole consistait en 6 sprints de 35 mètres en ligne droite entrecoupés de 10 secondes de récupération active (retour à la ligne de départ).

Bien sûr, avant le test, les participants ont effectué Une séance d'adaptation à la technique d'entraînement en hypoventilation volontaire.

Lors du test les participants avaient pour consigne de;

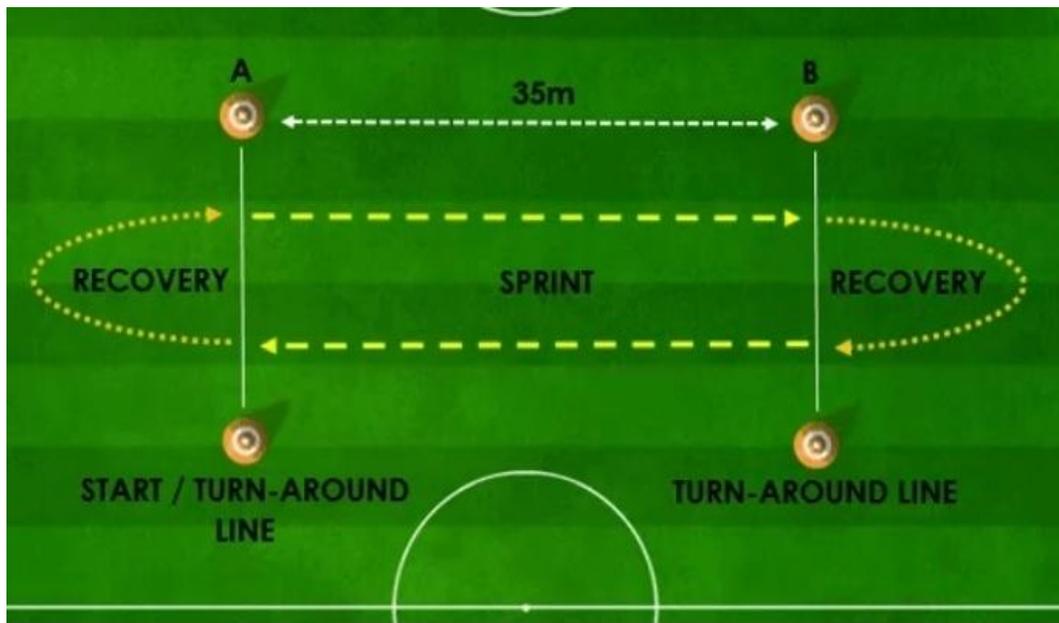
- bien s'échauffer pour éviter toutes sortes de blessures surtout les blessures musculaires.
- sprinter aussi vite que possible à chaque sprint, sans stratégie de rythme, et respirer normalement.
- adopter une position de départ standardisée avec la jambe dominante en avant et une position de départ en deux points.

Les participants ont été fortement encouragés verbalement.

Puis à la fin du test, en obtient les données nécessaires pour notre étude;

- Enregistrer le temps mis pour réaliser chaque sprint de 35 mètres (1/100 de secondes)

- Réaliser les calculs appropriés.



**Figure 11:** Mise en place du test RAST

### 5.5.1.2 Mesure des performances:

les données du test RSA enregistrées combinés avec le poids des sujets nous permet de calculer plusieurs paramètres à savoir:

- Le Moyenne Des Sprints ( $S_{moy}$ );
- La Vitesse Maximale ( $V_{max}$ ), La Vitesse Minimal ( $V_{min}$ );
- La Puissance Maximale ( $P_{max}$ ), la Puissance Moyenne ( $P_{moy}$ ) et La Puissance Minimale ( $P_{min}$ );
- L'indice De Fatigue (FI);
- Le Score De Détérioration ( $S_{dec}$ ).

### 5.5.2 Le RPE (Rating of Perceived Exertion)

Nous avons utilisé l'échelle de Borg, qui est une méthode subjective pour évaluer l'intensité perçue de l'effort physique. Cette échelle nous a permis d'estimer le ressenti de l'effort de nos sujets pendant l'exercice, indépendamment de leur fréquence cardiaque ou de tout autre indicateur objectif.

## Chapitre 01 : méthodologie de la recherche

Les scores RPE ont été enregistrés juste après le dernier sprints des tests sur une échelle de 0 à 10, où chaque chiffre correspond à un niveau d'effort perçu.

### 5.6 Le protocole d'entraînement:

le programme d'entraînement qu'on a élaboré s'étalait sur 6 semaines, on réalisant 2 séances d'entraînements par semaines espacés de 48h au minimum.

Chaque séance comprend 2 séries de 8 sprints à Vmax en VHL, entrecoupés de 24 seconds de récupération passive (respiration normal) sur une distance de 40 mètres en ligne droite délimité par des cônes. La récupération entre les deux séries est de 3 minutes.

Pendant les sprints en VHL, les joueurs devront retenir leurs respiration, ce qui va entraîner une diminution de l'apport en oxygène et une augmentation du taux de CO2 dans le corps. Cette hypoxie induite par l'exercice peut stimuler la production de globules rouges et augmenter la capacité du corps à transporter de l'oxygène vers les muscles, ce qui pourrait améliorer la RSA. Pendant les périodes de récupérations les joueurs pourront reprendre leur respiration normalement.

**Tableau :** Planification du programme d'entraînement en VHL.

Semaine	Nombre de séances	Distance (m)	Récup Entre sprints	Nombre de séries	Récup Entre Séries	Modalité de déplacement
<b>1</b>	2 Séance	<b>40</b>	<b>24"</b>	<b>2</b>	<b>3'</b>	<b>En ligne</b>
<b>2</b>	2 Séance			<b>2</b>		
<b>3</b>	2 Séance			<b>2</b>		
<b>4</b>	2 Séance			<b>2</b>		
<b>5</b>	2 Séance			<b>2</b>		
<b>6</b>	2 Séance			<b>2</b>		

#### 5.6.1 Matériels utilisé pendant l'entraînement :

- Un terrain de football
- Un sifflet
- Un chronomètre
- Des cônes

### 5.7 Méthode statistique :

Cette méthode réside dans le traitement et l'analyse des résultats de la recherche, en effectuant des calculs qui permettent d'interpréter de manière plus objective et précise les résultats enregistrés lors des expériences, en leur donnant une signification plus quantifiée et concrète, pour cela nous utiliserons les calculs suivant à l'aide de Microsoft Office Excel 2007:

- Moyenne
- L'écart-type
- Test T de STUDENT

a) **Moyenne** : Elle égale à la somme des valeurs mesurées divisées par leur nombre. Elle est définie par la formule suivante :

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n}$$

$\bar{x}$  : moyenne arithmétique

$\Sigma$  : symbole de sommation

$x$  : valeur de paramètre

$n$  : effectif

b) L'écart-type :

Il représente une caractéristique de dispersion des valeurs autour de la moyenne. Il est défini par la formule suivante :

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n-1}}$$

**S**: L'écart type

$\Sigma$  : symbole de sommation

$\bar{x}$  : moyenne arithmétique

$x$  : valeur de paramètre

$n$  : effectif

c) **Test de STUDENT (T)** :

## Chapitre 01 : méthodologie de la recherche

---

La formule du test de Student, est utilisée pour déterminer si la différence entre les moyennes de deux échantillons est statistiquement significative. Il existe deux types de tests de Student : le t-test pour échantillons indépendants et le t-test pour échantillons appariés.

La formule du t-test pour échantillons indépendants est la suivante :

$$t = (x_1 - x_2) / \sqrt{((s_1^2 / n_1) + (s_2^2 / n_2))}$$

$x_1$  et  $x_2$  : les moyennes des deux échantillons

$s_1$  et  $s_2$  : les écarts types des deux échantillons

$n_1$  et  $n_2$  : les tailles des deux échantillons

La formule du t-test pour échantillons appariés est légèrement différente :

$$t = (\bar{x}_d - \mu_d) / (sd / \sqrt{n})$$

$\bar{x}_d$  : moyenne des différences des paires appariées

$\mu_d$  : différence moyenne attendue

$sd$  : écart type des différences des paires appariées

$n$  : nombre de paires appariées.

# **Chapitre 2 : Présentation et interprétation des données**

### 1 Valeurs pré-test et post-test :

#### Groupe témoin

Tableau 6: recueil de valeurs pré test pour le groupe témoin.

Groupe Témoin			Pré-test						
			Test RAST						
Sujet	Taille	Poids	sprint 1	sprint 2	sprint 3	sprint 4	sprint 5	sprint 6	Moyenne
Sujet 1	169	61	5,204	5,357	5,432	5,472	5,564	6,642	5,61
Sujet 2	177	75	5,272	5,421	5,556	5,624	5,692	5,799	5,56
Sujet 3	174	76	5,457	5,672	5,792	5,908	6,192	6,442	5,91
Sujet 4	175	77	5,119	5,237	5,342	5,484	5,687	5,994	5,48
Sujet 5	174	70	5,461	5,593	5,649	5,769	5,839	5,995	5,72
Sujet 6	174	67	5,202	5,282	5,376	5,494	5,645	5,724	5,45
Sujet 7	183	81	5,524	5,698	5,868	5,906	6,002	6,241	5,87
Sujet 8	180	75	5,307	5,372	5,408	5,451	5,582	6,899	5,67
Sujet 9	167	62	5,062	5,113	5,142	5,256	5,332	5,402	5,22
Sujet 10	188	79	5,423	5,444	5,506	5,649	5,717	6,228	5,66
Sujet 11	184	76	5,461	5,529	5,552	5,704	5,912	6,427	5,76
Sujet 12	169	66	5,112	5,169	5,206	5,291	5,366	5,581	5,29
Sujet 13	167	64	5,101	5,249	5,307	5,356	5,573	5,608	5,37
Sujet 14	174	72	5,188	5,245	5,327	5,454	5,524	5,879	5,44
Sujet 15	175	71	5,378	5,446	5,496	5,539	5,786	6,122	5,63
<b>Moyenne</b>	<b>175,3</b>	<b>71,4667</b>	<b>5,28</b>	<b>5,39</b>	<b>5,46</b>	<b>5,56</b>	<b>5,69</b>	<b>6,066</b>	<b>5,58</b>
Ecart Type	6,24	6,28	0,16	0,18	0,20	0,20	0,23	0,42	0,20

## Chapitre 02 : présentation et interprétation des résultats

**Tableau 7:** recueil des valeurs du post test RAST pour le groupe témoin.

Groupe Témoin			Post-test							Moyenne
			Test RAST							
Sujet	Taille	Poids	sprint 1	sprint 2	sprint 3	sprint 4	sprint 5	sprint 6		
Sujet 1	169	61	5,187	5,321	5,401	5,464	5,557	6,627	5,59	
Sujet 2	177	75	5,254	5,408	5,547	5,617	5,682	5,784	5,55	
Sujet 3	174	76	5,432	5,654	5,777	5,874	6,087	6,417	5,87	
Sujet 4	175	77	5,109	5,211	5,309	5,452	5,611	5,899	5,43	
Sujet 5	174	70	5,431	5,547	5,623	5,701	5,792	5,911	5,67	
Sujet 6	174	67	5,201	5,271	5,349	5,512	5,621	5,697	5,44	
Sujet 7	183	81	5,522	5,597	5,799	5,873	5,989	6,221	5,83	
Sujet 8	180	75	5,281	5,302	5,324	5,451	5,582	5,859	5,47	
Sujet 9	167	62	5,062	5,113	5,142	5,256	5,332	5,392	5,22	
Sujet 10	188	79	5,423	5,444	5,472	5,694	5,717	6,218	5,66	
Sujet 11	184	76	5,461	5,529	5,552	5,704	5,912	6,407	5,76	
Sujet 12	169	66	5,112	5,169	5,206	5,291	5,325	5,521	5,27	
Sujet 13	167	64	5,089	5,121	5,188	5,356	5,573	5,588	5,32	
Sujet 14	174	72	5,188	5,245	5,327	5,454	5,524	5,869	5,43	
Sujet 15	175	71	5,378	5,446	5,496	5,539	5,786	6,112	5,63	
<b>MOYENNE</b>	<b>175,3</b>	<b>71,47</b>	<b>5,28</b>	<b>5,36</b>	<b>5,43</b>	<b>5,55</b>	<b>5,67</b>	<b>5,97</b>	<b>5,54</b>	
Ecart Type	6,24	6,28	0,15	0,17	0,20	0,19	0,22	0,36	0,20	

## Chapitre 02 : présentation et interprétation des résultats

**Tableau 8:** Les performances enregistrées lors du pré et post test RAST pour le groupe témoin.

Club	R.C.S	Pré test RAST					Post test RAST				
Groupe	Sujet	P max	P min	P moy	FI	Sdec	Sdec	FI	P moy	P min	P max
		(W)	(W)	(W)		%			%	(W)	(W)
<b>Groupe Témoin</b>	Sujet 1	530,22	258,39	441,07	8,09	-27,08	-27,76	10,21	544,27	315,68	658,34
	Sujet 2	641,50	471,13	548,56	5,14	-10,84	-10,09	4,77	541,12	474,80	633,47
	Sujet 3	644,86	444,66	543,01	5,98	-13,19	-18,13	6,48	467,22	352,33	580,86
	Sujet 4	703,19	456,02	595,79	8,07	-15,53	-15,46	7,60	596,63	459,51	707,33
	Sujet 5	526,52	397,98	461,28	3,22	-9,78	-8,84	4,54	608,43	533,82	688,24
	Sujet 6	584,39	442,25	528,50	4,40	-9,73	-9,54	4,27	512,70	443,89	583,38
	Sujet 7	656,04	428,45	566,62	6,74	-15,26	-12,66	5,06	504,65	412,14	589,29
	Sujet 8	614,68	447,57	555,21	5,06	-11,16	-10,94	5,09	566,89	456,80	623,80
	Sujet 9	585,55	481,80	536,38	3,31	-6,72	-6,52	3,23	536,83	484,48	585,55
	Sujet 10	606,80	400,61	540,29	6,07	-14,84	-14,66	6,01	540,32	402,54	606,80
	Sujet 11	571,65	350,69	494,90	6,39	-17,69	-17,32	6,30	495,45	353,99	571,65
	Sujet 12	605,21	465,10	549,64	4,42	-9,17	-8,00	3,95	554,23	480,43	605,21
	Sujet 13	590,68	444,52	510,84	4,54	-9,94	-9,81	4,56	525,44	449,31	594,87
	Sujet 14	631,64	434,07	554,56	6,06	-13,32	-13,13	5,99	554,93	436,29	631,64
	Sujet 15	559,1548	493,57	493,568	5,33	-13,83	-13,65	6,62	619,09	477,50	700,91
MOYENNE	603,47	427,79	528,01	5,52	-13,21	-13,10	5,65	544,55	435,57	624,09	
Ecart Type	47,74	59,03	40,93	1,47	4,84	5,29	1,72	41,83	58,70	45,31	

**Tableau 9:** Les valeurs de la perception d'efforts RPE enregistrées après le pré et post test RAST pour le groupe témoin.

Groupe Témoin																		
RPE	Sujet	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Moyenn e	Ecart type
	pré-test	8	7	8	7	8	7	8	8	7	9	9	7	7	8	9	7,8	0,77
	post-test	8	7	8	6	7	7	7	7	7	9	9	7	7	8	8	7,47	0,83

## Chapitre 02 : présentation et interprétation des résultats

**Tableau 10:** Analyse statistique des performances moyennes enregistrées Lors du pré et post test RAST du groupe témoin

Indices	Pré test	Post test	T. Calculé	T. Tabulé	Signification au seuil 0,05
Smoy	5,57 ± 0,20	5,54 ± 0,19	2,50	2,14	S
Pmoy	528,01 ± 40,93	544,55 ± 41,83	1,02	2,14	NS
Sdec	-13,22 ± 4,83	-13,10 ± 5,29	0,28	2,14	NS
FI	5,52 ± 1,47	5,65 ± 1,72	0,53	2,14	NS
RPE	7,8 ± 0,77	7,47 ± 0,83	2,64	2,14	S

### Commentaire :

Les performances présentées dans ce tableau sont les valeurs moyennes du groupe témoin obtenues en sprint (Smoy), puissance (Pmoy), score de détérioration (Sdec), indice de fatigue (FI), vitesse maximale intermittente (VMI) et en perception d'effort de l'exercice (RPE), par ces sujets pendant le pré et post test (pendant un mésocycle de compétition de six semaines).

- La sprint moyen du groupe (Smoy):

La moyenne générale du temps des sprints (6× 35 m) enregistrée lors du pré-test est de :

5,57± 0,20sec , et lors du post test elle est de :5,54± 0,19sec .

L'analyse statistique (T Student) de ces performances, a montré une différence significative entre les résultats du pré-test et du post-test, avec un T calculé supérieur au T tabulé à un seuil de signification de 0,05.

- La puissance moyenne du groupe (Pmoy):

Lors du pré test on a enregistré une moyenne générale de la puissance du groupe est de : 528,01 ± 40,93w, et lors du post test elle est passé à 544,55 ± 41,83 w.

L'analyse statistique (T Student) de ces performances, a montré qu'il n'y a pas de différence significative entre les résultats du pré-test et du post-test, avec un T calculé inférieur au T tabulé à un seuil de signification de 0,05.

## Chapitre 02 : présentation et interprétation des résultats

---

- Le score de détérioration moyen du groupe (Sdec):

Lors du pré test on a enregistré une moyenne générale de seuil de détérioration- $13.22 \pm 4.83\%$ , et lors du post test elle est passé à  $-13.10 \pm 5.29\%$ .

L'analyse statistique (T Student) de ces performances, a montré qu'il n'y a pas de différence significative entre les résultats du pré-test et du post-test, avec un T calculé inférieur au T tabulé à un seuil de signification de 0,05.

- L'indice de fatigue (FI) :

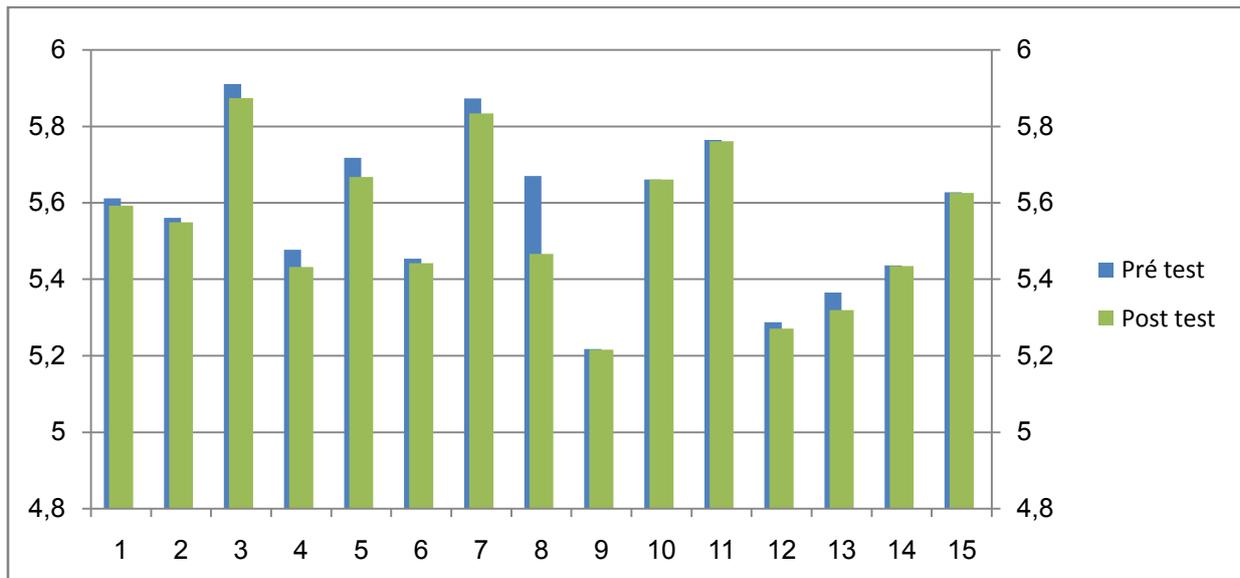
Lors du pré test on a enregistré une moyenne générale de l'indice de fatigue  $5,52 \pm 1,47$ , et lors du post test elle est passé à  $5,65 \pm 1,72$ .

L'analyse statistique (T Student) de ces performances, a montré qu'il n'y a pas de différence significative entre les résultats du pré-test et du post-test, avec un T calculé inférieur au T tabulé à un seuil de signification de 0,05.

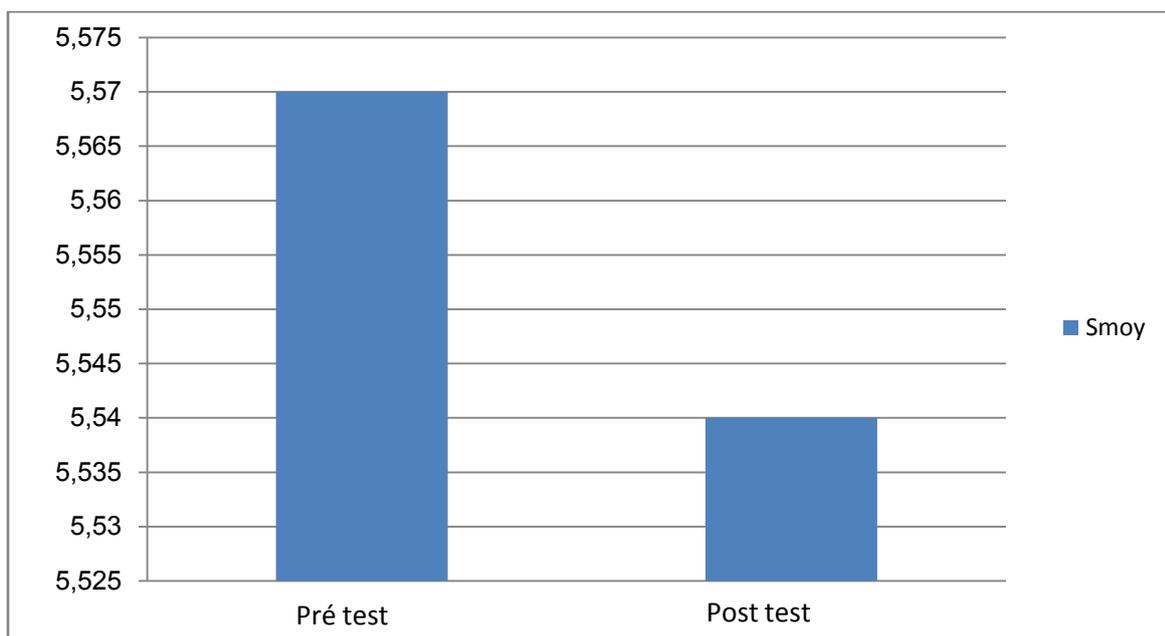
- La perception d'effort de l'exercice (RPE) ;

Au pré test on a enregistré une moyenne générale de  $7,8 \pm 0,77$  en RPE, et lors du post test elle est passé à  $7,47 \pm 0,83$ .

L'analyse statistique (T Student) de ces performances, a montré une différence significative entre les résultats du pré-test et du post-test, avec un T calculé supérieur au T tabulé à un seuil de signification de 0,05.

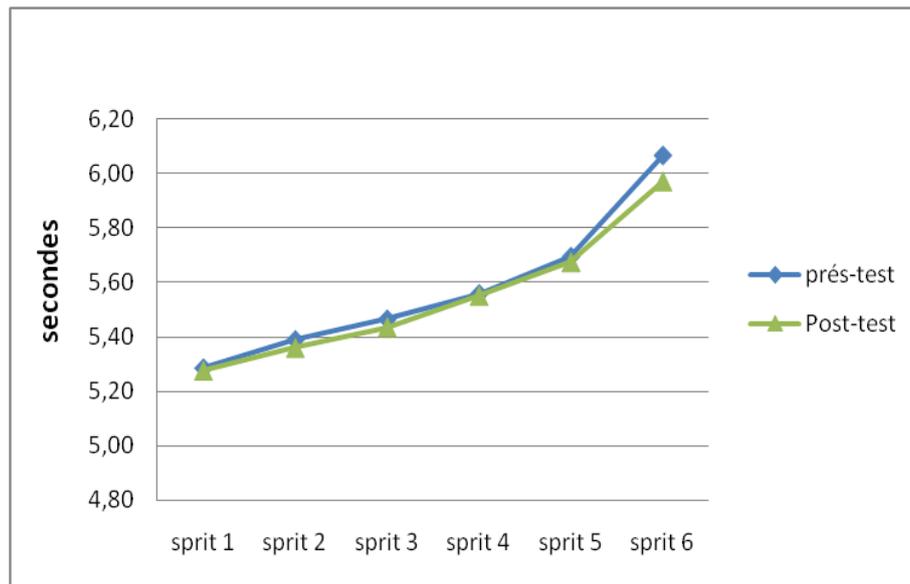


**Figure 12:** Histogramme démontrant la différence enregistré entre le pré et post test RAST des sprints moyens (Smoy) de chaque sujet du groupe Témoin.



**Figure 13:** Histogramme du pré et post test RAST démontrant la progression du groupe témoin en sprint moyen

## Chapitre 02 : présentation et interprétation des résultats



**Figure 14 :** Courbes démontrant la progression du groupe témoin en RSA après un entraînement spécifique de six semaines.

### Groupe expérimental

**Tableau 11:** recueil de valeurs pré test RAST pour le groupe expérimental.

Groupe expérimental			Pré-Test R.B.B.H						Moyenne
			RAST						
Sujet	Taille	Poids	sprint 1	sprint 2	sprint 3	sprint 4	sprint 5	sprint 6	
Sujet 1	187	86	5,223	5,385	5,731	5,788	6	6,998	5,85417
Sujet 2	179	79	5,222	5,355	5,546	5,697	5,972	6,609	5,7335
Sujet 3	175	72	5,484	5,524	5,633	5,751	5,981	6,256	5,7715
Sujet 4	176	78	5,443	5,491	5,534	5,599	5,812	6,161	5,67333
Sujet 5	174	76	5,451	5,497	5,545	5,667	5,739	5,845	5,624
Sujet 6	177	75	5,317	5,384	5,382	5,682	5,993	6,121	5,6465
Sujet 7	171	69	5,219	5,329	5,318	5,501	5,711	6,098	5,52933
Sujet 8	170	72	5,217	5,302	5,348	5,455	5,549	5,603	5,41233
Sujet 9	172	74	5,442	5,498	5,517	5,648	5,919	6,641	5,7775
Sujet 10	178	73	5,452	5,521	5,545	5,698	5,889	6,5012	5,7677
Sujet 11	166	66	5,369	5,391	5,434	5,579	5,751	5,859	5,56383
Sujet 12	165	74	5,391	5,409	5,534	5,763	5,984	6,242	5,7205
Sujet 13	168	73	5,412	5,441	5,479	5,555	5,618	5,904	5,56817
Sujet 14	172	74	5,487	5,539	5,566	5,715	5,904	6,466	5,7795
Sujet 15	183	80	5,644	5,781	5,823	5,988	6,202	6,911	6,05817
<b>Moyenne</b>	<b>174,20</b>	<b>74,73</b>	<b>5,38</b>	<b>5,46</b>	<b>5,53</b>	<b>5,67</b>	<b>5,87</b>	<b>6,28</b>	<b>5,70</b>
<b>Ecart Type</b>	<b>6,09</b>	<b>4,76</b>	<b>0,12</b>	<b>0,12</b>	<b>0,13</b>	<b>0,13</b>	<b>0,17</b>	<b>0,40</b>	<b>0,15</b>

## Chapitre 02 : présentation et interprétation des résultats

**Tableau 12:** recueil des valeurs du post test RAST pour le groupe expérimental.

Groupe expérimental			Post test R.B.B.H							MOYENNE
			Test RAST							
Sujet	Taille	Poids	sprint 1	sprint 2	sprint 3	sprint 4	sprint 5	sprint 6		
Sujet 1	187	84	5,234	5,269	5,299	5,322	5,357	5,399	5,313333	
Sujet 2	179	79	5,218	5,241	5,284	5,321	5,402	5,461	5,321167	
Sujet 3	175	73	5,258	5,281	5,314	5,331	5,392	5,351	5,321167	
Sujet 4	176	78	5,448	5,483	5,522	5,557	5,578	5,612	5,533333	
Sujet 5	174	75	5,299	5,321	5,354	5,391	5,432	5,585	5,397	
Sujet 6	177	75	5,328	5,359	5,393	5,433	5,481	5,509	5,417167	
Sujet 7	171	71	5,216	5,239	5,266	5,294	5,338	5,387	5,29	
Sujet 8	170	72	5,226	5,254	5,285	5,331	5,382	5,423	5,316833	
Sujet 9	172	74	5,201	5,237	5,291	5,327	5,381	5,421	5,309667	
Sujet 10	178	73	5,441	5,498	5,521	5,564	5,601	5,717	5,557	
Sujet 11	166	67	5,151	5,191	5,248	5,288	5,322	5,393	5,2655	
Sujet 12	165	74	5,288	5,324	5,382	5,434	5,497	5,541	5,411	
Sujet 13	168	73	5,304	5,331	5,363	5,428	5,495	5,572	5,4155	
Sujet 14	172	74	5,482	5,514	5,547	5,594	5,642	5,704	5,5805	
Sujet 15	183	79	5,567	5,595	5,638	5,682	5,219	5,941	5,607	
MOYENNE	174,20	74,73	5,31	5,34	5,38	5,42	5,43	5,53	5,40	
Ecart Type	6,09	4,01	0,12	0,12	0,12	0,12	0,11	0,16	0,11	

## Chapitre 02 : présentation et interprétation des résultats

**Tableau 13:** Les performances enregistrées lors du pré et post test RAST pour le groupe expérimental.

Club	R.B.B.H	Pré test RAST					Post test RAST				
Groupe	Sujet	P max	P min	P moy	FI	Sdec	Sdec	FI	P moy	P min	P max
		(W)	(W)	(W)		%	%		(W)	(W)	(W)
Groupe Expérimental	Sujet 1	739,39	307,41	552,03	12,30	-33,98	-3,15	2,00	686,42	653,85	717,65
	Sujet 2	679,60	335,24	531,69	10,01	-26,56	-4,66	2,72	643,31	594,22	681,16
	Sujet 3	661,01	382,90	489,03	8,15	-19,96	-1,77	1,40	593,77	570,44	615,17
	Sujet 4	592,54	408,58	528,85	5,40	-13,19	-3,01	1,52	564,33	540,60	590,91
	Sujet 5	574,81	466,23	525,28	3,22	-7,23	-5,40	2,78	585,49	527,39	617,47
	Sujet 6	611,22	400,62	509,74	6,18	-15,12	-3,40	1,78	578,42	549,51	607,44
	Sujet 7	594,60	372,75	504,94	6,67	-16,84	-3,28	1,78	587,95	556,36	612,89
	Sujet 8	621,16	501,43	558,42	3,69	-7,40	-3,77	2,04	587,42	553,03	617,96
	Sujet 9	562,46	309,50	482,92	7,30	-22,03	-4,23	2,36	606,33	569,02	644,33
	Sujet 10	551,81	325,45	475,73	6,54	-19,24	-5,07	2,30	521,88	478,58	555,17
	Sujet 11	522,40	401,98	472,49	3,61	-9,13	-4,70	2,45	562,99	523,26	600,53
	Sujet 12	578,58	372,73	492,61	6,00	-15,79	-4,78	2,47	573,13	532,85	613,05
	Sujet 13	564,14	434,53	520,59	3,88	-9,09	-5,05	2,54	564,06	516,92	599,31
	Sujet 14	548,74	335,32	478,22	6,15	-17,84	-4,05	1,85	522,19	488,46	550,24
	Sujet 15	545,09	296,90	452,14	6,83	-22,45	-6,72	6,52	553,88	461,51	680,77
MOYENNE		596,50	376,77	504,98	6,40	-17,06	-4,20	2,43	582,10	541,07	620,27
Ecart Type		58,40	60,33	30,87	2,46	7,469	1,20	1,21	41,87	47,65	45,18

**Tableau 14:** Les valeurs de la perception d'efforts RPE enregistrées après le pré et post test RAST pour le groupe témoin.

G. Expérimental																	Moyenne	Ecart type	
RPE	Sujet	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			
	pré-test		8	7	8	7	7	7	6	6	8	8	7	7	7	8	9	7,33	0,82
	post-test		7	7	7	6	7	6	6	6	6	7	7	6	6	6	7	6,47	0,52

## Chapitre 02 : présentation et interprétation des résultats

**Tableau 15:** Analyse statistique des performances moyennes enregistrées Lors du pré et post test RSA du groupe expérimental.

Groupe expérimental					
Indices	Pré test	Post test	T. Calculé	T. Tabulé	Signification au seuil 0,05
<b>Smoy</b>	<b>5,70 ± 0,15</b>	<b>5,40 ± 0,11</b>	<b>8,29</b>	<b>2,14</b>	<b>S</b>
<b>Pmoy</b>	<b>504,98 ± 30,87</b>	<b>582,10 ± 36,96</b>	<b>8,89</b>	<b>2,14</b>	<b>S</b>
<b>Sdec</b>	<b>-17,06 ± 7,47</b>	<b>-4,20 ± 1,20</b>	<b>6,44</b>	<b>2,14</b>	<b>S</b>
<b>FI</b>	<b>6,40 ± 2,46</b>	<b>2,43 ± 1,21</b>	<b>5,54</b>	<b>2,14</b>	<b>S</b>
<b>RPE</b>	<b>7,33 ± 0,82</b>	<b>6,47 ± 0,52</b>	<b>4,51</b>	<b>2,14</b>	<b>S</b>

### Commentaire :

Les performances présentées dans ce tableau sont les valeurs moyennes du groupe expérimental obtenues en sprint (Smoy), puissance (Pmoy), score de détérioration (Sdec), indice de fatigue (FI), vitesse maximale intermittente (VMI) et en perception d'effort de l'exercice (RPE), au pré et post test (pendant un mésocycle de compétition de six semaines).

- La sprint moyen du groupe (Smoy):

La moyenne générale du temps des sprints (6× 35 m) enregistrée lors du pré-test est de :5,70sec ± 0,15, et lors du post test elle est de :5,40 sec ± 0,11.

L'analyse statistique (T Student) de ces performances, a montré une différence significative entre les résultats du pré-test et du post-test, avec un T calculé supérieur au T tabulé à un seuil de signification de 0,05.

- La puissance moyenne du groupe (Pmoy):

Lors du pré test on a enregistré une moyenne générale de la puissance du groupe est de :504,98 w ± 30,87,et lors du post test elle est passé à582,10 w ± 36,96.

L'analyse statistique (T Student) de ces performances, a montré une différence significative entre les résultats du pré-test et du post-test, avec un T calculé supérieur au T tabulé à un seuil de signification de 0,05.

## Chapitre 02 : présentation et interprétation des résultats

- Le score de détérioration moyen du groupe (Sdec):

Lors du pré-test on a enregistré une moyenne générale de seuil de détérioration de :  $-17,06 \% \pm 7,47$  et lors du post test elle est passé à  $-4,20 \% \pm 1,20$ .

L'analyse statistique (T Student) de ces performances, a montré une différence significative entre les résultats du pré-test et du post-test, avec un T calculé inférieur au T tabulé à un seuil de signification de 0,05.

- L'indice de fatigue (FI) :

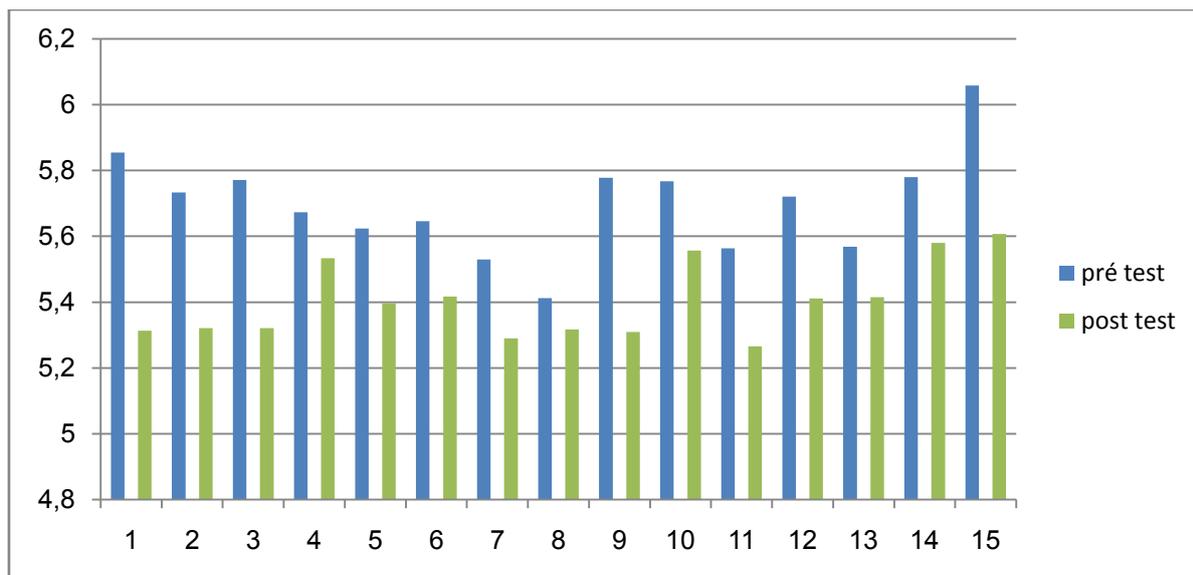
Lors du pré-test on a enregistré une moyenne générale de  $6,40 \pm 2,46$  en indice de fatigue , et lors du post test elle est passé à  $2,43 \pm 1,21$ .

L'analyse statistique (T Student) de ces performances, a montré une différence significative entre les résultats du pré-test et du post-test, avec un T calculé supérieur au T tabulé à un seuil de signification de 0,05.

- La perception d'effort de l'exercice (RPE) ;

Au pré test on a enregistré une moyenne générale de  $7,33 \pm 0,82$  en RPE, et lors du post test elle est passé à  $6,47 \pm 0,52$ .

L'analyse statistique (T Student) de ces performances, a montré une différence significative entre les résultats du pré-test et du post-test, avec un T calculé supérieur au T tabulé à un seuil de signification de 0,05.



**Figure 15:** Histogramme démontrant la différence enregistré entre le pré et post test RAST des sprints moyens (Smoy) de chaque sujet du groupe Témoin

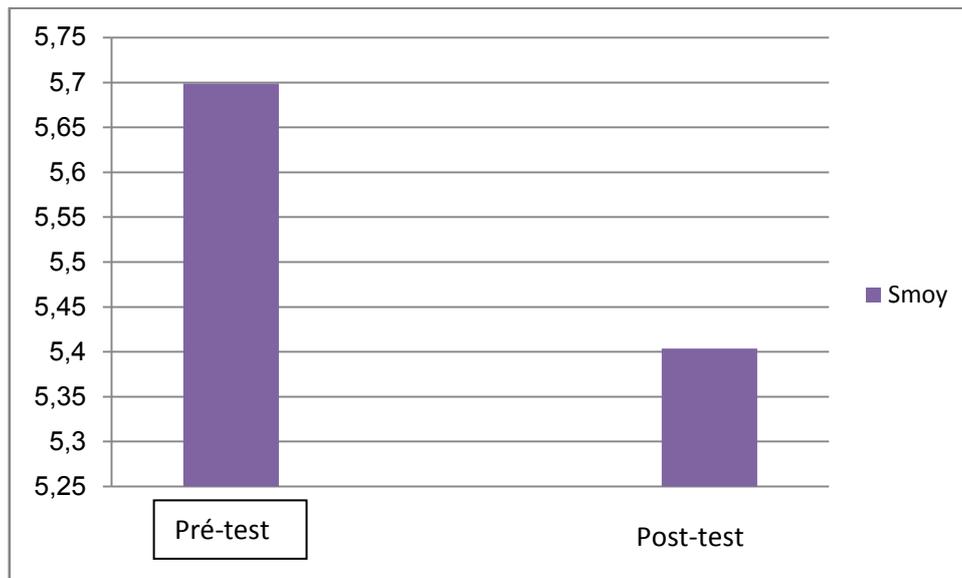
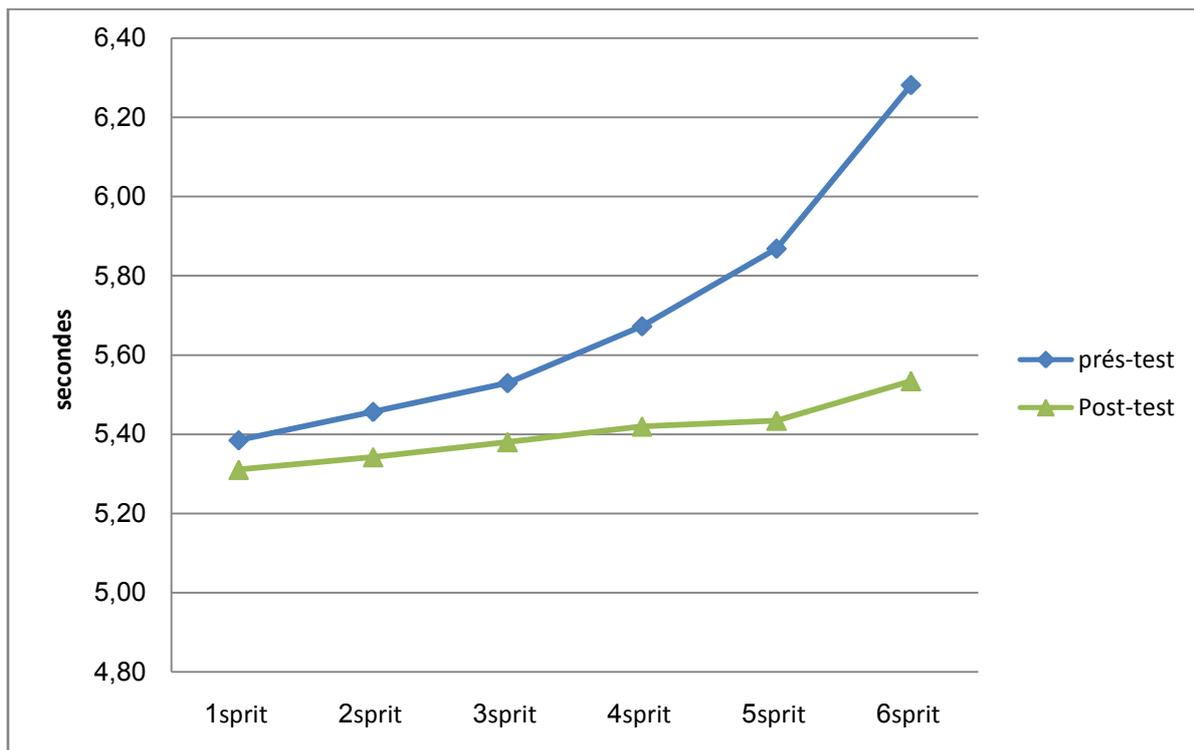


Figure 16: Histogramme du pré et post test RAST démontrant la progression du groupe expérimental en terme de RSA après un protocole d'entraînement en hypoventilation volontaire (VHL) de six semaines.



**figure 6:** Courbes démontrant la progression du groupe expérimental en terme de RSA après un protocole d'entraînement en hypoventilation volontaire (VHL) de six semaines.

**Comparaison entre le groupe témoin et expérimental :**

## Chapitre 02 : présentation et interprétation des résultats

**Tableau 16:** Analyse statistique des performances moyennes du groupe témoin et expérimental après six semaines d'entraînements.

Post-test					
Indices	Groupe Témoin	Groupe Expérimental	T. Calculé	T. Tabulé	Signification au seuil 0,05
<b>S<sub>moy</sub></b>	<b>5,54 ± 0,19</b>	<b>5,40 ± 0,11</b>	<b>2,35</b>	<b>2,14</b>	<b>S</b>
<b>P<sub>moy</sub></b>	<b>544,55 ± 41,83</b>	<b>582,10 ± 36,96</b>	<b>2,45</b>	<b>2,04</b>	<b>S</b>
<b>S<sub>dec</sub></b>	<b>-13,10 ± 5,29</b>	<b>-4,20 ± 1,20</b>	<b>6,35</b>	<b>2,04</b>	<b>S</b>
<b>FI</b>	<b>5,65 ± 1,72</b>	<b>2,43 ± 1,21</b>	<b>5,92</b>	<b>2,04</b>	<b>S</b>
<b>RPE</b>	<b>7,47 ± 0,83</b>	<b>6,47 ± 0,52</b>	<b>3,94</b>	<b>2,14</b>	<b>S</b>

### Commentaire :

Les performances présentées dans ce tableau sont les valeurs moyennes des deux groupes (témoin et expérimental) obtenues en sprint (S<sub>moy</sub>), puissance (P<sub>moy</sub>), score de détérioration (S<sub>dec</sub>), indice de fatigue (FI), vitesse maximale intermittente (VMI) et en perception d'effort de l'exercice (RPE), après un mésocycle de compétition de six semaines.

- Le sprint moyen du groupe (S<sub>moy</sub>):

La moyenne générale du temps des sprints (S<sub>moy</sub>) (6× 35 m) du groupe témoin au post test est de :5,54± 0,19 secondes, et celle du groupe expérimental est de :5,40± 0,11 secondes.

L'analyse statistique (T Student) de ces performances, a montré une différence significative entre les résultats des deux groupes en faveur du groupe expérimental, avec un T calculé supérieur au T tabulé à un seuil de signification de 0,05.

- La puissance moyenne du groupe (P<sub>moy</sub>):

La moyenne générale de la puissance du groupe témoin est de :544,55 ± 41,83w, et celle du groupe expérimental est de 582,10 ± 36,96 w.

L'analyse statistique (T Student) de ces performances, a montré une différence significative entre les résultats des deux groupes en faveur du groupe expérimental, avec un T calculé supérieur au T tabulé à un seuil de signification de 0,05.

## Chapitre 02 : présentation et interprétation des résultats

---

- Le score de détérioration moyen du groupe (Sdec):

La moyenne générale du seuil de détérioration(Sdec)du groupe témoin au post test est de :

-13,10 ± 5,29 %,et celle du groupe expérimental est de :-4.20 % ± 1.20 %.

L'analyse statistique (T Student) de ces performances, a montré une différence significative entre les résultats des deux groupes en faveur du groupe expérimental, avec un T calculé inférieur au T tabulé à un seuil de signification de 0,05.

- L'indice de fatigue (FI) :

La moyenne générale de l'indice de fatigue du groupe témoin au post test est de : 5,65 ± 1,72

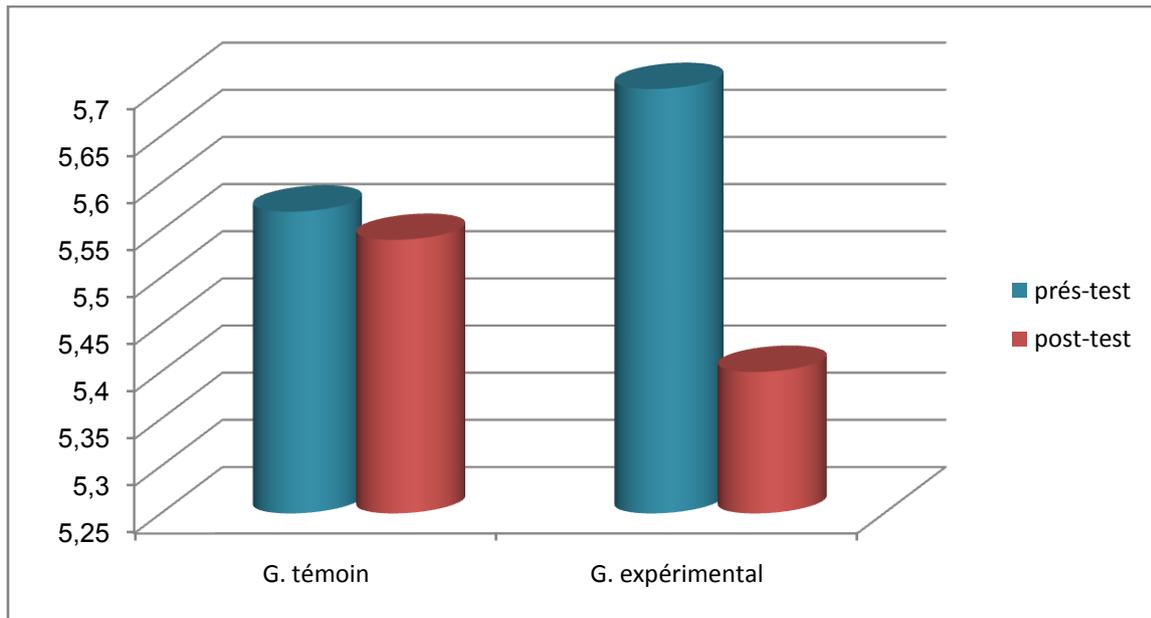
, et celle du groupe expérimental est de :2.43 ± 1,21.

L'analyse statistique (T Student) de ces performances, a montré une différence significative entre les résultats des deux groupes en faveur du groupe expérimental, avec un T calculé supérieur au T tabulé à un seuil de signification de 0,05.

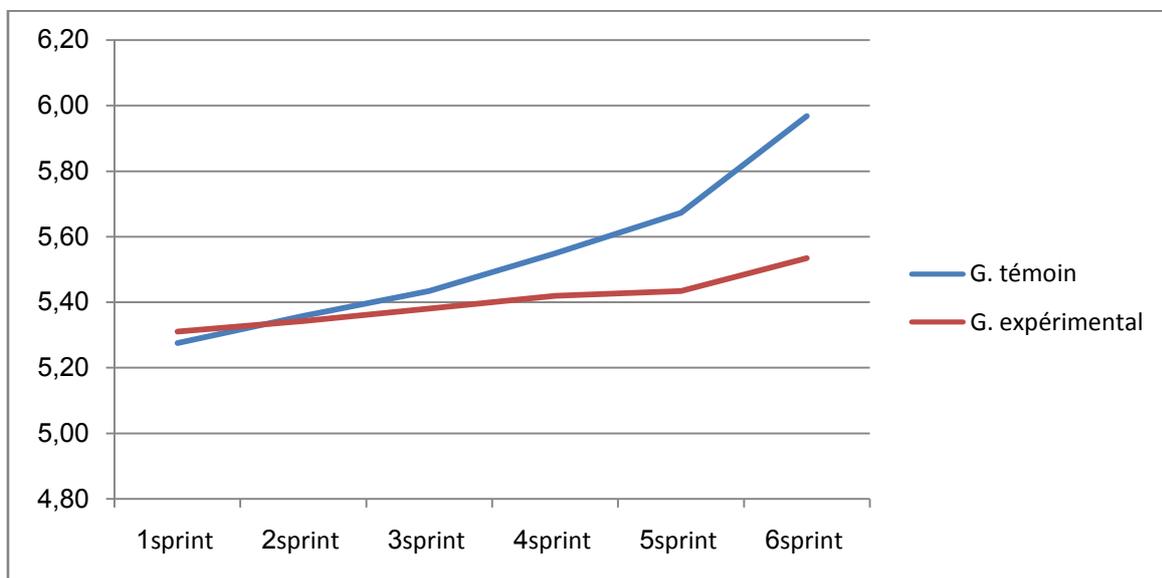
- La perception d'effort de l'exercice (RPE) ;

La moyenne générale de RPE du groupe témoin au post test est de : 7,47 ± 0,83, et celle du groupe expérimental est de :6,47 ± 0,52.

L'analyse statistique (T Student) de ces performances, a montré une différence significative entre les résultats des deux groupes en faveur du groupe expérimental, avec un T calculé supérieur au T tabulé à un seuil de signification de 0,05.



**Figure 17:** Histogramme de la moyenne générale des sprints (Smoy) de chaque groupe au pré et post test RAST, démontrant l'impacte de la méthode d'entrainement suivi sur la performance de RSA.



**Figure 18:** Courbes démontrant la différence entre les deux groupes en terme de RSA après un mésocycle de compétition de six semaines.

### 2 Discussion générale des résultats :

L'objectif de notre étude était d'évaluer l'impact d'un programme d'entraînement de 12 séances en hypoventilation volontaire à bas volume pulmonaire (VHL) sur la capacité à répéter les sprints chez les footballeurs, par rapport à un groupe témoin s'entraînant normalement avec la méthode classique.

Après le programme d'entraînement en hypoventilation volontaire et la comparaison des résultats du post-test des deux groupes, nous avons observé une différence significative en faveur du groupe expérimental par rapport au groupe témoin. Le temps moyen du sprint (Smoy)( $5,40 \pm 0,11$  secondes) du groupe expérimental était significativement inférieur à celui du groupe témoin ( $5,54 \pm 0,19$  secondes), ce qui indique une amélioration de la capacité anaérobie, de la puissance musculaire, de la capacité de récupération et par conséquent de la capacité à répéter les sprints .Ce gain est dû à l'amélioration de la filière anaérobies, en favorisant la production d'adénosine triphosphate (ATP) par la voie glycolytique (Trincat et al., 2017). Le RSH-VHL entraîne une plus grande consommation d'oxygène durant les périodes de récupération suivant les sprints dans la deuxième moitié de l'entraînement (Woorons et al., 2017).

L'analyse statistique à démontré une différence significative entre la puissance moyenne (Pmoy) du groupe expérimental ( $582,10 \pm 36,96$  w) et le groupe témoin ( $544,55 \pm 41,83$  w). Cela suggère que l'entraînement en hypoventilation volontaire a conduit à une augmentation de la puissance musculaire, ce qui est bénéfique pour la performance lors de répétitions de sprints. Ce gain peut être expliquer du fait que l'exercice en VHL augmenterait la contribution de la filière anaérobie glycolytique et entraînerait des adaptations au niveau musculaire pour une meilleure utilisation de l'oxygène et probablement une plus grande capacité tampon pour avoir un impact positif sur la performance anaérobie (Woorons et al., 2010).

Nous avons également évalué le score de détérioration (Sdec), qui est une mesure de la capacité à maintenir des performances élevées malgré la fatigue. Les résultats ont montré que le groupe expérimental avait un Sdec( $-4,20 \% \pm 1,20 \%$ ) significativement meilleur que le groupe témoin( $-13,10 \pm 5,29 \%$ ), ce qui indique une meilleure capacité à retarder la fatigue musculaire et à maintenir des performances élevées pendant les répétitions de sprints. Cette amélioration du seuil de détérioration dans le groupe expérimental peut être attribuée aux

## Chapitre 02 : présentation et interprétation des résultats

---

adaptations physiologiques induites par RSH-VHL qui expose les muscles à un environnement de basse oxygénation, ce qui stimule des adaptations telles qu'une meilleure utilisation des substrats énergétiques, une optimisation de la fonction musculaire et une amélioration de la capacité à tamponner l'accumulation de lactate et d'autres métabolites, ce qui était confirmé dans l'étude de Woorons et ces collaborateurs (2017b).

L'indice de fatigue (FI) était significativement plus bas dans le groupe expérimental ( $2,43 \pm 1,21$ ) par rapport au groupe témoin ( $5,65 \pm 1,72$ ). Cela suggère que l'entraînement en hypoventilation volontaire a réduit l'indice de fatigue perçue, ce qui est bénéfique pour la capacité à maintenir des performances élevées tout au long d'un match de football. Ce progrès est dû à la plus grande réoxygénation musculaire pendant les périodes de récupération qui a facilité la resynthèse de la phosphocréatine (McMahon et al., 2002).

En ce qui concerne la perception d'effort de l'exercice (RPE), nous avons observé une diminution significative dans le groupe expérimental ( $6,47 \pm 0,52$ ) par rapport au groupe témoin ( $7,47 \pm 0,83$ ). Cela suggère que les participants du groupe expérimental ont perçu moins d'effort pendant l'exercice, suite aux adaptations physiques et psychiques suite à notre programme d'entraînement en hypoventilation, qui demande non seulement une grande tolérance à l'effort mais aussi une adaptation au manque d'oxygène dans le corps pendant l'effort.

En conclusion, nos résultats indiquent que le programme d'entraînement de 12 séances en hypoventilation volontaire a eu un impact positif sur la capacité à répéter les sprints chez les footballeurs séniors de l'IRBBH (BOUHAMZA), à travers les améliorations observées dans les performances de sprint, la puissance musculaire, le score de détérioration et la perception de l'effort soutiennent l'efficacité de cette méthode d'entraînement : ce qui confirme notre hypothèse de départ.

## *Conclusion*

## Conclusion

---

### **Conclusion :**

L'objectif de cette étude était d'évaluer l'effet d'un programme d'entraînement en hypoventilation volontaire sur la capacité à répéter des sprints chez les footballeurs séniors de l'IRBBH (BOUHAMZA). Les résultats obtenus ont fourni des indications précieuses sur l'efficacité de cette méthode d'entraînement spécifique.

Les résultats ont montré que le groupe expérimental avait obtenu des performances significativement améliorées par rapport au groupe témoin dans plusieurs domaines clés. Le temps moyen des sprints était plus court pour le groupe expérimental, indiquant une amélioration de la capacité à générer une puissance maximale sur de courtes distances. De plus, le groupe expérimental a présenté un score de détérioration plus faible, une fatigue réduite et une perception d'effort moindre par rapport au groupe témoin.

Ces résultats suggèrent que l'entraînement en hypoventilation volontaire peut être une approche prometteuse pour améliorer la capacité à répéter des sprints chez les footballeurs. En induisant un stress hypoxique contrôlé, cet entraînement semble favoriser une meilleure adaptation physiologique, permettant aux joueurs de maintenir des performances explosives de manière plus efficace tout au long d'un match de football. Cependant, il faut retenir que la méthode d'entraînement en hypoventilation volontaire exige de l'entraîneur une très grande attention vis-à-vis de ses joueurs qui peuvent présenter des étourdissements suite au manque d'oxygène.

### **Limites et perspectives :**

Notre recherche présente certaines limites qui méritent d'être discutées. L'une des principales limites de notre étude est le fait que nous n'avons pas examiné l'impact physiologique de l'entraînement en hypoventilation volontaire sur la capacité à répéter des sprints. Les prises de sang et l'analyse des marqueurs physiologiques auraient permis d'obtenir des données plus approfondies sur les adaptations métaboliques et cardiorespiratoires liées à cette méthode d'entraînement. Il convient de noter aussi que cette étude est limitée par sa durée relativement courte et la taille de l'échantillon.

Des études futures sur l'examinations de l'impact physiologique de l'entraînement en hypoventilation volontaire sur la capacité à répéter des sprints avec des échantillons plus importants et sur une période prolongée pourraient fournir des informations supplémentaires et renforcer les conclusions actuelles.

En conclusion, les résultats de cette recherche suggèrent que l'entraînement en hypoventilation volontaire peut être bénéfique pour améliorer la capacité à répéter des sprints chez les footballeurs. Ces résultats sont encourageants pour les entraîneurs et les préparateurs physiques, car ils offrent une approche novatrice et potentiellement efficace pour optimiser les performances des joueurs sur le terrain.

# Bibliographie

## Bibliographie

1. Ardle. W. MC.Katch ; V 2001 : Physiologie de l'activité physique : Energie nutrition et performance 4ieme édition Meloine 2001 Paris.
2. Balsom, P.D., Gaitanos, G.C., Ekblom, B., and Sjödin, B. (1994). Reduced oxygen availability during high intensity intermittent exercise impairs performance. *Acta Physiol. Scand.* 152, 279– 285.
3. Berglund, B. (1992). High-Altitude Training. *Sports Med.* 14, 289–303.
4. Billaut, F., and Smith, K. (2010). Prolonged Repeated-Sprint Ability Is Related to Arterial O<sub>2</sub> Desaturation in Men. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 5, 197–209.
5. Billaut, F., and Aughey, R.J. (2013). Update in the understanding of altitude-induced limitations to performance in team-sport athletes. *Br. J. Sports Med.* 47, i22–i25.
6. Bishop, D., Lawrence, S., and Spencer, M. (2003). Predictors of repeated-sprint ability in elite female hockey players. *J. Sci. Med. Sport* 6, 199–209.
7. Bishop, D., Edge, J., and Goodman, C. (2004). Muscle buffer capacity and aerobic fitness are associated with repeated-sprint ability in women. *Eur. J. Appl. Physiol.* 92, 540–547.
8. Bishop, D., and Edge, J. (2006). Determinants of repeated-sprint ability in females matched for single-sprint performance. *Eur. J. Appl. Physiol.* 97, 373–379.
9. Bishop, D., Edge, J., Thomas, C., and Mercier, J. (2008). Effects of high-intensity training on muscle lactate transporters and postexercise recovery of muscle lactate and hydrogen ions in women. *Am. J. Physiol.-Regul. Integr. Comp. Physiol.* 295, R1991–R1998.
10. Bishop, D., Girard, O., and Mendez-Villanueva, A. (2011). Repeated-Sprint Ability — Part II. *Sports Med.* 41, 741–756.
11. Blazevic, M. et Dujmovic, P. (1978). *Guide pratique de l'entraînement*, 2ème éditions.
12. Bogdanis, G.C., Nevill, M.E., Boobis, L.H., Lakomy, H.K., and Nevill, A.M. (1995). Recovery of power output and muscle metabolites following 30 s of maximal sprint cycling in man. *J. Physiol.* 482, 467–480.
13. Bogdanis, G.C., Nevill, M.E., Boobis, L.H., and Lakomy, H.K. (1996). Contribution phosphocreatine and aerobic metabolism to energy supply during repeated sprint exercise. *J. Appl. Physiol.* 80, 876–884.
14. BANGSBO, J. Physiology of soccer – with special reference to intense Intermittent exercise. *Acta Physiol Scand* 151 (619): 1–155, 1994.

15. BANGSBO, J. Energy demands in competitive soccer. *J Sports Sci* 12 No: S5-12, 1994.
16. Böning, D. (1997). Altitude and Hypoxia Training - A Short Review. *Int. J. Sports Med.* 18, 565–570.
17. Bravo, D., Impellizzeri, F., Rampinini, E., Castagna, C., Bishop, D., and Wisloff, U. (2008). Sprint vs. Interval Training in Football. *Int. J. Sports Med.* 29, 668–674.
18. Brechbuhl, C. (2018). Suivi physiologique et entraînement en hypoxie chez des joueurs de tennis élite.
19. Brocherie, F., Girard, O., Faiss, R., and Millet, G.P. (2015). High-intensity intermittent training in hypoxia: a double-blinded, placebo-controlled field study in youth football players. *J. Strength Cond. Res.* 29, 226–237.
20. Brocherie, F., Girard, O., Faiss, R., and Millet, G.P. (2017). Effects of Repeated-Sprint Training in Hypoxia on Sea-Level Performance: A Meta-Analysis. *Sports Med. Auckl. NZ.*
21. Buchheit, M., Laursen, P., Kuhnle, J., Ruch, D., Renaud, C., and Ahmaidi, S. (2009). Gamebased Training in Young Elite Handball Players. *Int. J. Sports Med.* 30, 251–258.
22. Buchheit, M., Mendez-Villanueva, A., Quod, M., Quesnel, T., and Ahmaidi, S. (2010). Improving Acceleration and Repeated Sprint Ability in Well-Trained Adolescent Handball Players: Speed versus Sprint Interval Training. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 5, 152–164.
23. Buchheit, M., and Ufland, P. (2011). Effect of endurance training on performance and muscle reoxygenation rate during repeated-sprint running. *Eur. J. Appl. Physiol.* 111, 293–301.
24. Casey, D.P., and Joyner, M.J. (2012). Compensatory vasodilatation during hypoxic exercise: mechanisms responsible for matching oxygen supply to demand. *J. Physiol.* 590, 6321–6326.
25. CARLING, C. Comparison of physical and technical performance in European soccer match- play: FA Premier League and La Liga. *Eur J Sport Sci* 11 (1): 51-59, 2011.
26. Cazorla G & Farhi A.( 1998) Football: exigences physiques et physiologiquesactuelles. *Revue EPS* 273: 60-66. Editions EPS, BordeauxII.
27. Cometti, G. (1998). La résistance à la vitesse clé de la preparation en sport collectif. CEP Dijon. France.
28. Cleland, S.M., Murias, J.M., Kowalchuk, J.M., and Paterson, D.H. (2012). Effects of prior heavy-intensity exercise on oxygen uptake and muscle deoxygenation kinetics of a subsequent heavy-intensity cycling and knee-extension exercise. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* 37, 138–148.

29. Dawson, B., Goodman, C., Lawrence, S., Preen, D., Polglaze, T., Fitzsimons, M., and Fournier, P. (1997). Muscle phosphocreatine repletion following single and repeated short sprint efforts. *Scand. J. Med. Sci. Sports* 7, 206–213.
30. Dellal, A. (2008). *Analyse de l'activité physique du footballeur et de ses conséquences dans l'orientation de l'entraînement : application spécifique aux exercices intermittents courses à haute intensité et aux jeux réduits*. Université de Strasbourg.
31. DELLAL, A, WONG, DP, MOALLA, W, and CHAMARI, K. Physical and technical activity of soccer players in the French first division – with special reference to the playing position. *Int J Sport Med* 31(2), 2010.
32. Dellal, A. (2013). *Une saison de préparation physique en football*. De Boeck. Paris.
33. Dempsey, J.A., and Wagner, P.D. (1999). Exercise-induced arterial hypoxemia. *J. Appl. Physiol.* 87, 1997–2006.
34. Dècle-Lacoste, C. (2014). *La pratique du sport*.
35. Dill, D.B., and Adams, W.C. (1971). Maximal oxygen uptake at sea level and at 3,090-m altitude in high school champion runners. *J. Appl. Physiol.* 30, 854–859.
36. DI SALVO, V, BARON, R, TSCHAN, H, CALDERON MONTERO, FJ, BACHL, N, and PIGOZZI, F. Performance characteristics according to playing position in elite soccer. *Int J Sports Med* 28: 222–227, 2007.
37. Dupont, G., Millet, G.P., Guinhouya, C., and Berthoin, S. (2005). Relationship between oxygen uptake kinetics and performance in repeated running sprints. *Eur. J. Appl. Physiol.* 95, 27–34.
38. Dutka, T.L., and Lamb, G.D. (2004). Effect of low cytoplasmic [ATP] on excitation–contraction coupling in fast-twitch muscle fibres of the rat. *J. Physiol.* 560, 451–468.
39. Edge, J., Bishop, D., Goodman, C., and Dawson, B. (2005). Effects of high- and moderate intensity training on metabolism and repeated sprints. *Med. Sci. Sports Exerc.* 37, 1975–1982.
40. Edge, J., Bishop, D., and Goodman, C. (2006a). Effects of chronic NaHCO<sub>3</sub> ingestion during interval training on changes to muscle buffer capacity, metabolism, and short-term endurance performance. *J. Appl. Physiol.* 101, 918–925.
41. Edge, J., Hill-Haas, S., Goodman, C., and Bishop, D. (2006b). Effects of resistance training on H<sup>+</sup> regulation, buffer capacity, and repeated sprints. *Med. Sci. Sports Exerc.* 38, 2004–2011.

42. Edwards, T., Spiteri, T., Piggott, B., Bonhotal, J., Haff, G. G., & Joyce, C. (2018). Monitoring and Managing Fatigue in Basketball. *Sports*, 6(1), 19. <https://doi.org/10.3390/sports6010019>
43. Enoka, R.M., and Stuart, D.G. (1985). The contribution of neuroscience to exercise studies. *Fed. Proc.* 44, 2279–2285.
44. F.GIL–CH.SEGUIN –Football-initiation et perfectionnement des jeunes-@mphora. 2007
45. Faiss, R., Girard, O., and Millet, G.P. (2013a). Advancing hypoxic training in team sports: from intermittent hypoxic training to repeated sprint training in hypoxia. *Br. J. Sports Med.* 47, i45– i50.
46. Faiss, R., Léger, B., Vesin, J.-M., Fournier, P.-E., Eggel, Y., Dériaz, O., and Millet, G.P. (2013b). Significant Molecular and Systemic Adaptations after Repeated Sprint Training in Hypoxia. *PLoS ONE* 8.
47. Faiss, R., Willis, S., Born, D., Sperlich, B., Vesin, J., Holmberg, H., and Millet, G.P. (2015). Repeated Double-poling Sprint Training in Hypoxia by Competitive Cross-country Skiers. *Med. Sci. Sports Exerc.* 47, 809–817.
48. Fornasier-Santos, C., Millet, G. P., & Woorons, X. (2018). Repeated-sprint training in hypoxia induced by voluntary hypoventilation improves running repeated-sprint ability in
49. Fraser, S.F., Li, J.L., Carey, M.F., Wang, X.N., Sangkabutra, T., Sostaric, S., Selig, S.E., Kjeldsen, K., and McKenna, M.J. (2002). Fatigue depresses maximal in vitro skeletal muscle Na<sup>+</sup> + -K<sup>+</sup> + -ATPase activity in untrained and trained individuals. *J. Appl. Physiol.* 93, 1650–1659.
50. Gabbett, T.J., Stein, J.G., Kemp, J.G., and Lorenzen, C. (2013). Relationship between tests of physical qualities and physical match performance in elite rugby league players. *J. Strength Cond. Res.* 27, 1539–1545.
51. Gaitanos, G.C., Williams, C., Boobis, L.H., and Brooks, S. (1993). Human muscle metabolism during intermittent maximal exercise. *J. Appl. Physiol.* 75, 712–719.
52. Galvin, H.M., Cooke, K., Sumners, D.P., Mileva, K.N., and Bowtell, J.L. (2013). Repeated sprint training in normobaric hypoxia. *Br. J. Sports Med.* 47, i74–i79.
53. Gatterer, H., Philippe, M., Menz, V., Mosbach, F., Faulhaber, M., and Burtscher, M. (2014). Shuttle-Run Sprint Training in Hypoxia for Youth Elite Soccer Players: A Pilot Study. *J. Sports Sci. Med.* 13, 731–735.

54. Geiser, J., Vogt, M., Billeter, R., Zuleger, C., Belforti, F., and Hoppeler, H. (2001). Training High - Living Low: Changes of Aerobic Performance and Muscle Structure with Training at Simulated Altitude. *Int. J. Sports Med.* 22, 579–585.
55. Girard, O., Mendez-Villanueva, A., & Bishop, D. (2011). Repeated-Sprint Ability—Part I. *Sports Medicine*, 41(8), 673-694. <https://doi.org/10.2165/11590550-000000000-00000>
56. Girard, O., Brocherie, F., and Millet, G.P. (2017). Effects of Altitude/Hypoxia on Single- and Multiple-Sprint Performance: A Comprehensive Review. *Sports Med. Auckl. NZ.*
57. Glaister, M., Howatson, G., Pattison, J. R., & 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>
58. Goods, P.S.R., Dawson, B., Landers, G.J., Gore, C.J., and Peeling, P. (2015). No Additional Benefit of Repeat-Sprint Training in Hypoxia than in Normoxia on Sea-Level Repeat-Sprint Ability. *J. Sports Sci. Med.* 14, 681–688.
59. Grebot (Elisabeth), Images mentales et stratégies d'apprentissage,2006
60. Gréhaigne, J. F., & Bouthier, D. (1994). Analyse des évolutions entre deux configurations du jeu en football. *Science et motricité*, 24(44-52).
61. Haseler, L.J., Hogan, M.C., and Richardson, R.S. (1999). Skeletal muscle phosphocreatine recovery in exercise-trained humans is dependent on O<sub>2</sub> availability. *J. Appl. Physiol.* 86, 2013–2018.
62. Hautier, C.A., Linossier, M.T., Belli, A., Lacour, J.R., and Arsac, L.M. (1996). Optimal velocity for maximal power production in non-isokinetic cycling is related to muscle fibre type composition. *Eur. J. Appl. Physiol.* 74, 114–118.
63. Hill-Hass, S. et al. (2007). Effects of rest interval during high-repetition resistance training on strength, aerobic fitness, and repeated-sprint ability. *Journal of Sports Sciences*, April 2007; 25(6): 619 - 628.
64. Hill-Haas, S.V., Dawson, B.T., Coutts, A.J., and Rowsell, G.J. (2009). Physiological responses and time-motion characteristics of various small-sided soccer games in youth players. *J. Sports Sci.* 27, 1–8.
65. Hirvonen, J., Rehunen, S., Rusko, H., and Harkonen, M. (1987). Breakdown of high-energy phosphate compounds and lactate accumulation during short supramaximal exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.* 56, 253–259.

66. Hoppeler, H., Kleinert, E., Schlegel, C., Claassen, H., Howald, H., Kayar, S., and Cerretelli, P. (1990). II. Morphological Adaptations of Human Skeletal Muscle to Chronic Hypoxia\*. *Int. J. Sports Med.* 11, S3–S9.
67. Hoppeler, H., and Vogt, M. (2001). Hypoxia training for sea-level performance. Training highliving low. *Adv. Exp. Med. Biol.* 502, 61–73.
68. Juel, C., Pilegaard, H., Nielsen, J.J., and Bangsbo, J. (2000). Interstitial K<sup>+</sup> in human skeletal muscle during and after dynamic graded exercise determined by microdialysis. *Am. J. Physiol.- Regul. Integr. Comp. Physiol.* 278, R400–R406.
69. Johnston, R.D., and Gabbett, T.J. (2011). Repeated-sprint and effort ability in rugby league players. *J. Strength Cond. Res.* 25, 2789–2795.
70. Kanstrup, I.L., and Ekblom, B. (1984). Blood volume and hemoglobin concentration as determinants of maximal aerobic power. *Med. Sci. Sports Exerc.* 16, 256–262.
71. Karatzaferi, C., de Haan, A., van Mechelen, W., and Sargeant, A.J. (2001). Metabolic Changes in Single Human Muscle Fibres During Brief Maximal Exercise. *Exp. Physiol.* 86, 411–415.
72. Kasai, N., Mizuno, S., Ishimoto, S., Sakamoto, E., Maruta, M., and Goto, K. (2015). Effect of training in hypoxia on repeated sprint performance in female athletes. *Springer Plus* 4.
73. King, T., Jenkins, D., and Gabbett, T. (2009). A time-motion analysis of professional rugby league match-play. *J. Sports Sci.* 27, 213–219.
74. Lago-Peñas, C. (2012). Le rôle des variables situationnelles dans l'analyse de la performance physique au football. *Journal of human kinetics* , 35 , 89.
75. Lambertin, F. (2000). Football, Préparation physique intégrée. Amphora.
76. Lapointe, J. (2020). Impact de l'hypoventilation volontaire sur l'entraînement de la capacité à répéter des sprints chez les joueurs de basketball (Doctoral dissertation, Université Laval).
77. Le Gallais, D.; Millet, G. (2007). La préparation physique. Elsevier Masson. Paris.
78. Le Guyader, J. (1999). *manuel de préparation physique*. Chiron.
79. Levine, B.D., and Stray-Gundersen, J. (1997). “Living high-training low”: effect of moderate altitude
80. acclimatization with low-altitude training on performance. *J. Appl. Physiol.* Bethesda
81. Md 1985 83, 102–112.
82. Lesserteur, A. (2009). *Entraîneur de football. La préparation physique*. Actio.

83. Lundby, C., Calbet, J.A.L., and Robach, P. (2009). The response of human skeletal muscle
84. tissue to hypoxia. *Cell. Mol. Life Sci.* 66, 3615–3623.
85. Martin-Krumm C, J Heutte, F Fenouillet, J Kaplan, , R Bachelet. *Expérience des flux : recherche empirique et applications*, 2016, 127-143
86. Manno ., K. E, Ferslew, J. E., Manno, B. R., Vekovius, W. A., Hubbard, J. M., & Bairnsfather, L. E. (1982). Pursuit meter II, a computer-based device for testing pursuit-tracking performance. *Perceptual and Motor Skills*, 54(3), 779-784.
87. Manno, R., Wolf, W., Takach, A., Huang, CYet Wu, E. (1992, juin). Le système de synthèse comportementale de l'Université de Princeton. Dans [1992] *Proceedings 29th ACM/IEEE Design Automation Conference* (pp. 182-187). IEEE.
88. Matveiev, L.P.(1977. *Principe de l'entraînement sportif*. Culture Physique et Sport.
89. Moscou.
90. Matveiev, L.P. (1983): *Aspects Fondamentaux de l'entraînement*. Vigot, Paris.
91. McDonough, P., Behnke, B.J., Padilla, D.J., Musch, T.I., and Poole, D.C. (2005). Control of
92. microvascular oxygen pressures in rat muscles comprised of different fibre types. *J. Physiol.*
93. 563, 903–913.
94. McGawley, K., and Bishop, D. (2008). Anaerobic and aerobic contribution to two, 5 x 6-s repeated-sprint bouts. *Coach. Sport Sci. J.* 3, 52.
95. Mendez-Villanueva, A., Hamer, P., & 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>
96. Mendez-Villanueva, A., Edge, J., Suriano, R., Hamer, P., and Bishop, D. (2012). The Recovery of Repeated-Sprint Exercise Is Associated with PCr Resynthesis, while Muscle pH and EMG Amplitude Remain Depressed. *PLOS ONE* 7, e51977.
97. Millet, G.P., Brocherie, F., Faiss, R., and Girard, O. (2015). Entraînement en altitude dans les sports collectifs (de boeck).
98. Mombaerts, E. (1991). Football, de l'analyse du jeu à la formation du joueur. Actio.
99. Montero, D., and Lundby, C. (2017). No Improved Performance With Repeated-Sprint Training in Hypoxia Versus Normoxia: A Double-Blind and Crossover Study. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 12, 161–167.

100. Morozov, A. I. (1974). Plasma accelerators. *Plasma accelerators Transl. into ENGLISH from the monograph"" Plazmennye Uskoriteli""USSR*, 5-15.
101. Morrison, S.C., Stubbing, D.G., Zimmerman, P.V., and Campbell, E.J. (1982). Lung volume, closing volume, and gas exchange. *J. Appl. Physiol.* 52, 1453–1457.
102. Noakes, T.D. (2012). Fatigue is a Brain-Derived Emotion that Regulates the Exercise Behavior to Ensure the Protection of Whole Body Homeostasis. *Front. Physiol.* 3.
103. Puype, J., Van Proeyen, K., Raymackers, J.-M., Deldicque, L., and Hespel, P. (2013). Sprint Interval Training in Hypoxia Stimulates Glycolytic Enzyme Activity: *Med. Sci. Sports Exerc.* 45, 2166–2174.
104. Pradet, M. (1996) *La préparation physique*. Collection Entraînement, INSEP .
105. Pyne, D.B., Saunders, P.U., Montgomery, P.G., Hewitt, A.J., and Sheehan, K. (2008). Relationships Between Repeated Sprint Testing, Speed, and Endurance: *J. Strength Cond. Res.* 22, 1633–1637.
106. Racinais, S., Bishop, D., Denis, R., Lattier, G., Mendez-Villaneuva, A., and Perrey, S. (2007). Muscle Deoxygenation and Neural Drive to the Muscle during Repeated Sprint Cycling: *Med. Sci. Sports Exerc.* 39, 268–274.
107. Rampinini, E., Coutts, A., Castagna, C., Sassi, R., and Impellizzeri, F. (2007). Variation in Top Level Soccer Match Performance. *Int. J. Sports Med.* 28, 1018–1024.
108. Rampinini, E., Sassi, A., Morelli, A., Mazzoni, S., Fanchini, M., and Coutts, A.J. (2009). Repeated-sprint ability in professional and amateur soccer players. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* 34, 1048–1054.
109. Roberts, A.D., Billeter, R., and Howald, H. (1982). Anaerobic Muscle Enzyme Changes After Interval Training. *Int. J. Sports Med.* 03, 18–21.
110. Ross, A., Leveritt, M., and Riek, S. (2001). Neural influences on sprint running: training adaptations and acute responses. *Sports Med. Auckl. NZ* 31, 409–425.
111. Ruff, R.L., Simoncini, L., and Stühmer, W. (1988). Slow sodium channel inactivation in mammalian muscle: A possible role in regulating excitability. *Muscle Nerve* 11, 502–510.
112. Saltin, B. (1960). Intermittent exercise: its physiology and some practical implications. *Advances in exercise physiology, Karger, Basel, 1960 ; 34 : 87-114* Sibila, M. et al.
113. Sharp, R.L., Costill, D.L., Fink, W.J., and King, D.S. (1986). Effects of eight weeks of bicycle ergometer sprint training on human muscle buffer capacity. *Int. J. Sports Med.* 7, 13–17.

114. Sirotic, A.C., Coutts, A.J., Knowles, H., and Catterick, C. (2009). A comparison of match demands between elite and semi-elite rugby league competition. *J. Sports Sci.* 27, 203–211.
115. Spencer, M., Lawrence, S., Rechichi, C., Bishop, D., Dawson, B., and Goodman, C. (2004). Time-motion analysis of elite field hockey, with special reference to repeated-sprint activity. *J. Sports Sci.* 22, 843–850.
116. Spencer, M., Bishop, D., Dawson, B., and Goodman, C. (2005). Physiological and metabolic responses of repeated-sprint activities: specific to field-based team sports. *Sports Med. Auckl. NZ* 35, 1025-1044.
117. Spencer, M., Bishop, D., Dawson, B., Goodman, C., and Duffield, R. (2006). Metabolism and Performance in Repeated Cycle Sprints: Active versus Passive Recovery. *Med. Sci. Sports Exerc.* 38, 1492–1499.
118. Spriet, L.L., Lindinger, M.I., McKelvie, R.S., Heigenhauser, G.J., and Jones, N.L. (1989). Muscle glycogenolysis and H<sup>+</sup> concentration during maximal intermittent cycling. *J. Appl. Physiol.* 66, 8–13.
119. Söderlund, K., and Hultman, E. (1991). ATP and phosphocreatine changes in single human muscle fibers after intense electrical stimulation. *Am. J. Physiol.* 261, E737-741.
120. Taylor, J., Macpherson, T., Spears, I., and Weston, M. (2015). The effects of repeated-sprint training on field-based fitness measures: a meta-analysis of controlled and non-controlled trials. *Sports Med. Auckl. NZ* 45, 881–891.
121. Thomas, C., Sirvent, P., Perrey, S., Raynaud, E., and Mercier, J. (2004). Relationships between maximal muscle oxidative capacity and blood lactate removal after supramaximal exercise and fatigue indexes in humans. *J. Appl. Physiol.* 97, 2132–2138.
122. Tomlin, D.L., and Wenger, H.A. (2001). The Relationship Between Aerobic Fitness and Recovery from High Intensity Intermittent Exercise. *Sports Med.* 31, 1–11.
123. Trapattoni, G. (1999). *Entraîneur de soccer de haut niveau* . Reedswain Inc..
124. Trincat, L., Woorons, X., and Millet, G.P. (2017). Repeated-Sprint Training in Hypoxia Induced by Voluntary Hypoventilation in Swimming. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 12, 329– 335.
125. Verheijen R. Conditioning for soccer. Eds Reedswain. 1998
126. Vigne G. Détermination et variation du profil physique du footballeur de très haut niveau – référence spéciale aux performances athlétiques selon les différents postes de jeu orientant sur la validation d'un test d'agilité – *Thèse de l'université de Lyon* ; Décembre 2011

127. Weineck, J. (1997). *Manuel d'entraînement, Physiologie de la performance et de son développement dans l'entraînement de l'enfant et de l'adolescent*. Vigot.
128. Weineck J. (2001). *manuel d'entrainement, physiologie de la performance sportive et de son développement dans l'entrainement. collection sport et enseignement. vigot*.
129. Weinberg, R. S., & Gould, D. (2014). *Foundations of sport and exercise psychology 6th Edition. Human Kinetics*.
130. Westerblad, H., Allen, D.G., and Lännergren, J. (2002). Muscle fatigue: lactic acid or inorganic phosphate the major cause? *News Physiol. Sci. Int. J. Physiol. Prod. Jointly Int. Union Physiol. Sci. Am. Physiol. Soc. 17*, 17–21.
131. Williams AM, hodes NJ, North JS, Barton G. Perceiving patterns of play in dynamic sport tasks: investigating the essential information underlying skilled performance. *Perception*. 2006. 35(3: 317-32
132. Wisløff, U., Castagna, C., Helgerud, J., Jones, R. et Hoff, J. (2004). Forte corrélation entre la force de squat maximale et les performances de sprint et la hauteur de saut vertical chez les footballeurs d'élite. *Journal britannique de médecine sportive* , 38 (3), 285-288.
133. Woorons, X., Mollard, P., Pichon, A., Duvallet, A., Richalet, J.-P., and Lamberto, C. (2007a). Prolonged expiration down to residual volume leads to severe arterial hypoxemia in athletes during submaximal exercise. *Respir. Physiol. Neurobiol. 158*, 75–82.
134. Woorons, X., Mollard, P., Pichon, A., Lamberto, C., Duvallet, A., and Richalet, J.-P. (2007b). Moderate exercise in hypoxia induces a greater arterial desaturation in trained than untrained men. *Scand. J. Med. Sci. Sports 17*, 431–436.
135. Woorons, X., Mollard, P., Pichon, A., Duvallet, A., Richalet, J.-P., and Lamberto, C. (2008). Effects of a 4-week training with voluntary hypoventilation carried out at low pulmonary volumes. *Respir. Physiol. Neurobiol. 160*, 123–130.
136. Woorons, X., Bourdillon, N., Vandewalle, H., Lamberto, C., Mollard, P., Richalet, J.-P., and Pichon, A. (2010). Exercise with hypoventilation induces lower muscle oxygenation and higher blood lactate concentration: role of hypoxia and hypercapnia. *Eur. J. Appl. Physiol. 110*, 367– 377.
137. Woorons, X., Bourdillon, N., Lamberto, C., Vandewalle, H., Richalet, J.-P., Mollard, P., and Pichon, A. (2011). Cardiovascular responses during hypoventilation at exercise. *Int. J. Sports Med. 32*, 438–445.
138. Woorons, X., Gamelin, F.-X., Lamberto, C., Pichon, A., & Richalet, J. P. (2014). Swimmers can train in hypoxia at sea level through voluntary hypoventilation. *Respiratory Physiology & Neurobiology, 190*, 33-39.

139. Woorons, X., Mucci, P., Aucouturier, J., Anthierens, A., and Millet, G.P. (2017). Acute effects of repeated cycling sprints in hypoxia induced by voluntary hypoventilation. *Eur. J. Appl. Physiol.*
140. Yamamoto, Y., Mutoh, Y., Kobayashi, H., and Miyashita, M. (1987). Effects of reduced frequency breathing on arterial hypoxemia during exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.* 56, 522–527.
141. Yanagiya, T., Kanehisa, H., Kouzaki, M., Kawakami, Y., & Fukunaga, T. (2003). Effect of Gender on Mechanical Power Output During Repeated Bouts of Maximal Running in Trained Teenagers. *International Journal of Sports Medicine*, 24(04), 304-310. <https://doi.org/10.1055/s-2003-39508>
142. Zatsiorsky, V.M., & Kraemer (2006). *Science and Practice of Strength Training*. Second Edition. Human Kinetics. Champaign. 251 pages.

**Site internet :**

<https://www.sportsmanagementschool.fr/blog-sms/quelle-est-lhistoire-du-football>

<https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/entra%C3%AEnement/29985>

<https://entrainementdefoot.fr/quelles-sont-les-qualites-sollicitees-au-football/>

[https://www.google.com/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=0CAIQw7AJahcKEwi45-K74Zb\\_AhUAAAAAHQAAAAAQAw&url=https%3A%2F%2Fwww.aeeps.org%2Fajouter-un-fichier%2Fdoc\\_download%2F183-morin20100924.html&psig=AOvVaw1OHu23CA\\_t\\_73awSyCSY3r1&ust=1685320282044116](https://www.google.com/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=0CAIQw7AJahcKEwi45-K74Zb_AhUAAAAAHQAAAAAQAw&url=https%3A%2F%2Fwww.aeeps.org%2Fajouter-un-fichier%2Fdoc_download%2F183-morin20100924.html&psig=AOvVaw1OHu23CA_t_73awSyCSY3r1&ust=1685320282044116)

[https://www.chuv.ch/fileadmin/sites/cms/documents/CMS-Andric\\_Milorad\\_Entrainement\\_en\\_hypoventilation.pdf](https://www.chuv.ch/fileadmin/sites/cms/documents/CMS-Andric_Milorad_Entrainement_en_hypoventilation.pdf)

<http://doi.org/10.1016/j.resp.2013.08.022>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1569904813003042?via%3Dihub>

<https://www.hypoventilation-training.com/Hypoquoi.html>

## Résumé

Notre étude s'est focalisée sur l'impacte de l'entraînement en hypoventilation volontaire à bas volume pulmonaire réduit sur la capacité à répéter des sprints chez les footballeurs.

Notre échantillon de recherche était composé de 30 joueurs de football masculins de la catégorie sénior, un groupe expérimental (RBBH) qui a suivi le programme d'entraînement en hypoventilation volontaire, et un groupe témoin (RCS) qui s'est entraîné avec le même programme mais dans des conditions de respiration normale. Nous avons utilisé le test RAST (Running Anaerobic-based Sprint Test) pour évaluer la capacité à répéter des sprints avant et après six semaines d'entraînement.

Les deux groupes ont démontré l'absence de différences significatives en termes d'âge, de taille et de poids. De plus, ils étaient similaires à la semaine 0, c'est-à-dire avant le début du programme planifié pour notre étude. En effet, lors du pré-test, les deux ont été évaluées en termes de sprint moyen, puissance, score de détérioration, indice de fatigue et perception d'effort de l'exercice. Les résultats n'ont pas montré de différence significative par rapport à la valeur critique au seuil de signification de 0,05 entre les deux groupes.

Après 6 semaines d'entraînement, lors du post-test, Une différence significative a été observée entre les deux groupes en termes de RSA. Le groupe expérimental avait obtenu des performances significativement améliorées par rapport au groupe témoin dans plusieurs domaines clés. Le temps moyen des sprints était plus court pour le groupe expérimental, indiquant une amélioration de la capacité à générer une puissance maximale sur de courtes distances. De plus, le groupe expérimental a présenté un score de détérioration plus faible, une fatigue réduite et une perception d'effort moindre par rapport au groupe témoin.

Ces résultats ont confirmés notre hypothèse et affirme que l'entraînement en hypoventilation volontaire est une approche prometteuse pour améliorer la capacité à répéter des sprints chez les footballeurs.

## **Abstract**

Our study focused on the impact of training in voluntary hypoventilation with reduced lung volume on the ability to repeat sprints in football players. Our research sample consisted of 30 male senior football players, with an experimental group (RBBH) undergoing training in voluntary hypoventilation, and a control group (RCS) training with the same program but under normal breathing conditions. We used the Running Anaerobic-based Sprint Test (RAST) to evaluate the ability to repeat sprints before and after six weeks of training.

Both groups showed no significant differences in terms of age, height, and weight. Additionally, they were similar at week 0, prior to the start of the planned program for our study. Indeed, during the pre-test, both groups were assessed in terms of average sprint, power, deterioration score, fatigue index, and perceived exertion. The results did not show a significant difference compared to the critical value at the 0.05 significance level between the two groups.

After 6 weeks of training, during the post-test, a significant difference was observed between the two groups in terms of RSA (Repetition Sprint Ability). The experimental group showed significantly improved performances compared to the control group in several key areas. The average sprint time was shorter for the experimental group, indicating an improvement in the ability to generate maximum power over short distances. Additionally, the experimental group exhibited a lower deterioration score, reduced fatigue, and lower perceived exertion compared to the control group.

These results confirmed our hypothesis and affirm that training in voluntary hypoventilation is a promising approach to enhance the ability to repeat sprints in football players.

## ملخص

ارتكزت دراستنا على تأثير التدريب على التنفس الضعيف الطوعي بحجم رئوي منخفض على القدرة على تكرار الانطلاقات السريعة لدى لاعبي كرة القدم.

كانت عينتنا البحثية مكونة من 30 لاعباً من فئة الشباب البالغين في كرة القدم ، حيث كان هناك مجموعة تجريبية (RBBH) التي خضعت لبرنامج التدريب على التنفس الضعيف الطوعي ومجموعة شاهدة (RCS) تدربت باستخدام نفس البرنامج ولكن في ظروف التنفس العادي. لقد استخدمنا اختبار ( RAST) اختبار الركض بناءً على التمرينات اللاهوائية) لتقييم القدرة على تكرار الانطلاقات السريعة قبل وبعد ستة أسابيع من التدريب.

أظهرت الدراسة عدم وجود فروق معنوية في العمر والطول والوزن بين الفرقتين. بالإضافة إلى ذلك ، كانت متشابهة في الأسبوع 0 ، أي قبل بدء البرنامج المخطط لدراستنا. في الواقع ، تم تقييم كل منهما في الاختبار التمهيدي من حيث الركض المتوسط ، والقوة ، ونتيجة التدهور ، ومؤشر التعب ، وإدراك الجهد البدني للتمرين. لم تظهر النتائج فروقاً معنوية بالنسبة للقيمة الحرجة عند مستوى الدلالة 0.05 بين الفرقتين.

بعد 6 أسابيع من التدريب ، في الاختبار التالي ، لوحظ اختلاف معنوي بين الفرقتين فيما يتعلق بقدرة التكرار السريع. RSA. حققت المجموعة التجريبية تحسناً ملحوظاً في الأداء مقارنةً بالمجموعة الشاهدة في العديد من المجالات الرئيسية. كانت مدة الانطلاقات السريعة المتوسطة أقصر بالنسبة للمجموعة التجريبية ، مما يشير إلى تحسن في القدرة على توليد الطاقة القصوى على مسافات قصيرة. بالإضافة إلى ذلك ، كانت لدى المجموعة التجريبية نتيجة تدهور أقل ، وتعب أقل ، وإدراك جهد أقل مقارنةً بالمجموعة الشاهدة.

تأكدت فرضيتنا من هذه النتائج وأكدت أن التدريب على التنفس الضعيف الطوعي بحجم رئوي منخفض هو نهج واعد لتحسين القدرة على تكرار الانطلاقات السريعة لدى لاعبي كرة القدم.