

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

Année Universitaire 2024-2025

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

MEMOIRE de M2

**Quels facteurs biomécaniques ou anthropométriques influencent
le plus l'accélération chez les jeunes footballeurs prépubères
élites ?**

Présenté par : Matéo NAJJAR

Sous la direction de : Philippe CAMPILLO

Soutenu le : 22 mai 2025



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

Remerciements

Je tiens à remercier Monsieur Jean-Michel Vandamme, directeur du centre de formation, pour avoir accepté de pouvoir intervenir au sein du Lille Olympique Sporting Club en tant qu'éducateur et préparateur athlétique à l'éveil.

Je tiens également à remercier Lucas Kiebbe, responsable de la préparation athlétique, ainsi que Michel Bachelet, responsable de la section éveil ; ainsi que les autres éducateurs du LOSC d'avoir pu m'aider et m'accompagner dans la mise en place de ce mémoire.

Pour finir, je tiens à remercier, Monsieur Phillippe Campillo, enseignant chercheur de la faculté des Sciences du Sport et de l'Education Physique de Lille, pour son aide ainsi que sa disponibilité durant toute la réalisation du mémoire.

Sommaire

1) Introduction	8
2) Revue de littérature.....	9
2.1) L'accélération lors du sprint	9
2.2) L'accélération chez les joueurs de football prépubères	15
3) Présentation de l'étude	19
3.1) Problématique	19
3.2) Objectifs de l'étude	19
3.3) Hypothèses de l'étude	20
4) Caractéristiques de l'étude	22
4.1) Milieu professionnel	22
4.2) Caractéristiques des sujets aux 3 périodes	23
4.3) Protocole de l'étude	23
4.4) Matériel et tests utilisés.....	24
4.5) Analyses statistiques	25
5) Résultats	27
5.1) Comparaison des moyennes d'évolution entre les 3 périodes	27
5.2) Dispersion des moyennes d'évolution entre les 3 périodes	30
5.3) Les corrélations entre l'évolution de l'accélération et les paramètres biomécaniques et anthropométriques.....	31
6) Discussion	34
6.1) Evolution de l'accélération durant la période T1/T2 du protocole	34
6.2) Influence des facteurs biomécaniques sur l'évolution de l'accélération	34
6.3) Influence des facteurs anthropométriques sur l'évolution de l'accélération	35
7) Conclusion	36
7.1) Résumé des résultats de l'étude	36

7.2) Perspectives de l'étude.....	36
8) Bibliographie	37
9) Annexes.....	41
9.1) Annexe 1 : protocole du test MySprint	41
9.2) Annexe 2 : Protocole du test de souplesse active des ischios-jambiers.....	43
9.3) Annexe 3 : Programmation d'interventions du GT1.....	44
9.4) Annexe 4 : Programmation d'interventions avec le GT2	45

Glossaire

FFF : Fédération française de Football

m : mètres

s : seconde

m.s⁻¹ : mètre par seconde

m.s⁻² : mètre par seconde carré

U5...U12 : Under Five... Under Twelve (en dessous de x années)

GC/ GT : Groupe contrôle et groupe test

ATP : Adénosine triphosphate

ES : Effect Size

p : probabilité

PHV: Pic of Height Velocity

T0/T1/T2 : période

IJ : ischios-jambiers

r : coefficient de corrélation

LOSC : Lille Olympique Sporting Club

SC: Sporting Club

Kg : Kilogramme

IMC : Indice de Masse Corporelle

d : distance

Hz : Hertz

1) Introduction

Le football est le sport le plus populaire du monde avec plus de 265 millions de joueurs pratiquant ce sport. Si l'on regarde sur le site de la FFF (2022), il y a actuellement 811 752 licenciés qui ont moins de 13 ans et donc qui pratique le football au sein des sections éveils des clubs (de U5 à U12). Le football est donc un sport qui est pratiqué pour son côté loisir mais également pour la performance sportive. Si l'on prend les dimensions du terrain pour les catégories de U9 à U11, la longueur sera comprise entre 60 et 70 m tandis que la largeur sera comprise entre 45 et 55 m. Ces dimensions vont induire des enjeux spécifiques par rapport aux catégories prépubères.

La vitesse de course (impliquant une importante accélération) est une qualité physique importante dans le football. En effet, on peut remarquer au cours des dernières années une évolution de ces paramètres physiques (Rhodes et al. 2021). Selon Silva et ses collaborateurs (2022), le football dans les catégories U10 et U11 de haut niveau demande des exigences de course à haute intensité. L'accélération fait donc partie des qualités recherchées chez un joueur de football prépubère pour intégrer un centre de formation. Une revue scientifique sortie en 2019 par Vieira et ses collaborateurs nous indique une augmentation exponentielle du nombre d'études sur les performances de course de match lors de la dernière décennie. Ces études ont pour objectifs d'aider à la compréhension du jeu et à la prise de décision concernant le contenu et les prescriptions d'entraînement physique individuel et collectif. Cela permet également de distinguer les performances des joueurs selon les normes compétitives et également de pouvoir clarifier les exigences nécessaires lors du passage à des tranches d'âge plus âgées. Comme indiqué dans la revue, il est essentiel de distinguer les différences physiologiques et cognitives entre les footballeurs prépubères et les adultes. Les U10 et U11 évoluant à un niveau élite ne doivent pas être considérés comme de « petits adultes ». Par conséquent, les méthodes d'entraînement visant à améliorer la vitesse de course doivent être adaptées à leur niveau de maturation physiologique et psychologique. Pour atteindre rapidement un pic de vitesse maximale, de nombreuses études soulignent l'importance d'une fréquence et d'une amplitude de foulée élevées. Les recherches, notamment celles de Chatzilazaridis (2024) et Bustamante-Garrido (2024) et leurs collaborateurs, mettent également en évidence l'influence de facteurs tels que l'âge, le sexe, les caractéristiques physiques et biomécaniques sur l'amélioration de la phase d'accélération.

Cette étude vise à analyser l'impact de l'évolution des paramètres de foulée (amplitude et fréquence) ainsi que des caractéristiques anthropométriques sur l'amélioration de l'accélération en sprint chez des joueurs de football prépubères (9-10 ans) de niveau élite. Un total de 23 joueurs compose le groupe test (GT), dont 12 participants dans le groupe 1 (GT1) et 11 dans le groupe 2 (GT2). L'âge moyen des sujets est de $9,84 \pm 0,23$ ans, avec une taille moyenne de $1,41 \pm 0,05$ m et un poids moyen de $33,81$

$\pm 4,12$ kg à la période T0. L'analyse portera sur l'évolution de l'accélération (test de sprint sur 30 m), de la fréquence et de l'amplitude de foulée, ainsi que de la souplesse des ischio-jambiers. Le protocole s'étalera sur 30 semaines, avec des tests réalisés à trois moments : T0 (au début de l'étude), T1 (intermédiaire, après 15 semaines) et T2 (final, 15 semaines après T1). Pendant les 15 premières semaines, les deux groupes suivront un entraînement de football classique, tandis que, dans les 15 semaines suivantes, GT1 se concentrera sur l'amplitude de foulée et la souplesse activo-dynamique, tandis que GT2 mettra l'accent sur la fréquence de foulée et la technique de course.

Éléments	GT1	GT2
Objectifs	Amplitude de foulée + souplesse	Fréquence de foulée + technique
Phase 1 T0/T1	Entraînement classique (15 semaines)	Entraînement classique (15 semaines)
Phase 2 T1/T2	Travail spécifique (sem. 16–30)	Travail spécifique (sem. 16–30)
Tests	Sprint 30m, Knee extension test, taille/poids	Sprint 30m, Knee extension test, taille/poids
Mesures	Accélération, foulée, souplesse	Accélération, foulée, souplesse

Tableau 1: Tableau récapitulatif de l'étude

Cette organisation permettra d'évaluer quel paramètre influence le plus l'amélioration de l'accélération.

A la suite de cette introduction, nous pouvons retrouver la revue de littérature définissant le sprint et ses différentes caractéristiques biomécaniques.

2) Revue de littérature

2.1) L'accélération lors du sprint

2.1.1) Définition du sprint et de la vitesse

Selon Morin et ses collaborateurs (2011), le sprint est caractérisé comme une action motrice impliquant une production de force maximale dans un laps de temps réduit. Il sera caractérisé par une accélération initiale rapide et une recherche de vitesse maximale, dépendant de l'interaction optimale entre force et vitesse.

Si l'on prend la définition de la vitesse dans le dictionnaire, elle peut se définir dans le contexte physique comme le rapport entre une distance parcourue et une unité de temps. Son unité va donc être

en mètre par seconde (m.s^{-1}). Sur le plan mécanique, elle correspond à la dérivée de la position par rapport à un temps. Cela permet de comprendre que la vitesse peut être calculée sur une distance en réalisant une moyenne de la position d'un objet sur différents temps. On peut également calculer une vitesse instantanée en mesurant la vitesse d'un objet à une position précise

Dans le livre *La nouvelle Bible de la Préparation physique* écrit par Reiss en 2020, la vitesse durant un sprint peut se décomposer en 5 étapes : le départ, l'accélération, la vitesse maximale, maintien de la vitesse maximale et phase de décélération. La vitesse durant un sprint va donc varier au cours d'un sprint et cette variation est bien connue dans le domaine scientifique, elle correspond à l'accélération.

2.1.2) L'accélération

Si l'on prend également la définition du dictionnaire, l'accélération est définie comme une grandeur vectorielle qui mesure la variation (ou le taux de changement) de la vitesse d'un objet ou d'un corps par unité de temps. Elle va indiquer l'intensité et la direction du changement de vitesse d'un mouvement. Son unité de mesure correspond au mètre par seconde carré (m.s^{-2}).

Lors d'un sprint, l'accélération peut être définie comme le taux de variation de la vitesse d'un athlète dans un intervalle de temps ou sur une distance définie, qui part du repos jusqu'à ce que l'athlète atteigne une vitesse maximale ou sous-maximale. C'est également une variation de vitesse positive (Murphy, 2003) ou négative (décélération).

Selon Reiss (2020) dans la partie *développer sa vitesse* dans le livre cité auparavant, il est dit que la phase d'accélération semble être influencée par la capacité d'accélération et le taux de montée en force-vitesse/explosivité. Cependant, il ne parle pas des paramètres biomécaniques permettant d'optimiser l'accélération.

En 2024, Moura et ses collaborateurs ont publié une revue systématique concernant les variables biomécaniques pour la performance de chaque phase de sprint en athlétisme, il est dit que la phase d'accélération va être caractérisée par une transition de fréquence et de longueur de pas, une force de propulsion et une minimisation de la force de freinage. Cela signifie que l'entraînement de ces paramètres pourrait être un moyen d'améliorer l'accélération des sportifs.

2.1.3) La fréquence de foulée

La **fréquence de foulée** est un paramètre clé dans la littérature scientifique, souvent désigné sous le terme "step frequency" (Kural et al., 2024). Elle est définie comme le nombre de foulées effectuées sur une période donnée. Pour la mesurer, on peut compter les pas effectués par une seule jambe, puis multiplier ce chiffre par 2 pour obtenir la fréquence de foulée sur un sprint. Une fréquence de foulée élevée est associée à un temps de contact au sol réduit, ce qui permet un tempo de course plus rapide.

La **fréquence de foulée** est aussi considérée comme le rapport entre le temps passé au sol et le temps passé en l'air lors de l'appui. Durant la phase d'accélération, ce rapport évolue : au départ, il est de 2 :1 (temps au sol/temps en l'air), et à mesure que la phase d'accélération progresse, il s'ajuste à environ 1 :1.5. Ainsi, l'athlète réduit progressivement le temps de contact au sol pour optimiser son efficacité lors de l'accélération.

Morin et ses collaborateurs (2020) ont pu démontrer que les forces propulsives au sol, la force verticale ainsi que le temps de contact au sol représentent des déterminants clés lors de l'accélération initiale et la phase de transition. Une force verticale importante va permettre un temps de vol approprié pour donner du temps à pouvoir préparer la prochaine phase d'appui. Concernant l'application des forces d'appuis, nous allons avoir majoritairement une composante horizontale et également verticale pour pouvoir se projeter vers l'avant. Les entraîneurs d'athlétisme de nos jours conseillent « d'agripper le sol » ou de « griffer le sol » pour pouvoir favoriser une diminution du temps de contact au sol, avec une force horizontale appliquée qui est plus importante. Sur le site de la Fédération Française d'athlétisme, il est essentiel que le pied d'appui effectue un mouvement orienté de l'avant vers l'arrière, tout en veillant à ce que le talon ne touche jamais le sol pour avoir une foulée plus effective.

Pour permettre une application des forces d'appuis, l'organisme va utiliser le système musculosquelettique pour produire de l'énergie (via les filières énergétiques et donc l'ATP) via les différentes contractions musculaires. Ces différentes contractions musculaires requièrent une importante coordination intersegmentaire pour permettre de transmettre un maximum de force horizontale et verticale.

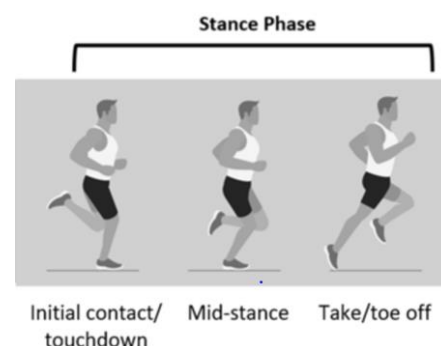


Figure 1: schéma sur la décomposition de la phase d'appui lors du sprint (Howal et al., 2018)

Selon Howard et ses collaborateurs (2018), la phase d'appui ou « stance phase » peut être séparée en 3 moments (*Figure 1*) : la phase d'amortissement (contact initial), la phase de stabilisation (ou transition) et la phase de propulsion (poussée).

Le système musculo-tendineux va donc subir des cycles étirements-raccourcissements (CER) correspondant à des contractions pliométriques (excentrique, isométrique et concentrique) pour permettre un transfert de force qui soit maximal et également le plus court possible. Cette contraction pliométrique a été défini par Cometti en 2004 comme étant la mise en tension d'un muscle obtenue par une phase d'allongement (excentrique) suivie d'une phase d'absorption (isométrique) puis d'une phase de contraction (concentrique). La durée entre la phase excentrique et concentrique doit être très courte (environ 0,2 m.s⁻¹) pour pouvoir définir cet ensemble de phases comme pliométrique.

Tableau 2: Sollicitations musculaires pliométriques lors de la phase d'appui

Phase d'appui	Muscles principaux sollicités	Type de contraction	Rôle clé	Etudes scientifiques
Contact initial (amortissement)	Quadriceps ++ Ischio-jambiers++ triceps sural (soléaire++) Psoas iliaque Fessiers (-)	Excentrique : Étirement sous tension	Absorber l'impact et stocker de l'énergie élastique.	Encarnación-Martínez et al. (2020)
Transition (stabilisation)	Quadriceps Triceps sural Psoas iliaque Fessiers Ischios-jambiers	Isométrique : Stabilisation sans mouvement	Préparer la transition en limitant les pertes d'énergie stockée.	Hanon (2005)
Propulsion (poussée)	Triceps sural (gastrocnémiens++ et soléaires) Psoas iliaque Quadriceps++ Fessiers ++ Ischios-jambiers++	Concentrique : Contraction pour raccourcissement rapide	Libérer l'énergie élastique pour générer une poussée explosive.	Morin et al. (2015) Crotty et al. (2024)

Il est à noter que les muscles stabilisateurs de hanche et du tronc (érecteurs du rachis, muscles profonds abdominaux) permettent également d'assurer un meilleur transfert de force durant cette phase d'appui (Tottori et al., 2021 ; Pandy et al., 2021).

Il est donc possible d'effectuer des exercices de pliométrie pour améliorer la fréquence de pas afin de permettre une amélioration de la force propulsive et également la diminution du temps de contact au sol.

2.1.4) Amplitude de foulée

Dans l'ouvrage collectif écrit par Kural et ses collaborateurs, L'amplitude de foulée appelée « Stride length » est définie comme la distance parcourue par un athlète à chaque pas (distance entre les 2 pas de la jambe droite pour faire une foulée). Elle va dépendre des caractéristiques anatomiques de l'athlète, de sa force, sa flexibilité et ses compétences techniques.

Selon Howard et ses collaborateurs (2017), cette phase d'amplitude peut également être appelée « swing phase » ou phase aérienne et elle est décomposée en 2 parties : la phase de « recovery » à savoir la première partie de la phase aérienne et la phase de retour avant dites « pre-activation » qui correspond à la flexion de hanche et l'extension de genou pour permettre la préparation du prochain appui (*Figure 2*).

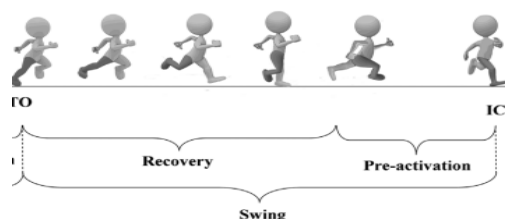


Figure 2: Image issue de la méta-analyse de Howard et al. (2017) : Phase aérienne lors du sprint

Cette phase aérienne va donc dépendre de 3 facteurs principaux : la distance d'impulsion, distance de vol et la distance d'atterrissage. Durant la distance d'impulsion, le centre de masse va se déplacer sur une distance horizontale entre la poussée au sol et le départ du pied. Cette impulsion va dépendre d'une poussée forte et efficace. Durant la distance de vol, le centre de masse se déplace horizontalement en l'air entre 2 pas. Cette distance de vol sera influencée par la vitesse et l'angle de propulsion. Pour finir, la distance d'atterrissage va correspondre au rapprochement du centre de masse au point d'atterrissage optimal pour limiter les forces de freinage.

Tableau 3: sollicitations musculaires lors de la phase aérienne du sprint

Muscles sollicités	Rôle principal pendant la phase aérienne	Type de contraction	Etudes scientifiques
Quadriceps (droit fémoral)	Stabilisation du genou, préparation à l'atterrissage	Concentrique	Howard et al. (2018)
Ischio-jambiers	Récupération rapide de la jambe et contrôle du genou, Permet une extension plus importante du genou pour avoir plus d'amplitude	Excentrique en fin de phase	Kalkhoven et al. (2023)
Fessiers (Glutéal maximus)	Extension de la hanche, maintien de la stabilité du bassin	Concentrique	Howard et al. (2018)
Triceps sural (mollet)	Maintien de la cheville en position neutre	Isométrique	Yamazaki et al. (2021)
Psoas (fléchisseur de la hanche)	Flexion de la hanche, récupération rapide de la jambe arrière	Concentrique	Howard et al. (2018)
Abdominaux / Muscles du tronc	Stabilisation du tronc et du bassin, maintien de l'alignement du corps	Isométrique	Tottori et al. (2021)
Adducteurs (long et court)	Stabilisation de la jambe en phase de vol	Isométrique / Concentrique	Krowlikowska et al. (2023)

Le *tableau 3* ci-dessus nous présente les différentes sollicitations musculaires lors de la phase de swing. On peut observer qu'il n'y a que les ischios-jambiers qui se contractent de manière excentrique sur la phase aérienne et sur la phase d'appui du sprint. Il est donc naturel de se demander si l'amélioration de la souplesse active des ischios-jambiers puissent influencer l'amélioration de l'accélération lors du sprint.

2.1.5) Influence de l'amélioration de la souplesse active des ischios-jambiers sur l'accélération

La souplesse active appelée également « mobilité » peut être définie comme « une combinaison d'amplitude de mouvement, de contrôle moteur et de force. » (Dovan, 2021). Elle est souvent confondue avec la souplesse passive.

En 2018, Behm a pu définir la souplesse passive comme : « Amplitude articulaire disponible pour une articulation ou un groupe d'articulations ; [...] Capacité de mouvoir une articulation facilement et de manière fluide à travers la totalité de son amplitude de mouvement, sans douleur ; [...] » [Traduction libre]. Il s'agit donc de l'amplitude maximale atteinte grâce à l'ajout de force externe (élastique/partenaire...) et par le relâchement des antagonistes. La souplesse active va donc dépendre de la souplesse passive (amplitude de mouvement) mais on va y incorporer la notion de contrôle moteur et de force.

Pour améliorer la souplesse active, il existe 3 types d'étirements : les étirements passifs (pour l'amplitude de mouvement), les étirements activo-dynamiques et les étirements PNF (facilitation neuromusculaire proprioception). Concernant l'évolution de la souplesse active des ischios-jambiers pour le sprint, il serait plus intéressant de travailler sur des exercices spécifiques avec des positions d'étirements et la recherche de contraintes similaires à celles des contractions excentriques des ischios-jambiers lors des 2 phases de foulée. En effet, selon Barbosa et ses collaborateurs (2020), les étirements statiques des ischios-jambiers (3 fois 30 secondes 3 fois par semaine pendant 10 séances) ont amené une diminution significative des performances de sprint sur 20 m et également une diminution significative du couple excentrique des fléchisseurs de genoux par rapport au groupe qui ont effectué un programme d'étirement dynamique.

Il est par conséquent conseillé de faire un programme d'étirement activo-dynamique et d'intégrer cette routine en échauffement avant les entraînements ou les matchs pour pouvoir augmenter la flexibilité des ischios-jambiers et éviter une baisse de performance lors des sprints ou des changements de direction (Oliveira et al., 2018 ; Malek et al., 2024).

2.2) L'accélération chez les joueurs de football prépubères

2.2.1) Facteurs influençant l'accélération du joueur de football prépubère

Dans l'article de Chatzilazaridis et ses collaborateurs réalisés en 2024, hormis une vitesse maximale plus faible atteinte par les prépubères, il y a une différence avec les adultes sur la durée et la distance totale de la phase d'accélération du sprint. Les enfants vont atteindre leur vitesse maximale entre 20 et 30 m et ils vont maintenir cette vitesse maximale sur une période plus courte par rapport aux adultes. Le joueur de football prépubère d'un point de vue empirique va rarement faire un sprint d'une distance supérieure à 20m. Cela peut arriver durant les phases de transition (défensive vers offensive) et c'est durant ces phases de transition que l'accélération joue un rôle important pour performer à un niveau élite.

Selon Ratel (2018), l'accélération (et les autres phases de la vitesse) va dépendre des facteurs neuromusculaires, des facteurs anthropométriques, des facteurs biomécaniques et des facteurs bioénergétiques impliquant l'activité du métabolisme anaérobie.

Dans cette étude, l'objectif est d'analyser l'impact de l'évolution des paramètres biomécaniques à travers un protocole d'entraînement axé sur la fréquence de foulée et l'amplitude de foulée. Il est essentiel de comprendre comment la maturation et la croissance (évolution des facteurs anthropométriques) influencent ces paramètres biomécaniques chez le joueur de football prépubère.

2.2.2) Influence anthropométrique sur la capacité d'accélération

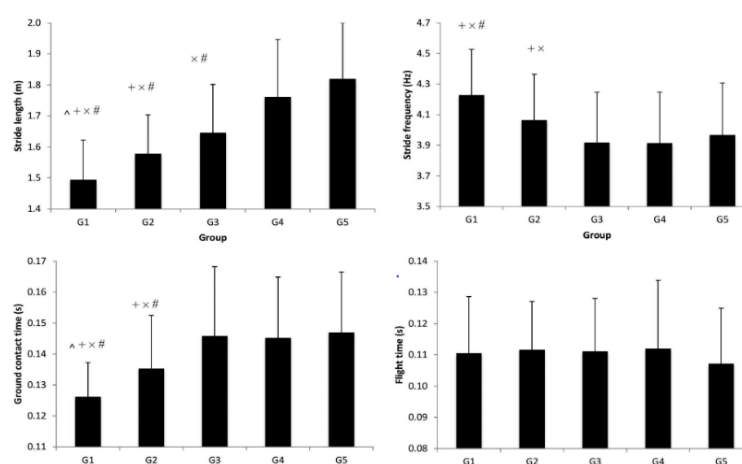


Figure 3: Graphiques issus de l'étude Meyers et al. (2015) montrant l'évolution des paramètres biomécaniques entre différents groupes de maturation

L'étude menée par Meyers et al. (2015) a évalué l'influence des caractéristiques anthropométriques sur les paramètres de performance en sprint, notamment la vitesse maximale, la fréquence et l'amplitude de foulée, ainsi que les temps de vol et de contact (*Figure 3*). Parmi cinq groupes d'enfants classés selon leur âge, taille, poids et longueur des jambes, nous avons retenu les deux premiers groupes (enfants de 10 à 11 ans), correspondant à notre échantillon cible. Malgré une différence significative de +0,1 m pour l'amplitude de foulée et une diminution de -0,2 foulées/s pour la fréquence, les chercheurs n'ont observé aucun gain significatif de vitesse maximale, ni de différence pour le temps d'envol, ce qui suggère que les changements morphologiques précoces n'influencent pas directement la capacité d'accélération. Ces résultats appuient l'idée que la croissance à ces âges entraîne des adaptations mécaniques (longueur et fréquence de foulée), sans effet net sur l'accélération elle-même. Il est important de noter qu'il s'agit d'une étude transversale, les différences observées entre groupes d'âge ne reflètent donc pas nécessairement l'évolution individuelle au cours du temps, mais plutôt des écarts interindividuels à un moment donné.

L'étude de Kaplan et al. (2017) complète utilement notre réflexion sur les liens entre développement anthropométrique et performance en sprint chez les jeunes. Cette recherche a porté sur 49 jeunes footballeurs âgés de 9 à 13 ans, et a évalué leurs performances en accélération (10 m), vitesse (20 m et 30 m) et saut vertical. Les résultats montrent des **corrélations significatives entre l'âge et la taille** d'une part, et les performances de **vitesse sur 20 et 30 mètres** d'autre part, avec une augmentation notable de la force de corrélation à mesure que la distance augmente ($r = 0.620$ pour l'âge sur 30 m). Ces résultats suggèrent que, dans cette tranche d'âge, l'amélioration de la vitesse sur des distances plus longues peut être partiellement attribuée à la croissance, notamment à l'allongement des jambes ou à la maturité musculaire. Ainsi, cette étude soutient l'idée que la taille et le poids ne sont pas directement corrélés à la capacité d'accélération chez les enfants de 9 à 13 ans, mais qu'ils peuvent influencer positivement la vitesse maximale.

2.2.3) Influence biomécanique sur la capacité d'accélération

La thèse de Rumpf (2013) analyse les facteurs cinétiques et cinématiques du sprint chez les jeunes selon leur maturité biologique (pré-, mi- et post-PHV). Les résultats montrent une nette augmentation de la vitesse maximale avec la maturation, particulièrement entre les stades pré- et mi-PHV (+39,5 %). La puissance et la force horizontale apparaissent comme les meilleurs prédicteurs de la performance, expliquant jusqu'à 99 % de la variance en post-PHV. Par ailleurs, l'étude souligne que pour atteindre des vitesses supérieures, les athlètes augmentent principalement **la fréquence de leurs foulées (+6,9 %)** plutôt que **leur amplitude (+1,5 %)**, ce qui suggère un rôle déterminant de la fréquence dans l'amélioration de la performance en sprint.

2.2.4) Entraînement du jeune footballeur pour améliorer la fréquence de foulée ou l'amplitude de foulée

Dans le livre de Ratel, il a pu noter les différentes études qui ont obtenu des améliorations significatives lors d'un sprint court (entre 0 et 30 m) à l'issue de 6 à 16 semaines d'entraînement avec une fréquence hebdomadaire de 1 à 3 séances. Les différents auteurs ont pu utiliser des entraînements de pliométrie, de technique de course ou des entraînements combinés. Il semblerait que le travail de coordination intermusculaire (association bras et jambes) ainsi que les exercices de pliométrie horizontale permettraient d'agir sur les facteurs nerveux et musculo-tendineux et permettrait donc d'améliorer la phase d'appui lors des sprints (*page 181*).

La revue systématique de Wu et ses collaborateurs (2025) confirme que la pliométrie permettrait d'améliorer les performances de sprint des enfants. Cependant, selon la méta-analyse de Deng et ses collaborateurs (2023), il semblerait qu'il faudrait une programmation de pliométrie d'au moins 7 semaines pour avoir des effets significatifs sur l'accélération lors du sprint ($ES = 0,29$; $p = 0,011$). L'objectif est donc d'observer si la pliométrie, associée au travail de coordination entre les membres inférieurs et supérieurs ainsi que le travail de gestuelle permet d'améliorer la fréquence de foulée après une programmation de 8 semaines.

Concernant l'amélioration de la souplesse active des ischios-jambiers et l'influence sur les capacités d'accélération du footballeur, nous pouvons nous baser sur le protocole mis en place dans l'étude de Diáz-Cortés et ses collaborateurs (2024). Cette étude était composée d'un groupe échantillon de 22 joueurs de moins de 13 ans avec une taille de $156,95 \pm 9,27$ cm et d'une masse corporelle de $44,54 \pm 7,29$ kg. Ils ont été divisés au hasard en un groupe contrôle ($n=10$) et un groupe expérimental ($n=12$). Le groupe expérimental a suivi une programmation de 8 semaines comprenant des étirements statiques, incorporant la méthode de facilitation neuromusculaire proprioceptive au cours de la quatrième semaine pour diminuer le raccourcissement musculaire des ischios-jambiers avant le post-test. Les tests d'extension et de flexion de genou ont été réalisés avec un goniomètre tandis que le test de sprint sur 10,20 et 30m à l'aide de l'application Runmatic.

Ils ont pu constater des résultats significatifs ($p<0,05$) sur la vitesse de 30m grâce à la programmation d'étirements. Selon eux, la flexibilité peut influencer la capacité et la vitesse de sprint et de saut vertical.

2.2.5) Point de vue sur les études antérieures

La thèse de Rumpf (2013) offre une analyse approfondie des paramètres cinétiques et cinématiques du sprint chez les jeunes selon leur niveau de maturation. Bien qu'elle montre des différences marquées en termes de vitesse maximale, de force horizontale et de puissance entre les groupes pré-, mi- et post-PHV, l'étude repose sur une approche strictement transversale. Aucun protocole d'entraînement n'a été mis en place pour vérifier dans quelle mesure ces évolutions sont liées à la croissance naturelle ou à des adaptations motrices spécifiques. De même, l'étude de Meyers et al. (2015) met en évidence des variations dans la fréquence et l'amplitude de foulée selon l'âge et le développement biologique, suggérant que l'amplitude augmente avec la croissance staturale. Cependant, cette étude reste descriptive et ne permet pas de conclure sur l'impact d'un entraînement ciblé sur l'un ou l'autre de ces paramètres. En l'absence d'études ayant testé expérimentalement l'effet différencié d'un entraînement orienté vers l'amplitude ou la fréquence de foulée, il demeure impossible de déterminer précisément **quelle variable influence le plus l'amélioration de l'accélération** chez les jeunes sportifs en phase prépubère.

Si l'on prend en compte les différentes études vues auparavant sur l'amélioration du sprint grâce à la pliométrie (Ratel., 2018 ; Deng et al., 2023 ; Wu et al., 2025), ces études démontrent que l'amélioration de l'accélération peut être influencée par une programmation de pliométrie d'au moins 7 semaines. Cependant, ils n'ont pas évalué l'impact de cette programmation sur la fréquence de foulée. Il serait donc intéressant d'évaluer ce paramètre après un protocole de pliométrie de 8 semaines pour observer s'il y a une corrélation entre l'évolution de la fréquence de foulée et l'évolution de l'accélération sur 30m.

Pour finir, l'étude de Diàz-Cortes et ses collaborateurs (2024) a été effectuée avec des joueurs âgés de 13 ans qui sont plus proches du PHV que les sujets de notre étude (9-10 ans). De plus, cette étude est basée sur un protocole d'étirements statiques et si l'on prend en compte les études de Oliveira (2018) Malek (2024) et leurs collaborateurs, les étirements statiques contrairement aux étirements activo-dynamiques exerceraient une influence négative sur le couple excentrique des fléchisseurs de genou et sur les performances de sprint suivant les exercices. Il est donc plus intéressant d'améliorer l'amplitude de foulée avec un protocole d'entraînement d'étirements activo-dynamique (avec étirements PNF) sur une période supérieure à 8 semaines pour observer une amélioration de la souplesse active des ischios-jambiers et également observer une corrélation entre l'évolution de ce paramètre et l'évolution de l'accélération du joueur de football prépubère.

3) Présentation de l'étude

3.1) Problématique

Après avoir vu les études montrant l'impact de l'évolution des paramètres de foulée et des caractéristiques anthropométriques sur l'évolution de l'accélération, nous pouvons nous demander :

Quels facteurs biomécaniques ou anthropométriques influencent le plus l'accélération des joueurs de football prépubères élités ?

3.2) Objectifs de l'étude

L'objectif principal de cette étude est de comparer l'évolution de l'accélération entre les sous-groupes GT1 et GT2 sur les deux périodes du protocole (T0-T1, 15 semaines, et T1-T2, 15 semaines).

Ensuite, l'étude compare l'évolution des paramètres de foulée, tels que la souplesse active des ischio-jambiers et la fréquence des foulées entre 5 et 30 mètres, ainsi que l'évolution des caractéristiques anthropométriques (âge, taille, poids, etc.) entre les sous-groupes GT1 et GT2 sur ces mêmes périodes.

Enfin, des corrélations seront établies entre l'évolution de ces paramètres (foulée et caractéristiques anthropométriques) et l'évolution de l'accélération sur les périodes T0-T1 et T1-T2, afin de déterminer quels facteurs ont le plus d'influence sur l'amélioration de l'accélération au cours des 30 semaines de l'étude.

3.3) Hypothèses de l'étude

Après avoir vérifié la normalité avec le test de Shapiro-Wilk ainsi que l'homogénéité des variances avec le test de Levene, nous pourrions ensuite utiliser des tests paramétriques ou non paramétriques pour comparer les moyennes d'évolution. L'effect Size (ES) sera également calculée pour mesurer l'ampleur de l'effet.

3.3.1) Comparaison de l'évolution des moyennes d'accélération et des autres paramètres intragroupes.

Nous utiliserons un test de comparaison paramétrique ou non paramétrique par paire via le test de Student ou le test de Wilcoxon afin de comparer l'évolution des paramètres d'accélération, de fréquence de foulée, de souplesse active des ischios-jambiers ainsi que des caractéristiques anthropométriques (taille et poids).

- **H0** : Il n'y a pas de différence significative ($p > 0,05$) entre les moyennes d'évolution des paramètres étudiés. Le protocole n'a pas eu d'impact significatif sur l'évolution de l'accélération et des paramètres de foulée sur cette période.
- **H1** : Il existe une différence significative ($p < 0,05$) entre les moyennes d'évolution des paramètres. Le protocole a permis une amélioration de l'accélération et/ou des paramètres de foulée sur cette période.

3.3.2) Comparaison de l'évolution des moyennes d'accélération (via ANOVA pour échantillons indépendants) et des autres paramètres inter-groupes.

Nous utiliserons un test paramétrique ou non paramétrique pour variables indépendantes via le test de Student non apparié ou le test de Mann et Whitney afin de comparer l'évolution de la moyenne d'accélération et des autres paramètres entre les 2 groupes sur les différentes périodes.

- **H0** : Il n'y a pas de différence significative ($p > 0,05$) entre l'évolution des paramètres étudiés. Le protocole n'a pas permis une différence significative sur l'évolution de l'accélération et/ou des paramètres de foulée entre le GT1 et le GT2 sur cette période.
- **H1** : Il existe une différence significative ($p < 0,05$) entre les moyennes d'évolution des paramètres. Le protocole a permis une différence significative sur l'évolution de l'accélération et/ou des paramètres de foulée entre le GT1 et le GT2 sur cette période.

3.3.3) Corrélation entre l'accélération, les paramètres de foulées et les caractéristiques anthropométriques

Nous analyserons la relation entre l'évolution de l'accélération et celle de plusieurs paramètres : fréquence de foulée, amplitude, taille et poids. Pour ce faire, nous utiliserons un test de corrélation, soit paramétrique (Bravais-Pearson), soit non paramétrique (Spearman), selon la distribution des données. Ces tests permettront de déterminer la force et la significativité des liens (valeurs de Rho et de p-value).

- **Corrélation nulle** : Si le coefficient de corrélation est faible ($r < 0,3$) et non significatif ($p > 0,05$), cela indique qu'il n'existe pas de relation notable entre l'évolution de l'accélération et les paramètres étudiés sur la période considérée.
- **Corrélation modérée** : Un coefficient compris entre 0,3 et 0,7, mais avec une p-value non significative ($p > 0,05$), suggère une tendance possible sans lien statistiquement confirmé.
- **Corrélation forte** : Si la corrélation est élevée ($r > 0,7$) et statistiquement significative ($p < 0,05$), cela indique que l'évolution de l'un ou plusieurs de ces paramètres (fréquence, amplitude, taille ou poids) est fortement liée à l'amélioration de l'accélération.

3.3.4) Comparaison des coefficients de corrélation sur les différentes périodes

Pour finir, une fois que nous avons tous les coefficients de corrélation pour chaque groupe sur chaque période, nous pourrions observer sur chaque période quel est le coefficient de corrélation le plus fort et ainsi déterminer quel paramètre de foulée influence le plus l'évolution de l'accélération.

4) Caractéristiques de l'étude

4.1) Milieu professionnel

4.1.1) Contextualisation

L'étude va être réalisée au sein de l'éveil (GT) U10-U11 du Lille Olympique Sporting Club (LOSC). Le groupe U10 correspondra au groupe GT1 et le groupe U11 correspondra au groupe GT2



Le LOSC Lille, créé en 1944 pour donner suite à la fusion de l'Olympique Lillois et du SC Fives, est l'un des clubs historiques du football français. Rapidement, il s'impose sur la scène nationale en remportant deux titres de champion de France (1946 et 1954) et plusieurs Coupes de France. Après une période de transition, le LOSC retrouve son lustre au début des années 2000, notamment grâce à une gestion ambitieuse et des entraîneurs visionnaires comme Rudi Garcia et Christophe Galtier. Le club connaît son apogée en 2011 avec un doublé Championnat-Coupe, puis un nouveau sacre en 2021, confirmant son statut de référence. Le centre de formation du LOSC, situé à Camphin-en-Pévèle, est un pilier de son identité. Reconnu pour son excellence, il mise sur le développement de jeunes talents locaux et internationaux, combinant formation sportive de haut niveau et accompagnement éducatif. Ce centre a révélé des joueurs de classe mondiale, comme Eden Hazard, qui s'est affirmé comme l'un des meilleurs talents européens avant de conquérir les plus grandes scènes internationales.

4.1.2). Interventions au sein du LOSC

Au sein de l'éveil du LOSC, il y a 4 catégories (U8 à U11) toutes encadrées par 2 éducateurs. L'objectif est de les accompagner dans leur développement technique, cognitif et également athlétique avec pour but de permettre aux joueurs d'accéder à la préformation (U12 à U15). Actuellement, j'occupe le rôle de stagiaire en préparation athlétique au sein de l'éveil avec pour rôle de tester les joueurs sur leurs caractéristiques anthropométriques, les qualités de vitesse et de coordination. J'ai également pour rôle de planifier l'organisation de la motricité gestuelle sur l'ensemble de la saison 2024-2025.

Concernant la pratique du football dans les 2 groupes (GT1 et GT2), les sujets s'entraînent 3 fois par semaine. Les 2 groupes ont des interventions sur la motricité au minimum 30 minutes par semaine avec 1 intervention par semaine de 15 minutes et un échauffement d'avant-match sous forme de gammes avec des exercices de technique de course associés (bondissements, montée de genoux, talons-fesses...).

4.2) Caractéristiques des sujets aux 3 périodes

Le groupe test GT (*Tableau 4*) est composé de 23 sujets (GT1 n=12 GT2 n=11) âgés en moyenne de $9,84 \pm 0,23$ ans, mesurant en moyenne $1,41 \pm 0,05$ et pesant en moyenne $33,81 \pm 4,12$ kgs à la période T0.

Tableau 4: Caractéristiques anthropométriques des sujets à chaque période

Groupes/caractéristiques anthropométriques	Age (année)	Taille (m)	Poids (kg)
T0			
GT	$9,84 \pm 0,23$	$1,41 \pm 0,05$	$33,81 \pm 4,12$
GT1	$9,41 \pm 0,18$	$1,36 \pm 0,07$	$31,14 \pm 4,83$
GT2	$10,27 \pm 0,27$	$1,45 \pm 0,03$	$36,48 \pm 3,41$
T1			
GT	$10,13 \pm 0,23$	$1,43 \pm 0,05$	$35,20 \pm 4,25$
GT1	$9,70 \pm 0,18$	$1,39 \pm 0,07$	$32,24 \pm 4,70$
GT2	$10,55 \pm 0,27$	$1,48 \pm 0,04$	$38,17 \pm 3,81$
T2			
GT	$10,42 \pm 0,23$	$1,44 \pm 0,05$	$35,90 \pm 4,36$
GT1	$9,99 \pm 0,18$	$1,39 \pm 0,07$	$33,33 \pm 4,81$
GT2	$10,84 \pm 0,27$	$1,48 \pm 0,04$	$38,46 \pm 3,91$

4.3) Protocole de l'étude

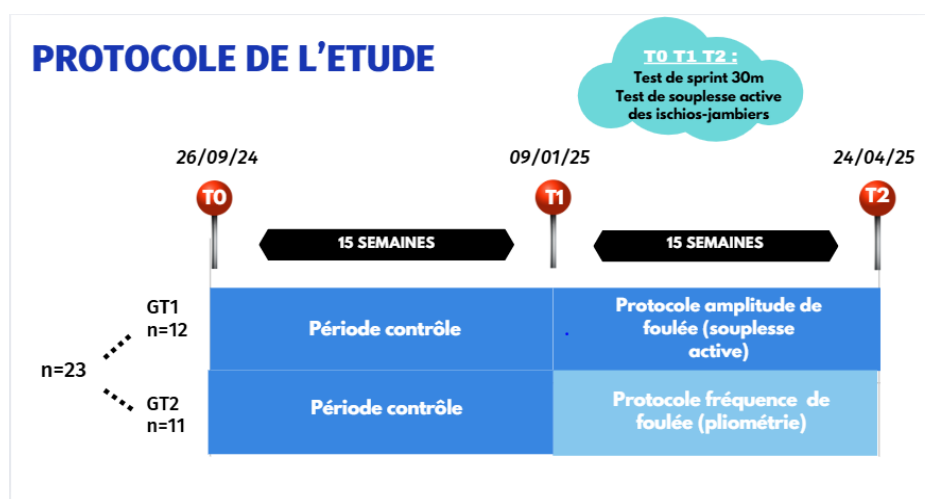


Figure 4: Chronologie du protocole de l'étude

L'étude s'étend sur 30 semaines, divisées en deux phases de 15 semaines : T0–T1 et T1–T2. La première période (T0–T1) sert de phase contrôle afin d'observer l'évolution naturelle des paramètres mesurés. Le groupe test est divisé en deux sous-groupes, GT1 et GT2, évalués à trois temps : T0, T1 et

T2. Aucun exercice spécifique n'est introduit entre T0 et T1. Entre T1 et T2, GT1 suit un programme axé sur l'amplitude de foulée (souplesse activo-dynamique), tandis que GT2 effectue un travail ciblé sur la fréquence de foulée (pliométrie, technique de course). Ces interventions durent 20 minutes une fois par semaine, complétées par 10 minutes avant chaque match. L'objectif est d'analyser l'impact de ces interventions spécifiques sur l'évolution de l'accélération entre T1 et T2, tout en comparant les effets cumulatifs sur l'ensemble de la période (T0–T2), afin d'identifier quel paramètre (amplitude ou fréquence) influence le plus l'amélioration de la performance en sprint.

4.4) Matériel et tests utilisés

4.4.1) Test de sprint sur 30m

Le test de sprint sur 30 m sera réalisé via l'application Mysprint. Cette application a été développée par Morin et ses collaborateurs en 2016 et elle permet de mesurer le profil force/vitesse ainsi que les différents paramètres cinématiques du sprint. Elle a été jugée comme fiable et valide par Jiménez-Reyes et ses collaborateurs en 2017 également. Ce test correspond à un test de sprint de 30m et il nécessite un Iphone ainsi que 6 constris-foot. Le test a été réalisé dans les mêmes conditions à chaque période. Les conditions climatiques étaient identiques et le test a été réalisé le lundi soir à 18h pour le GT1 et le mardi soir à 18h pour le GT2. Nous pouvons retrouver le protocole précis du test en *Annexe 1*.

4.4.2) Test de souplesse active des ischios-jambiers

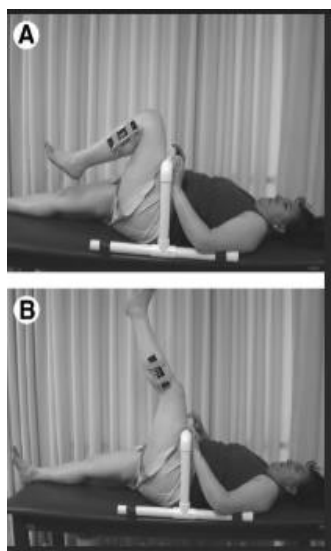


Figure 5: Knee extension active test

Nous avons utilisé le test de knee extension active qui a été validé par Davis et ses collaborateurs en 2008 (2). Le sujet va être allongé sur le dos, va fléchir la jambe et la hanche à 90°. Il doit garder le bassin fixe durant le test pour éviter une compensation du pelvis. Ensuite, il ira chercher une extension maximale du genou (*Figure 5*). Nous positionnerons un goniomètre au niveau du genou pour calculer l'angle fémur / tibia et ainsi obtenir un angle de mesure. Nous allons par la suite soustraire 180° par l'angle obtenu pour obtenir les mesures de souplesse active des ischios-jambiers. Ce test est spécifique aux positions retrouvées lors du sprint (flexion de hanche et extension de genou). Le test a également été réalisé dans les mêmes conditions aux différentes périodes.

Il a été réalisé avant le test de sprint à 17h45 pour le GT1 le lundi soir et le GT2 le mardi soir. Nous pourrions également retrouver le protocole en

Annexe 2.

4.5) Analyses statistiques

4.5.1) Statistiques sur le 30m : Moyenne d'accélération d'un groupe

Pour les données obtenues sur 30m, nous allons utiliser les données de temps obtenues tous les 5m sur Mysprint. Grâce à ces données, nous allons pouvoir calculer l'accélération sur chaque segment de 5m avec cette formule :

$$a = \frac{2 \times \Delta d}{t_{\text{fin}}^2 - t_{\text{début}}^2}$$

a = accélération moyenne sur segment de 5m (en m/s²)
 Δd = distance : 5m (5m entre chaque segment)
 t : temps

Par exemple, nous avons un joueur qui a fait 2,498 secondes sur 5m et 3,43 secondes sur 10m, nous allons calculer l'accélération sur le segment 5-10m en appliquant cette formule :

Calcul de l'accélération pour le segment 5-10 m :

$$a = \frac{2 \times 5}{2,498^2 - 1,432^2} = \frac{10}{6,240 - 2,051} = \frac{10}{4,189} \approx 2,39 \text{ m/s}^2$$

Nous allons donc par la suite calculer l'accélération sur chaque segment à partir de 5-10m car nous nous intéressons aux paramètres de foulée. Nous allons donc ne pas prendre en compte le départ (0-5m) où le sujet n'a pas encore réalisé de foulée.

Nous calculerons la moyenne d'accélération de 5 à 30m et nous allons donc pouvoir obtenir les données de moyenne d'accélération de chaque groupe.

4.5.2) Statistiques sur le 30m : Fréquence de foulées

Grâce à l'analyse vidéo, nous allons également calculer le nombre de foulées sur le 30m. Comme dans l'obtention des données de moyenne d'accélération, nous commençons le calcul à partir de 5m. Nous calculerons le nombre de foulées (combien de fois le pied droit touche le sol de 5 à 30m) pour ensuite utiliser cette formule :

$$\text{Fréquence de foulée} = \frac{\text{Nombre total de foulées}}{\text{Temps total (sur 25 m)}}$$

Fréquence de foulée : foulées/seconde (Hz)

Nous pourrions par la suite obtenir une moyenne et un écart-type de foulée du groupe et par la suite utiliser ces données pour faire une comparaison de moyenne entre les groupes.

4.5.3) Exemple de tableaux pouvant être obtenus après les tests

L'objectif est donc d'observer l'évolution des paramètres entre les différentes périodes (T0 et T1 par exemple). Nous allons donc prendre les données de 2 périodes et réaliser un % d'évolution sur chaque paramètre en réalisant un rapport entre les différentes données. Nous pourrions ensuite obtenir les types de tableaux 5 et 6 :

Tableau 5 : Données globales obtenues sur une période (T0) par exemple

	GT	a (m/s ²)	FF/sec	Souplesse IJ
GT1	Sujet 1	1,91	2,127	78
	Sujet 2	1,38	2,253	80
	Sujet 3	1,85	1,954	49
	Sujet 4	1,32	2,135	90
	Sujet 5	1,62	2,26	72
	Sujet 6	1,71	2,319	100
	Sujet 7	1,55	2,299	81
	Sujet 8	1,45	1,912	79
	Sujet 9	1,58	2,135	103
	Sujet 10	1,51	2,141	78
	Sujet 11	1,41	2,264	88
	Sujet 12	1,56	1,925	92
	Sujet 13	1,46	2,195	69
	Moyenne	1,56	2,15	81,46
	ET	0,18	0,14	14,04
	Normalité			

Tableau 6 : exemple de données obtenues en corrélant les données de T0 et T1

T0-T1	GT	% évolution a (m/s ²)	% évolution Foulées/sec ondes	% évolution souplesse active
GT1	Sujet 1	9,9	10,0	9,0
	Sujet 2	4,6	2,1	2,5
	Sujet 3	8,0	3,9	4,1
	Sujet 4	-5,2	1,6	5,6
	Sujet 5	5,2	4,0	4,2
	Sujet 6	5,6	3,5	5,0
	Sujet 7	3,0	2,7	2,5
	Sujet 8	4,6	4,1	2,5
	Sujet 9	1,0	3,0	2,9
	Sujet 10	2,5	1,8	2,6
	Sujet 11	6,3	1,6	3,4
	Sujet 12	5,9	3,9	2,2
	Sujet 13	5,9	2,5	1,4
	Moyenne	4,41	3,44	3,68
	ET	3,68	2,18	1,98
	Normalité			

Nous pourrions ensuite faire la comparaison de moyenne entre les différents paramètres entre les groupes du GC et du GT en utilisant les tests statistiques.

Concernant les coefficients de corrélation, nous allons faire un tableau regroupant tous les coefficients de corrélation entre l'évolution de l'accélération et l'évolution des autres paramètres.

Tableau 7 : exemple de tableau final de l'étude

Groupes	Période	Corrélation Accélération/ Fréquence	p-value (FF)	Corrélation Accélération /Amplitude	p-value (Amplitude)
GT1	T0/T1	r = 0.75	p < 0.05	r = 0.50	p < 0.05
GT1	T1/T2	r = 0.70	p < 0.05	r = 0.80	p < 0.05
GT1	T0/T2	r = 0.80	p < 0.01	r = 0.60	p < 0.05
GT2	T0/T1	r = 0.55	p < 0.05	r = 0.80	p < 0.05
GT2	T1/T2	r = 0.80	p < 0.05	r = 0.70	p < 0.05
GT2	T0/T2	r = 0.65	p < 0.05	r = 0.75	p < 0.05

5) Résultats

5.1) Comparaison des moyennes d'évolution entre les 3 périodes

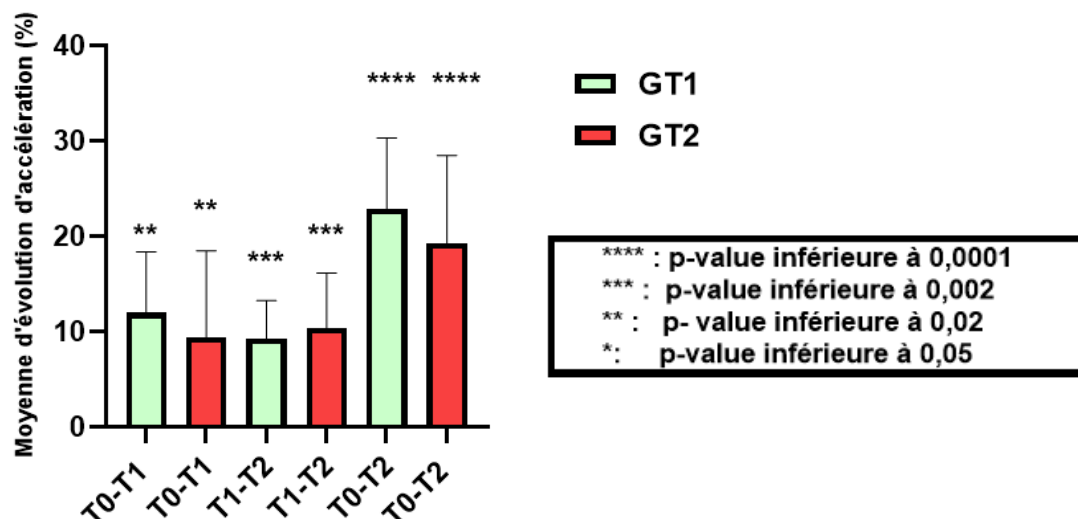


Figure 6: Moyenne d'évolution d'accélération (%) du GT1 et du GT2 entre les 3 périodes

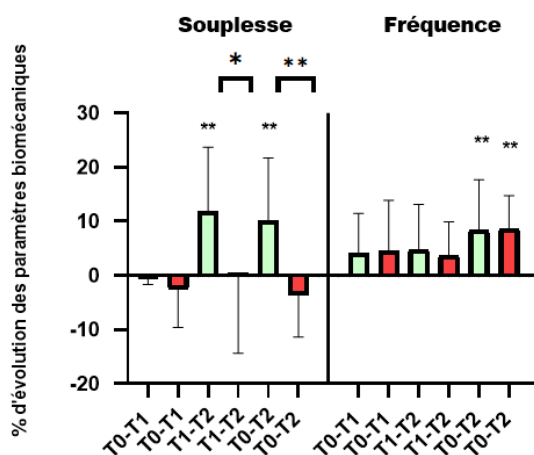


Figure 8: Moyenne d'évolution des caractéristiques biomécaniques (%) du GT1 et du GT2 entre les 3 périodes

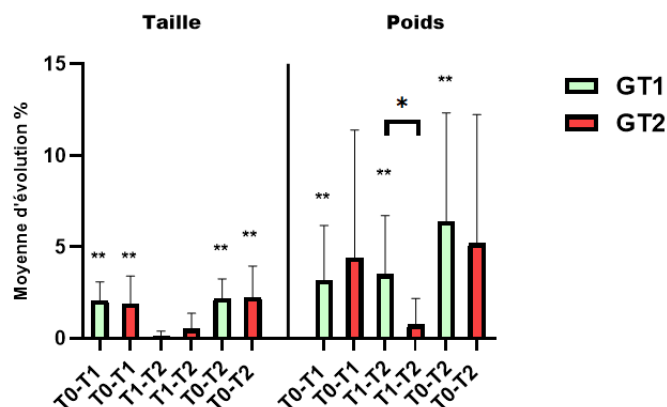


Figure 7: Moyenne d'évolution des caractéristiques anthropométriques (%) du GT1 et du GT2 entre les 3 périodes

➤ Evolution de l'accélération

Concernant l'accélération, le graphique en Figure 6 met en évidence des **différences significatives à très significatives** entre les groupes GT1 et GT2 à chaque période de mesure, avec des écarts allant de **10 à 20 %** et un écart-type compris entre **6,35 et 9,18 %**. Les **p-values varient de 0,02** (GT1 T0/T1) à **0,0001** (GT1 et GT2 T0/T2), confirmant la signification statistique de ces écarts. De plus, la **taille d'effet**, qui varie de **0,25** (GT1 T1/T2) à **2,24** (GT1 T0/T2), indique une ampleur allant de **moyenne à immense**. Le *Tableau 8* ci-dessous détaille ces résultats et appuie visuellement l'évolution des performances.

Tableau 8 : évolution de l'accélération (en %) intra-groupe du GT1 et du GT2 entre les 3 périodes

Évolution accélération intra-groupe	Période	Normalité	Variance	Test utilisé	Moyenne	Hypothèse validée	P-value	Effect Size
GT1	T0/T1			Wilcoxon apparié	11,99 ± 6,35	H1	0,02	1,15
GT2	T0/T1			Student apparié	9,38 ± 9,11	H1	0,0091	0,83
GT1	T1/T2			Wilcoxon apparié	9,23 ± 3,99	H1	0,01	0,25
GT2	T1/T2			Student apparié	10,38 ± 5,76	H1	0,0002	1,01
GT1	T0/T2			Student apparié	22,85 ± 7,47	H1	0,0001	2,24
GT2	T0/T2			Student apparié	19,27 ± 9,18	H1	0,0001	1,81

En revanche, en observant les valeurs du *Tableau 9* ci-dessous, l'évolution de l'accélération dans le temps (entre T0, T1 et T2) n'est pas **significativement différente** entre les deux groupes. Les p-values, comme **0,6013 pour T1/T2**, étant supérieures à 0,05, indiquent l'absence de différence significative dans les progressions. Cela conduit à accepter l'hypothèse nulle (H0).

Tableau 9: évolution de l'accélération inter-groupe entre les 3 périodes

Évolution accélération inter-groupe	Période	Normalité	Variance	Test utilisé	Hypothèse validée	P-value
GT1/GT2	T0/T1			Student non apparié	H0	0,4538
GT1/GT2	T1/T2			Student non apparié	H0	0,6013
GT1/GT2	T0/T2			Student non apparié	H0	0,33

Il apparaît donc que la programmation spécifique sur 15 semaines (souplesse active pour le GT1 et fréquence de foulée pour le GT2) **n'a pas généré de gain d'accélération supérieur** pour l'un des deux groupes sur cette période.

➤ Evolution des caractéristiques biomécaniques

L'analyse du graphique en *Figure 8* montre une **différence très significative de l'amplitude active des ischio-jambiers** chez le GT1 sur les périodes T1/T2 et T0/T2, avec une progression allant de **10,18 % à 11,8 %** et un **écart-type d'environ 11,5 %**. À l'inverse, le GT2 présente une **légère régression non significative** de cette même amplitude sur l'ensemble des périodes.

Concernant la **fréquence de foulée**, aucune différence significative n'est observée entre T0/T1 et T1/T2. En revanche, une **différence très significative est notée entre T0 et T2**, avec une progression moyenne d'environ **8,5 %**, et un **écart-type compris entre 6,10 % et 9,32 %**.

En comparant les **moyennes d'évolution de l'amplitude active** entre les deux groupes, on observe une différence significative **entre T1/T2 ($p = 0,0306$) et T0/T2 ($p = 0,0042$)**. Ces résultats permettent de rejeter l'hypothèse nulle (H_0) et **de valider l'hypothèse alternative (H_1) sur ces deux périodes**.

Ainsi, la programmation de 15 semaines axée sur la souplesse active a permis une amélioration significativement plus importante de l'amplitude active chez le GT1 par rapport au GT2, en particulier entre T1 et T2, et plus largement sur l'ensemble de la période T0/T2.

En revanche, pour la **fréquence de foulée**, aucune différence significative n'a été observée entre les deux groupes sur l'ensemble des périodes analysées. Cela conduit à **valider l'hypothèse nulle (H_0)** pour T0/T1, T1/T2 et T0/T2.

On peut donc conclure que la programmation axée sur la fréquence de foulée sur 15 semaines n'a pas entraîné d'amélioration significativement plus importante chez le GT2 par rapport au GT1.

Le *Tableau 10* ci-dessous présente les **valeurs des p-values** associées à ces comparaisons inter-groupes :

Tableau 10 : Comparaison de l'évolution des paramètres biomécaniques et anthropométriques entre le GT1 et le GT2

Comparaison de l'évolution des paramètres biomécaniques et anthropométriques entre le GT1 et le GT2	T0/T1	Hypothèse T0/T1	T1/T2	Hypothèse T1/T2	T0/T2	Hypothèse T0/T2
Amplitude	0,3547	H0	0,0306*	H1	0,0042**	H1
FF	0,88	H0	0,97	H0	0,82	H0
Taille	0,35	H0	0,2362	H0	0,91	H0
Poids	0,6053	H0	0,0225*	H1	0,6764	H0

➤ Evolution des caractéristiques anthropométriques

L'analyse du graphique en *Figure 8* montre que **les deux groupes (GT1 et GT2) ont présenté une évolution très significative de la taille**, avec une augmentation d'environ **2 %**, accompagnée d'un écart-type compris entre **0,82 et 1,73**, sur les périodes **T0/T1 et T0/T2**.

En ce qui concerne le poids, seule l'évolution du GT1 est significative sur l'ensemble des trois périodes. De plus, une différence significative d'évolution du poids est observée entre les deux groupes sur la période T1/T2, avec une p-value de 0,025.

Les deux groupes ont vu leurs **caractéristiques anthropométriques évoluer** au cours du protocole. Toutefois, il n'y a pas eu de différence significative concernant l'évolution de la taille sur les 3 périodes et seule la période T1/T2 présente une différence significative d'évolution du poids entre le GT1 et le GT2.

➤ Résumé des évolutions des moyennes d'accélération, des caractéristiques biomécaniques et anthropométriques intra-groupe

Tableau 11 : évolution intra-groupe des différents paramètres

**** : p-value inférieure à 0,0001
*** : p-value inférieure à 0,002
** : p-value inférieure à 0,02
* : p-value inférieure à 0,05

Evolution intra-groupe (%)	GT1 T0/T1	GT2 T0/T1	GT1 T1/T2	GT2 T1/T2	GT1 T0/T2	GT2 T0/T2
Accélération (m/s^2)	11,99** ± 6,35	9,38** ± 9,11	9,23*** ± 3,99	10,38*** ± 5,76	22,85**** ± 7,47	19,27**** ± 9,18
P-value	0,002	0,0091	0,01	0,0002	0,0001	0,0001
ES	1,15	0,93	0,25	1,01	2,24	1,84
Fréquence de foulée (Hz)	4,18 ± 7,28	4,55 ± 9,31	4,77 ± 8,36	3,73 ± 6,16	8,36* ± 9,32	8,61** ± 6,10
P-value	0,11	0,44	0,10	0,11	0,01	0,0026
ES	0,25	1,23	0,60	0,39	0,65	2,09
Souplesse active IJ (°)	-0,61 ± 1,05	-2,63 ± 6,96	11,80** ± 11,88	-0,23 ± 14,12	10,18** ± 11,49	-3,63 ± 7,74
P-value	0,25	0,22	0,0020	0,87	0,0078	0,1867
ES	-0,11	-0,20	0,78	-0,06	0,65	-0,25
Taille (m)	2,25*** ± 0,82	1,86** ± 1,52	0,12 ± 0,27	0,44 ± 0,87	2,38*** ± 0,85	2,16** ± 1,73
P-value	>0,0001	0,0039	0,1661	0,1461	>0,0001	0,0020
ES	0,42	0,78	0,03	0,16	0,44	1,01
Poids (kg)	3,19** ± 0,82	4,39 ± 6,98	3,49** ± 3,20	0,75 ± 1,44	6,38** ± 5,95	5,16 ± 7,05
P-value	0,0076	0,1049	0,0046	0,1376	0,0076	0,0635
ES	0,24	0,49	0,23	0,076	0,46	0,58

5.2) Dispersion des moyennes d'évolution entre les 3 périodes

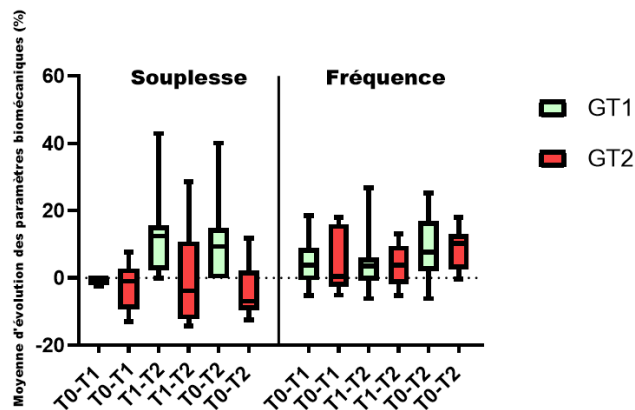


Figure 9: Dispersion de l'évolution des paramètres biomécaniques de foulée (en %) du GT1 et du GT2 entre les 3 périodes

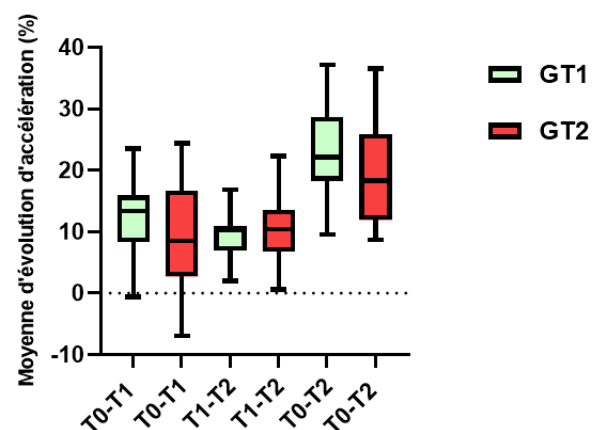


Figure 10: Dispersion de l'évolution de l'accélération (en %) du GT1 et du GT2 entre les 3 périodes

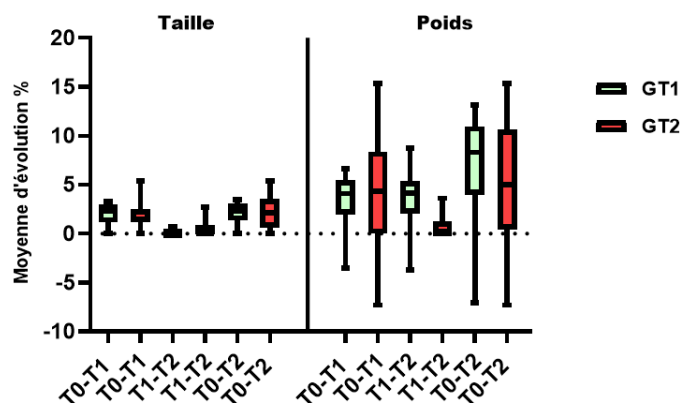


Figure 11: Dispersion de l'évolution des caractéristiques anthropométriques (en %) du GT1 et du GT2 entre les 3 périodes

Le GT1 présente une dispersion plus faible sur l'ensemble des périodes (Figure 9,10,11) pour les paramètres biomécaniques et l'évolution de l'accélération, contrairement au GT2, où l'on observe une forte dispersion, notamment dans **la régression de l'amplitude et l'évolution du poids entre T0/T1 et T0/T2**. Cette variabilité pourrait expliquer l'hétérogénéité de l'évolution de l'accélération dans ce groupe. A noter que le GT2 a évolué également de manière hétérogène sur l'ensemble des paramètres mais la dispersion est moins marquée que la dispersion du GT1.

La prochaine partie s'intéressera aux corrélations entre l'accélération et les autres paramètres afin d'identifier les facteurs influents.

5.3) Les corrélations entre l'évolution de l'accélération et les paramètres biomécaniques et anthropométriques

➤ Corrélations entre l'évolution de l'accélération et les paramètres biomécaniques

Tableau 12 : Corrélations entre l'évolution de l'accélération et l'évolution de la fréquence de foulée

Groupes	Période	Normalité	Test utilisé	Corrélation Accélération/Fréquence	p-value (FF)	Corrélation	Interprétation
GT1	T0/T1	Verte	Bravais-Pearson	-0,6528	0,0294	Négative modérée	↘ Fréquence ↗ Accélération
GT1	T1/T2	Rouge	Spearman	-0,1096	0,74	Pas de corrélation	
GT1	T0/T2	Verte	Bravais-Pearson	-0,6	0,0369	Négative modérée	↘ Fréquence ↗ Accélération
GT2	T0/T1	Rouge	Spearman	0,15	0,7	Pas de corrélation	
GT2	T1/T2	Verte	Bravais-Pearson	0,5062	0,1354		
GT2	T0/T2	Verte	Bravais-Pearson	0,2049	0,5968		

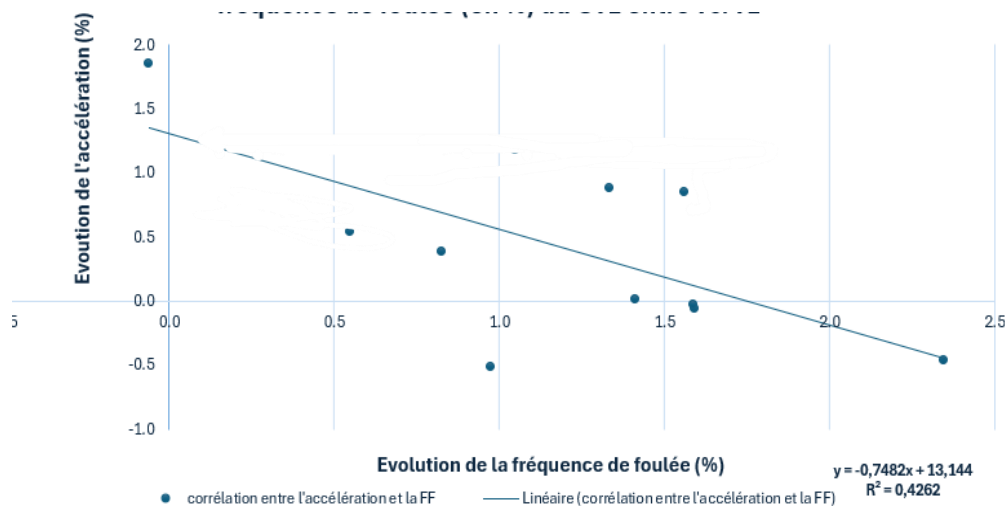


Figure 12: Corrélation entre l'évolution de l'accélération et l'évolution de la fréquence de foulée (en %) du GT1 entre T0 et T1

Dans le *Tableau 12* ci-dessus, les corrélations entre l'évolution de l'accélération et celle de la fréquence de foulée sont présentées pour le GT1 et le GT2. Aucune corrélation n'est observée pour le GT2 sur l'ensemble des périodes. En revanche, pour le GT1, une corrélation négative modérée est visible sur les périodes T0/T1 et T0/T2. Cela suggère que, chez ces joueurs, une diminution de la fréquence de foulée pourrait être associée à une amélioration de l'accélération.

Autrement dit, un gain en accélération pourrait passer par une augmentation de l'amplitude de foulée plutôt que de sa fréquence.

Tableau 13 : corrélations entre l'évolution de l'accélération et l'évolution de la souplesse active

Groupes	Période	Normalité	Test utilisé	Corrélation Accélération/Souplesse	P-value (FF)	Corrélation	Interprétation
GT1	T0/T1	Non	Spearman	0,04636	0,89	Pas de corrélation	
GT1	T1/T2		Spearman	0,11	0,7255		
GT1	T0/T2	Oui	Bravais-Pearson	0,23	0,4620		
GT2	T0/T1	Oui	Bravais-Pearson	-0,15	0,7	Pas de corrélation	
GT2	T1/T2		Bravais-Pearson	0,5105	0,1356		
GT2	T0/T2		Bravais-Pearson	0,55	0,11		

On peut observer dans le *Tableau 13* qu'il n'y a pas de corrélation entre l'évolution de l'accélération et l'évolution de la souplesse du GT1 et du GT2 entre les 3 périodes.

L'évolution de l'accélération n'a pas été influencée par l'évolution significative de la souplesse active des ischios-jambiers du GT1 ayant réalisée la programmation de 15 semaines d'étirements activo-dynamique.

➤ Corrélations entre l'évolution de l'accélération et l'évolution des caractéristiques anthropométriques

Tableau 14 : Corrélations entre l'évolution de l'accélération et l'évolution de la taille (en %) du GT1 et du GT2 entre les 3 périodes

Groupes	Période	Normalité	Test utilisé	Corrélation Accélération/Taille	P-value (FF)	Corrélation	Interprétation
GT1	T0/T1		Bravais-Pearson	0,1174	0,74	Pas de corrélation	
GT1	T1/T2		Spearman	0,4118	0,2364		
GT1	T0/T2		Bravais-Pearson	0,2907	0,3858		
GT2	T0/T1		Spearman	0,27	0,48	Pas de corrélation	
GT2	T1/T2		Spearman	-0,38	0,27		
GT2	T0/T2		Bravais-Pearson	0,42	0,24		

Tableau 15 : Corrélations entre l'évolution de l'accélération et l'évolution du poids (en %) du GT1 et du GT2 entre les 3 périodes

Groupes	Période	Normalité	Test utilisé	Corrélation Accélération/Poids	P-value (FF)	Corrélation	Interprétation
GT1	T0/T1		Bravais-Pearson	-0,03	0,9156	Pas de corrélation	
GT1	T1/T2		Bravais-Pearson	-0,08	0,81		
GT1	T0/T2		Bravais-Pearson	0,005	0,98		
GT2	T0/T1		Bravais-Pearson	-0,03	0,91	Pas de corrélation	
GT2	T1/T2		Spearman	-0,52	0,10		
GT2	T0/T2		Bravais-Pearson	-0,33	0,41		

Il n'y a pas de corrélation entre l'évolution de l'accélération et l'évolution de la taille du GT1 et du GT2 entre les 3 périodes.

Il n'y a pas de corrélation entre l'évolution de l'accélération et l'évolution du poids du GT1 et du GT2 entre les 3 périodes.

Il semblerait que l'évolution de l'accélération ne soit pas influencée par l'évolution des caractéristiques anthropométriques sur le protocole de 30 semaines.

6) Discussion

6.1) Evolution de l'accélération durant la période T1/T2 du protocole

On a pu constater une progression significative de l'accélération dans les deux groupes, sans toutefois observer de différence significative d'évolution entre le GT1 et le GT2 après les 15 semaines de programmation. Ces résultats suggèrent que l'entraînement axé sur la souplesse active n'a pas permis une amélioration supérieure de l'accélération par rapport à celui centré sur la fréquence de foulée sur cette période. Cette absence de différence significative peut s'expliquer par la nature multifactorielle de l'accélération, qui dépend à la fois de paramètres biomécaniques, neuromusculaires et techniques.

Un des biais notables de cette étude réside dans l'**absence de mesures directes des forces de projection au sol, par exemple via une plateforme de force**. Ce type d'analyse via un rail Optojump aurait permis de mieux comprendre les adaptations mécaniques sous-jacentes aux gains d'accélération observés et de distinguer d'éventuelles différences qualitatives entre les groupes, notamment en termes de puissance ou d'efficacité de l'appui.

6.2) Influence des facteurs biomécaniques sur l'évolution de l'accélération

➤ La souplesse active

L'analyse du graphique de la Figure 7 montre une régression non significative de la souplesse active chez le GT2 sur l'ensemble du protocole, ainsi que chez le GT1 sur la période T0/T1. En revanche, le GT1 présente une amélioration significative entre T1 et T2, ce qui atteste de l'efficacité d'un programme de 15 semaines d'étirements activo-dynamiques pour améliorer l'amplitude des ischio-jambiers. Ce type d'intervention pourrait contribuer à prévenir la perte de souplesse souvent liée à une croissance osseuse plus rapide que celle des muscles, comme l'ont rapporté **Donti et al. (2022) dans la méta-analyse** *“Is There a “Window of Opportunity” for Flexibility Development in Youth?”*.

Ces résultats nuancent ceux de l'étude de Diàz-Cortés (2024), qui rapportait un gain de vitesse sur 30 m après un protocole court d'étirements statiques et PNF. À l'inverse, notre intervention n'a pas permis d'amélioration significative de l'accélération, ce qui suggère que **le type, la durée et le mode** d'étirement influencent différemment la performance sprint.

Un biais important à souligner est l'**absence de mesure directe de l'amplitude de foulée** : nous avons supposé que l'amélioration de la souplesse active puisse la substituer, sans toutefois la quantifier en situation réelle de course.

➤ Fréquence de foulée

Les résultats de corrélation indiquent qu'au sein du GT2, l'évolution de l'accélération entre T1 et T2 est corrélée négativement à celle de la fréquence de foulée. Cela suggère qu'une diminution de la fréquence pourrait être compensée, voire dépassée, par une augmentation de l'amplitude de foulée. Ce résultat contraste avec les conclusions de **la thèse de Rumpf (2013)**, selon lesquelles les gains de vitesse chez les jeunes athlètes s'expliquent principalement par une augmentation de la fréquence.

Dans le cadre de notre étude, il semblerait donc que **l'amplitude de foulée** ait joué un rôle plus déterminant dans l'amélioration de l'accélération, potentiellement en lien avec une meilleure efficacité mécanique ou une force de projection accrue, bien que cette dernière n'ait pas été directement mesurée.

6.3) Influence des facteurs anthropométriques sur l'évolution de l'accélération

Durant notre protocole de 30 semaines, l'évolution des facteurs anthropométriques (taille et poids) n'a pas influencé significativement l'évolution de l'accélération. Ces résultats viennent compléter ceux de Kaplan et collaborateurs (2017), qui avaient observé des corrélations significatives entre l'âge, la taille et la vitesse sur 20 et 30 mètres. Toutefois, leur étude ne portait pas spécifiquement sur la phase d'accélération entre 5 et 30 mètres. Par ailleurs, bien que nous ayons analysé l'évolution du poids, aucune variation significative n'a été relevée dans les deux groupes sur l'ensemble des trois périodes.

Un biais important à noter est **l'absence de mesure de la composition corporelle (masse grasse et masse maigre)**, qui aurait permis une analyse plus fine de l'impact du poids sur la performance.

7) Conclusion

7.1) Résumé des résultats de l'étude

Pour conclure, cette étude a permis de mieux comprendre les effets de deux types de programmations visant à faire évoluer les facteurs biomécaniques et l'accélération du jeune joueur de football âgé de 9 à 10 ans. Bien que les 2 groupes aient évolué en accélération sur 30 semaines du protocole, il n'y a pas eu de différence significative entre l'évolution de l'accélération des 2 groupes. Cependant, notre étude a pu montrer une amélioration significative de la souplesse active des ischio-jambiers du GT1 grâce à la programmation de 15 semaines d'étirements activo-dynamiques. Cette évolution n'a pas amené un gain d'accélération mais les corrélations observées suggèrent qu'une diminution de la fréquence de foulée pourrait être associée à une amélioration de l'accélération, soulignant l'importance de l'amplitude de foulée dans cette phase du sprint. Ces résultats soulignent l'intérêt d'intégrer des outils d'analyse plus précis, permettant notamment d'évaluer l'amplitude de foulée et l'angle du genou, afin d'approfondir les liens entre souplesse active et performance en sprint.

Enfin, bien que les caractéristiques anthropométriques aient évolué naturellement sur la durée du protocole, elles ne semblent pas avoir influencées l'accélération. Il serait pertinent, dans de futures études, de les évaluer de façon plus précise (longueur de jambe, masse grasse, masse maigre) pour affiner cette analyse.

7.2) Perspectives de l'étude

Dans la continuité de cette étude, plusieurs pistes peuvent être explorées. Il serait tout d'abord pertinent de reproduire le protocole sur une population plus large, incluant des profils variés en termes d'âge, de taille, de poids et de sexe, afin de généraliser les résultats à un échantillon plus représentatif.

L'intégration d'outils d'analyse plus avancés permettrait également d'enrichir les données collectées. On peut envisager, par exemple, l'utilisation de logiciels dotés d'intelligence artificielle pour mesurer l'amplitude de foulée en situation réelle, de capteurs GPS pour obtenir des informations plus précises sur la vitesse de projection, ainsi que de plateformes de force pour quantifier la force de poussée au sol.

Enfin, une amélioration du protocole d'entraînement est envisageable, notamment en diversifiant les modalités des séances de souplesse activo-dynamique et de travail sur la fréquence de foulée. Des interventions plus fréquentes (deux fois par semaine), avec des ajustements progressifs de l'intensité et du volume, pourraient optimiser les adaptations motrices et mécaniques recherchées.

8) Bibliographie

1. Barbosa GM, Trajano GS, Dantas GAF, Silva BR, Vieira WHB. *Chronic Effects of Static and Dynamic Stretching on Hamstrings Eccentric Strength and Functional Performance: A Randomized Controlled Trial. J Strength Cond Res.* juill 2020;34(7):2031. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003080>
2. Bustamante-Garrido A, Aedo-Muñoz E, Brito C, Silva-Esparza D, Pérez-Contreras J, Izquierdo-Redin M, Pérez-Curihual A, Caniuqueo A. *Anthropometric and mechanical factors determining sprint in young soccer players: a brief report. Front Sports Act Living* [Internet]. 24 oct 2024 [cité 23 déc 2024];6. Disponible sur : <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fspor.2024.1480973/full>. DOI: 10.3389/fspor.2024.1480973
3. Chatzilazaridis I, Panoutsakopoulos V, Bassa E, Kotzamanidou MC, Papaiaikovou GI. *Effects of Age and Sex on the Kinematics of the Sprinting Technique in the Maximum Velocity Phase. Appl Sci.* janv 2024;14(14):6057. <https://doi.org/10.3390/app14146057>
4. Cometti G. *LA DÉTENTE et LA PLIOMÉTRIE.*
5. Davis DS, Quinn RO, Whiteman CT, Williams JD, Young CR. *Concurrent Validity of Four Clinical Tests Used to Measure Hamstring Flexibility. J Strength Cond Res.* mars 2008;22(2):583. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31816359f2>
6. *Définition accélération - LE DICTIONNAIRE* [Internet]. [Cité 8 janv 2025]. Disponible sur : <https://www.le-dictionnaire.com/definition/accélération>
7. *Définition vitesse - LE DICTIONNAIRE* [Internet]. [Cité 8 janv 2025]. Disponible sur : <https://www.le-dictionnaire.com/definition/vitesse>
8. Díaz-Cortés JC, Hernández-Beltrán V, Solano Ruiz LF, Cepeda-Hernández JA, Méndez-Castro GE, Becerra-Patiño BA, Valenzuela-Carrillo A. *Decrease in muscle shortening and effect on strength and speed in adolescent soccer players (u-13). Sportis* [Internet]. 1 sept 2024 [cité 2 déc 2024]. Disponible sur : <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/39035>. DOI: 10.17979/sportis.2024.10.3.10779

9. Deng N, Soh KG, Abdullah B, Huang D, Xiao W, Liu H. *Effects of plyometric training on technical skill performance among athletes: A systematic review and meta-analysis. PLoS One.* 2023;18(7):e0288340. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0288340>
10. Donti O, Konrad A, Panidi I, Dinas PC, Bogdanis GC. *Is There a “Window of Opportunity” for Flexibility Development in Youth? A Systematic Review with Meta-analysis. Sports Med Open.* 6 juill 2022;8:88. <https://doi.org/10.1186/s40798-022-00476-1>
11. Dovan M-L. *Ebook: Free Mobility Program Active Range Of Motion*, 2021. (accédé le 20 décembre 2023).
12. Howard RM, Conway R, Harrison AJ. *Muscle activity in sprinting: a review. Sports Biomech.* 2 janv 2018;17(1):1-17. <https://doi.org/10.1080/14763141.2016.1252790>
13. Kaplan T, Taşkın H, Akgül MŞ. *Relationship between age, height, weight and speed, acceleration, vertical jump in child soccer players 9-13 ages. Int J Sports Comput Sci.* 2016;4(S1):31-38. <https://doi.org/10.16951/ijscs.2016.04.1.31>
14. Kural D. *Biomechanics of sprinting. Biomechanics of sprint international studies and evaluations in the field of health sciences.* 2024 Oct;165. <https://doi.org/10.2165/00007256-199213060-00002>
15. *Les Footballs* [Internet]. [Cité 19 déc 2024]. Disponible sur : <https://www.fff.fr/8-les-football/70-le-foot-pour-les-enfants.html>
16. Malek NFA, Nadzalan AM, Tan K, Nor Azmi AM, Krishnan Vasanthi R, Pavlović R, Mohd Ibrahim F. *The Acute Effect of Dynamic vs. Proprioceptive Neuromuscular Facilitation Stretching on Sprint and Jump Performance. J Funct Morphol Kinesiol.* mars 2024;9(1):42. <https://doi.org/10.3390/jfmk9010042>
17. Meyers RW, Oliver JL, Hughes MG, Cronin JB, Lloyd RS. *Maximal Sprint Speed in Boys of Increasing Maturity. Pediatr Exerc Sci.* févr 2015;27(1):85-94. <https://doi.org/10.1123/pes.2013-0096>

18. Morin JB, Edouard P, Samozino P. *Technical Ability of Force Application as a Determinant Factor of Sprint Performance*. *Med Sci Sports Exerc*. 1 févr 2011;43:1680-8. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e318216ea37>
19. Moura TBMA, Leme JC, Nakamura FY, Cardoso JR, Moura FA. *Determinant biomechanical variables for each sprint phase performance in track and field: A systematic review*. *Int J Sports Sci Coach*. 1 févr 2024;19(1):488-509. <https://doi.org/10.1177/17479541231200526>
20. Murphy AJ, Lockie RG, Coutts AJ. *Kinematic Determinants of Early Acceleration in Field Sport Athletes*. *J Sports Sci Med*. 1 déc 2003;2(4):144-50. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24688275>
21. Oliveira LP, Vieira LHP, Aquino R, Manechini JPV, Santiago PRP, Puggina EF. *Acute Effects of Active, Ballistic, Passive, and Proprioceptive Neuromuscular Facilitation Stretching on Sprint and Vertical Jump Performance in Trained Young Soccer Players*. *J Strength Cond Res*. août 2018;32(8):2199. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002298>
22. Palucci Vieira LH, Carling C, Barbieri FA, Aquino R, Santiago PRP. *Match Running Performance in Young Soccer Players: A Systematic Review*. *Sports Med*. 1 févr 2019;49(2):289-318. <https://doi.org/10.1007/s40279-018-01048-8>
23. Pandy MG, Lai AKM, Schache AG, Lin YC. *How muscles maximize performance in accelerated sprinting*. *Scand J Med Sci Sports*. oct 2021;31(10):1882-96. <https://doi.org/10.1111/sms.14021>
24. Reiss D, R., P, P. *La Nouvelle Bible de la Préparation Physique*. Amphora. 2020.
25. Rhodes D, Valassakis S, Bortnik L, Eaves R, Harper D, Alexander J. *The Effect of High-Intensity Accelerations and Decelerations on Match Outcome of an Elite English League Two Football Team*. *Int J Environ Res Public Health*. 21 sept 2021;18(18):9913. <https://doi.org/10.3390/ijerph18189913>
26. Romero-Franco N, Jiménez-Reyes P, Castaño-Zambudio A, Capelo-Ramírez F, Rodríguez-Juan JJ, González-Hernández J, Morcillo JA. *Sprint performance and mechanical outputs computed with an iPhone app: Comparison with existing reference methods*. *Eur J Sport Sci*. 21 avr 2017;17(4):386-92. <https://doi.org/10.1080/17461391.2016.1249031>

27. Rumpf MC. *Sprint running kinetics and kinematics in youth* (Doctoral dissertation). *Auckland University of Technology*. 2013.
28. Samozino P, Rabita G, Dorel S, Slawinski J, Peyrot N, Saez de Villarreal E, Morin JB. *A simple method for measuring power, force, velocity properties, and mechanical effectiveness in sprint running*. *Scand J Med Sci Sports*. juin 2016;26(6):648-58. <https://doi.org/10.1111/sms.12490>
29. Silva AF, Alvurdu S, Akyildiz Z, Badicu G, Greco G, Clemente FM. *Variations of the Locomotor Profile, Sprinting, Change-of-Direction, and Jumping Performances in Youth Soccer Players: Interactions between Playing Positions and Age-Groups*. *Int J Environ Res Public Health*. janv 2022;19(2):998. <https://doi.org/10.3390/ijerph19020998>
30. Tottori N, Suga T, Miyake Y, Tsuchikane R, Tanaka T, Terada M, Isaka T. *Trunk and lower limb muscularity in sprinters: what are the specific muscles for superior sprint performance?* *BMC Res Notes*. 25 févr 2021;14(1):74. <https://doi.org/10.1186/s13104-021-05487-x>
31. Von Lieres Und Wilkau HC, Bezodis NE, Morin JB, Irwin G, Simpson S, Bezodis IN. *The importance of duration and magnitude of force application to sprint performance during the initial acceleration, transition and maximal velocity phases*. *J Sports Sci*. 17 oct 2020;38(20):2359-66. <https://doi.org/10.1080/02640414.2020.1785193>
32. Wu H, Li S, Lai J, Bian W, Campillo RR, Villarreal ES de, González-Bernal JJ. *Children's Sprint and Jump Performance after Plyometric-Jump Training: A Systematic Review*. *J Sports Sci Med*. 1 mars 2025;24(1):52-74. <https://doi.org/10.52082/jssm.2025.52>
33. *Formation Athlé | Fédération Française d'Athlétisme* [Internet]. [Cité 7 janv 2025]. Disponible sur : <https://www.formation-athle.fr/espace-encyclopedique/situation/9455?bc=30287>
34. *Les Footballs* [Internet]. [Cité 19 déc 2024]. Disponible sur : <https://www.fff.fr/8-les-football/70-le-foot-pour-les-enfants.html>

9) Annexes

9.1) Annexe 1 : protocole du test MySprint

Concernant l'échauffement, voici ce qui a été proposer comme échauffement standardisé pour les 2 groupes, il est à noter que c'est un échauffement d'avant-match qui a été proposé sur chaque match durant le protocole de 30 semaines :

- Partie 1 : Gammes athlétiques (aller-retour sur 10m) 5'
 - Course en trotinant
 - Ouverture thoracique avec les bras
 - Flexion d'épaules (élévation des bras)
 - Montée de Genoux
 - Talons fesses
 - Adducteurs/ abducteurs

- Partie 2 : Etirements activo-dynamiques (2')
 - Ischios-jambiers (étirements 6 secondes + talons fesses)
 - Quadriceps (étirements 6 secondes + bondissement sur place jambe tendue)
 - Adducteurs (étirements 6 secondes en chaise + balistique)

- Partie 3 : Sprints progressifs
 - Bondissements vers le haut (1 aller/retour)
 - Bondissements vers l'avant (1 aller/retour)
 - 10m/ 15m / 25m

Concernant le protocole du test, on peut le retrouver sur l'application Mysprint élaborée par Morin et ses collaborateurs.

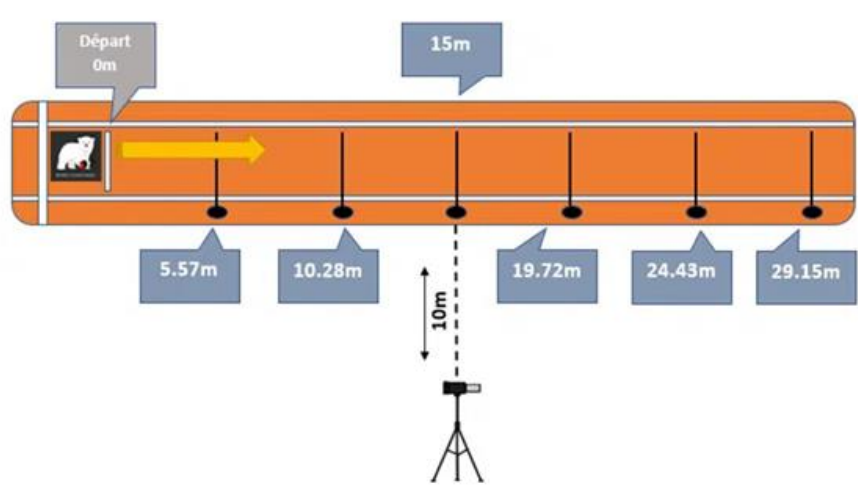


Figure 13: Schéma de l'installation du test de 30m mysprint

Le sujet se place sur la ligne de départ en adoptant la position recommandée par l'application MySprint, c'est-à-dire un bras levé et un bras au sol. Le départ est effectué de manière autonome, à la suite du signal verbal "quand tu veux", sans déclenchement externe.

Le testeur, positionné à environ 10 mètres du départ, filme le sprint à l'aide d'un iPhone fixé sur un trépied, à hauteur de hanche. La caméra suit la progression du coureur en effectuant une rotation progressive à partir du moment où ce dernier franchit un repère visuel placé à 10,28 m (constri-foot).

L'utilisation de **constri-foot** est indispensable pour ce protocole, car ils permettent de repérer précisément le passage du centre de gravité du sujet au-dessus de la barre. Cette référence visuelle est essentielle pour une analyse vidéo fiable des temps intermédiaires via l'application.

Le joueur réalisera 2 passages entrecoupés de 3 minutes de récupération et le meilleur temps sera conservé.

9.2) Annexe 2 : Protocole du test de souplesse active des ischios-jambiers

➤ Position de départ :

Le sujet est allongé en décubitus dorsal (sur le dos), la jambe non testée restera au sol. La jambe testée est positionnée en flexion de hanche à 90° et en flexion de genou à 90°. Le joueur maintient sa cuisse avec ses mains pour éviter tout mouvement de la hanche durant le test. Il a également pour consigne de garder ses grands-fessiers en contact avec le sol.

➤ Consignes de testing :

À partir de cette position, le sujet doit tendre la jambe testée le plus possible, sans déplacer la cuisse. Le mouvement doit être effectué lentement jusqu'à atteindre une extension maximale du genou, sans compensation.

➤ Mesures :

À l'aide d'un goniomètre placé au niveau de la facette latérale de la patella, l'angle est mesuré entre la cuisse et la jambe, en orientant l'axe vers la malléole externe et l'articulation de la hanche. Le point de départ est l'angle initial à 90°.

9.3) Annexe 3 : Programmation d'interventions du GT1

Séance 1-2-3 Objectif : éducation posturale Exercices par 2	1) Etirement souplesse active Ischios-jambiers 6 secondes + talons fesses 10 secondes 2) Etirement souplesse active quadriceps 6 secondes + saute-mouton (6 fois) 3) Etirement souplesse active psoas 6 secondes + flexion de hanche avec étirements ischios-jambiers, le deuxième joueur passe 10 fois en dessous de la jambe en activité	Série : 1 /jambe
Séances 4-5-6 Objectif : augmenter le volume d'étirement	1) Mêmes étirements S1-2-3	Séries : 2 / jambe
Séance 7-8-9 Objectif : augmenter l'intensité des étirements	Mêmes étirements que S4-5-6 mais 8 secondes de contraction et 15 secondes d'efforts dynamiques	Séries : 2/jambe
Séance 10-11-12 Objectif : ajouts de sprints avec focalisation sur le bondissement de foulée	1) Mêmes étirements que S7-8- 9 2) Jeu en relais en foulée bondissante avec slalom ballon sur le retour	1) Séries : 2 / Jambe 2) Environ 10 passages par joueur

Tableau 5: protocole d'entraînement du GT1

9.4) Annexe 4 : Programmation d'interventions avec le GT2

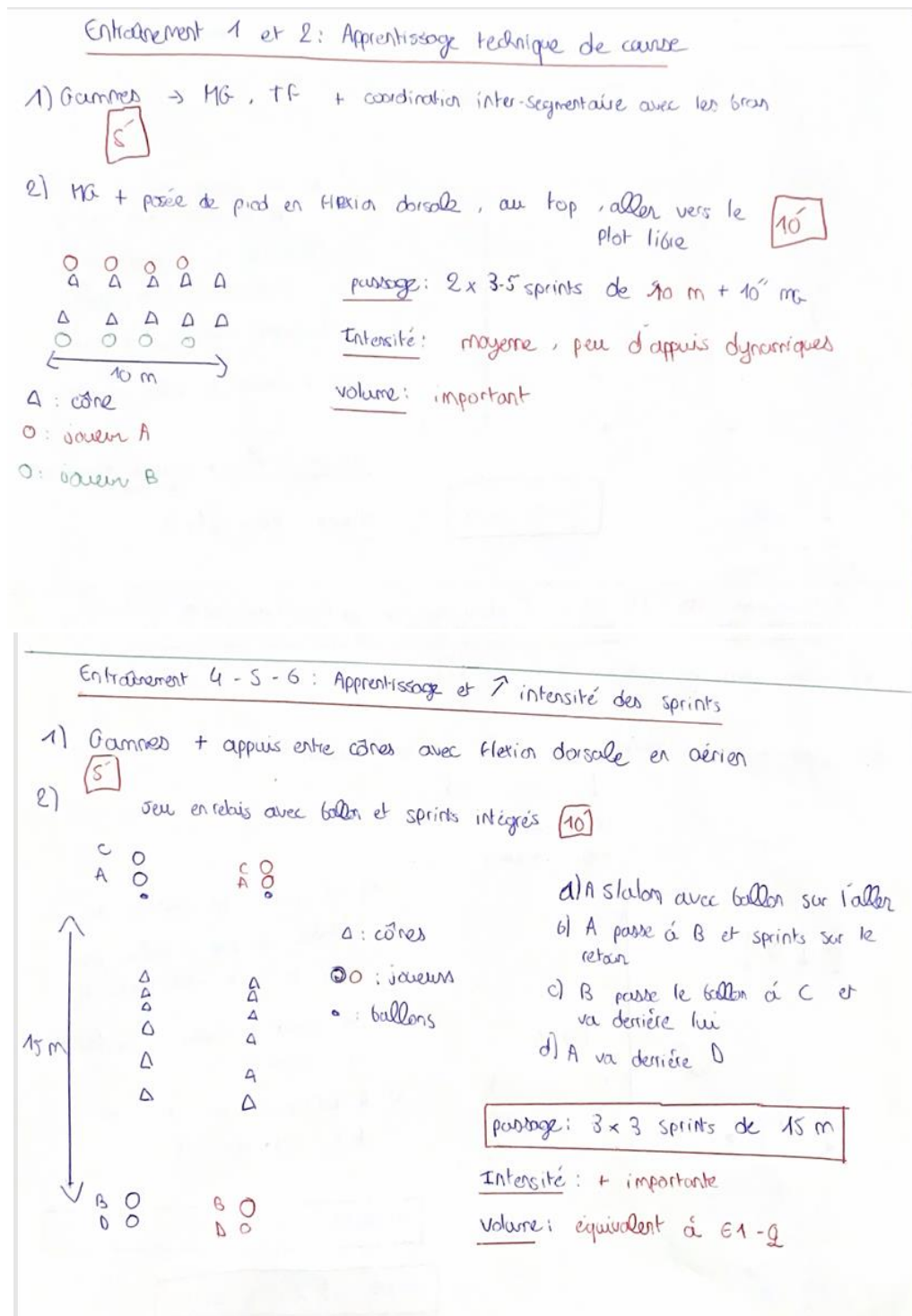


Figure 14: Schéma des 6 premières interventions effectuées au sein du protocole avec le GT2

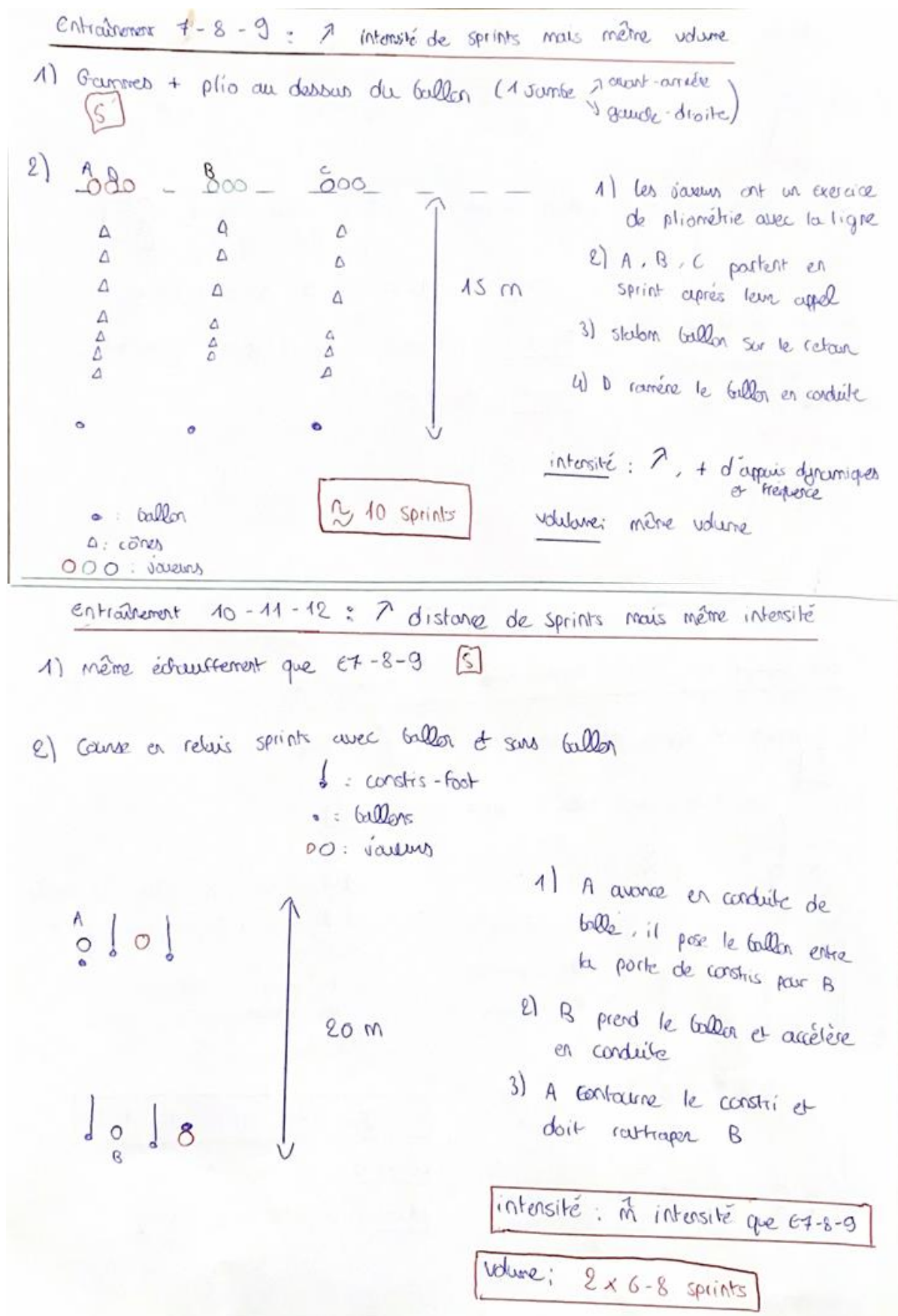


Figure 15: Schéma des 6 dernières interventions effectuées au sein du protocole avec le GT2

RÉSUMÉ

Objectif : Cette étude a pour objectif d'évaluer l'impact de l'évolution des paramètres de foulée (amplitude et fréquence de foulée) et des caractéristiques anthropométriques sur l'amélioration de l'accélération chez des joueurs de football prépubères de niveau élite (9-10 ans).

Matériel et Méthodes : 23 joueurs ont été répartis en deux groupes expérimentaux : GT1 (n=12) et GT2 (n=11), avec un âge moyen de $9,84 \pm 0,23$ ans, une taille moyenne de $1,41 \pm 0,05$ m, et un poids moyen de $33,81 \pm 4,12$ kg. L'étude a suivi un protocole de 30 semaines avec des tests réalisés à trois moments : T0 (début), T1 (après 15 semaines) et T2 (après 30 semaines). GT1 a suivi un programme axé sur la souplesse pour améliorer la flexibilité active des ischio-jambiers, tandis que GT2 s'est concentré sur l'amélioration de la fréquence de foulée. Les progrès ont été mesurés par le test de sprint de 30 mètres appelé « MySprint » (Morin et al., 2017) et des évaluations de souplesse des ischio-jambiers appelé « Knee extension test » (Makhlouf et al., 2022). De plus, les caractéristiques anthropométriques (taille, poids) ont été évaluées à chaque période.

Résultats : Des différences significatives d'accélération ont été observées entre les deux groupes aux périodes T0, T1 et T2, avec des résultats supérieurs pour le GT1. Toutefois, aucune différence significative d'accélération entre les groupes n'a été observée pour la période T1/T2. Concernant la fréquence de foulée, pour le GT1, une corrélation négative modérée a été observée entre la diminution de la fréquence de foulée et l'amélioration de l'accélération, avec un coefficient de corrélation de $r = -0,56$ ($p = 0,03$), suggérant que l'amplitude de la foulée pourrait avoir un impact plus marqué que la fréquence. En revanche, pour le GT2, aucune corrélation significative n'a été trouvée entre ces paramètres. Par ailleurs, le GT1 a montré une amélioration significative de la souplesse des ischio-jambiers comparé au GT2. L'analyse des caractéristiques anthropométriques a révélé une évolution significative de la taille dans les deux groupes, ainsi qu'une variation du poids, avec une différence significative entre les groupes pour le poids entre les périodes T1/T2 ($p = 0,025$).

Conclusion : Le programme de 15 semaines axé sur la souplesse a permis des améliorations significatives de la flexibilité des ischio-jambiers et une légère augmentation de l'accélération, en particulier pour le GT1. Cependant, l'évolution de la fréquence de foulée semble avoir un effet moins prononcé sur l'accélération que l'amplitude de la foulée. Les caractéristiques anthropométriques (taille et poids) ont évolué au cours de l'étude, mais n'ont pas montré de corrélation significative avec l'amélioration de l'accélération.

Mots-clés : Accélération, jeunes footballeurs, amplitude de foulée, fréquence de foulée, Mysprint, Evolution

COMPETENCES ACQUISES

- **Proposer un protocole d'entraînement spécifique au sprint adapté à une discipline sportive, en vue d'améliorer les qualités physiques des joueurs**
- **Utiliser des outils technologiques tels que Excel et MySprint dans le but de recueillir des données fiables en lien avec la performance des joueurs et selon les tests réalisés**
- **Maîtriser des outils statistiques tels que R ou GraphPadPrism en vue d'interpréter les résultats et de proposer des remédiations d'entraînement.**
- **5 mots représentants mes compétences : planification, analyse, interprétation, communication, adaptabilité**

ABSTRACT

Objective: This study aims to evaluate the impact of changes in stride parameters (stride length and stride frequency) and anthropometric characteristics on the improvement of acceleration in elite prepubescent soccer players (aged 9–10).

Materials and Methods: Twenty-three players were divided into two experimental groups: GT1 (n=12) and GT2 (n=11), with a mean age of 9.84 ± 0.23 years, average height of 1.41 ± 0.05 m, and average weight of 33.81 ± 4.12 kg. The study followed a 30-week protocol with assessments at three time points: T0 (baseline), T1 (after 15 weeks), and T2 (after 30 weeks). GT1 followed a program focused on flexibility to improve active hamstring flexibility, while GT2 focused on increasing stride frequency. Progress was measured using the 30-meter sprint test "MySprint" (Morin et al., 2017) and hamstring flexibility assessments via the "Knee Extension Test" (Makhlouf et al., 2022). Additionally, anthropometric characteristics (height, weight) were assessed at each testing point.

Results: Significant differences in acceleration were observed between the two groups at T0, T1, and T2, with GT1 showing superior results. However, no significant difference in acceleration between the groups was found for the T1/T2 period. Regarding stride frequency, GT1 showed a moderate negative correlation between decreased stride frequency and improved acceleration, with a correlation coefficient of $r = -0.56$ ($p = 0.03$), suggesting that stride length may have a greater impact on acceleration than frequency. In contrast, no significant correlation was found for GT2. Additionally, GT1 showed a significant improvement in hamstring flexibility compared to GT2. The analysis of anthropometric characteristics revealed a significant increase in height for both groups, as well as a change in weight, with a significant difference between the groups in weight evolution during the T1/T2 period ($p = 0.025$).

Conclusion: The 15-week flexibility-focused program led to significant improvements in hamstring flexibility and a slight increase in acceleration, particularly in GT1. However, changes in stride frequency appeared to have a less pronounced effect on acceleration compared to stride length. Anthropometric characteristics (height and weight) evolved over the study but did not show a significant correlation with improvements in acceleration.

Keywords: Acceleration, youth soccer players, stride length, stride frequency, MySprint, evolution