

UNIVERSITÉ DE FRIBOURG, SUISSE
FACULTÉ DES SCIENCES
DÉPARTEMENT DE MÉDECINE

En collaboration avec la
HAUTE ÉCOLE FÉDÉRALE DE SPORTS DE MACOLIN

Effets d'un entraînement pliométrique sur les facteurs de raideur
et de réactivité sur la course à pied.

Travail final pour l'obtention du Master en
Sciences du Mouvement et du sport
Option Enseignement

Conseiller: Dr. Didier STAUDENMANN
Co-conseiller-ère: Alain ROUVENAZ

Philippe DA SILVA
Fribourg, Novembre, 2015

TABLE DES MATIÈRES

Résumé	3
1. Introduction	4
1.1. Aspects fonctionnels de la course à pied	5
1.2. Pliométrie	8
1.3. Seconde loi de Newton et loi de Hooke.....	11
1.4. Elasticités	12
1.5. Relation force-longueur	14
1.6. Réactivité	15
1.7. Raideur	15
2. Méthodes et matériels	17
2.1. Participants.....	17
2.2. Déroulement.....	18
2.3. Accélérométrie.....	18
2.3.1. Runcheck	20
2.3.2. Pliométrie.....	20
2.4. Entraînement Pliométrique	21
2.5. Analyse statistique	22
3. Résultats	23
3.1. Réactivité	23
3.2. Raideur	24
4. Discussion et conclusion	25
5. Remerciements.....	28
6. Bibliographie.....	29
7. Déclaration personnelle.....	32
8. Droits d'auteur	32
9. Annexes.....	33

RÉSUMÉ

Si des chercheurs se sont concentrés sur les aspects physiologiques de la course à pied, d'autres se sont penchés sur les questions de la mécanique de la locomotion. Le domaine de la biomécanique a pu faire ressortir certains paramètres importants de la foulée pour améliorer la performance des athlètes, tels que la raideur et la réactivité musculaire.

Cette étude avait pour objectif de mesurer et d'analyser les effets d'un entraînement pliométrique de quatre semaines sur les paramètres de raideur et réactivité des membres inférieurs dans la course à pied. Grâce à l'accéléromètre de la société Myotest, il a été possible de mesurer les paramètres de course et de saut des sujets. Un échantillon de 18 athlètes (8 femmes et 10 hommes) a passé deux tests permettant d'évaluer les paramètres mécaniques de la course à pied et du counter movement jump (CMJ). Leurs données personnelles étaient les suivantes: âge 19 ± 3 (moyenne \pm écart-type) ans (17 à 25 ans), taille 172 ± 9 cm et poids 60 ± 12 kg. Sur cette base, nous avons créé un programme d'entraînement pliométrique pour les sujets ayant des valeurs inférieures (groupe expérimental) à la médiane des valeurs de l'échantillon. Pour ceux dont les valeurs étaient supérieures (groupe contrôle), ils continuaient leurs activités athlétiques habituelles. A la fin de l'expérience, tous les sujets ont à nouveau passé les deux tests afin de savoir si l'effet de l'entraînement pliométrique provoquait une différence significative sur les paramètres de raideur et de réactivité des membres inférieurs.

L'entraînement pliométrique du groupe expérimental a produit un effet significatif sur le paramètre de réactivité avec une moyenne des valeurs du pré-test de 3.2 ± 0.4 et du post-test de 3.7 ± 0.5 (+15.6%, $p=0.002$). Il n'a pas montré de changement significatif sur la raideur des membres inférieurs avec une moyenne des valeurs du pré-test de 34.4 ± 6.4 et du post-test de 38.5 ± 8.8 kN/m (+11.9%, $p=0.16$). L'entraînement habituel du groupe contrôle ne présente pas de changement au niveau de la réactivité avec une moyenne des valeurs du pré-test de 4.0 ± 0.6 et du post-test de 4.0 ± 0.4 (+0%, $p=0.16$). Il n'a également pas montré de différence au niveau de la raideur avec une moyenne des valeurs du pré-test de 61.6 ± 25.3 et du post-test de 49.5 ± 11.7 kN/m (-19.6%, $p=0.1$).

1. INTRODUCTION

"Plus vite, plus haut, plus fort"¹. Henri Didon prononça ces termes en 1891 lors des championnats de "l'Association Athlétique de l'école Albert le Grand". Ceux-ci visaient à promouvoir les activités athlétiques et le dépassement de soi. Ce slogan se reflète parfaitement dans les performances athlétiques, notamment dans les différentes disciplines de course à pied. Alors que Steve Ovett, le britannique triple champion du 1500 mètres sur piste a placé son record personnel à 3min30s77 en 1985, les athlètes des générations suivantes ont pu passer en dessous de la barre des 3min30. C'est en 2001 que le coureur marocain Hicham El Guerrouj, l'actuel détenteur du record, a effectué sa meilleure performance en 3m26s12.

De nombreux chercheurs se sont penchés sur les propriétés fonctionnelles du muscle (A.F. Huxley & R. Niedergerke, 1954; S.R. Hammer et al., 2010; L-L Gras, 2011) ou l'efficacité de la course à pied (T. Anderson & W. Tseh, 1994; C. Dunke et al., 2010; P.U. Saunders et al., 2004). La foulée répond avant tout à des lois qui relèvent de la biomécanique et la course se définit par le régime de contraction pliométrique. Cette question a fait l'objet d'une série d'études pour analyser ce mouvement (F. Leboeuf et al., 2006; P.W. Kong & H. de Heer, 2008; J-B. Morin, 2010; T.F. Novacheck, 1998). La biomécanique a pu faire ressortir certains paramètres importants de la foulée, tels que la réactivité² et la raideur³ musculaire. Un temps de contact plus faible au sol et une phase de vol plus longue sont des caractéristiques recherchées pour améliorer la foulée des coureurs. Il a été prouvé qu'un entraînement pliométrique améliorerait ainsi l'efficacité de la foulée de course à pied (R.W. Spurr et al., 2003; A.M. Turner et al., 2003).

L'objectif de ce travail est de mesurer la raideur et la réactivité dans la course à pied à l'aide d'un accéléromètre. La première partie du travail sera consacrée aux aspects théoriques de la problématique. Ensuite, il s'agira de mesurer les paramètres « raideur » et « réactivité » de la foulée. Pour cela, 18 athlètes (femmes n=8, hommes n=10) ont été recrutés pour participer à cette expérience. La population de base se divisera alors en deux échantillons. Les sujets dont les valeurs des tests seront inférieures à la médiane du groupe (groupe expérimental) se soumettront à un programme d'entraînement pliométrique de quatre semaines. Ce protocole a

¹ *Les symboles Olympiques*, Le musée olympique, 2ème édition (2007). Consulté le 24 septembre 2015. Disponible sur : http://www.olympic.org/documents/reports/fr/fr_report_1303.pdf.

² La réactivité correspond au rapport entre le temps de vol et le temps de contact au sol (cf. voir chapitre 1.6. réactivité).

³ La raideur représente la capacité des muscles et des tendons à résister à la déformation (cf. voir chapitre 1.7. raideur).

pour but d'optimiser les valeurs de ces deux paramètres de la course à pied. Le deuxième échantillon (groupe contrôle) poursuit ses activités athlétiques habituelles. Une évaluation finale permettra d'analyser les effets du programme d'entraînement.

1.1. ASPECTS FONCTIONNELS DE LA COURSE À PIED

Pour comprendre le mouvement de la course à pied, il est important de pouvoir décomposer le geste en différentes phases, ainsi que d'identifier les structures mobilisées. Cette discipline athlétique ne sollicite pas que les membres inférieurs de l'appareil moteur. Le balancement des bras joue un rôle important dans l'équilibre du mouvement des jambes. L'ergonomie de course dépend également d'une posture stable. Néanmoins, ce travail se centrera sur l'activité musculaire des membres inférieurs. Afin de mieux comprendre la course à pied, nous décomposerons ce mouvement pour présenter les différentes phases qui le composent avant d'aborder l'aspect fonctionnel.

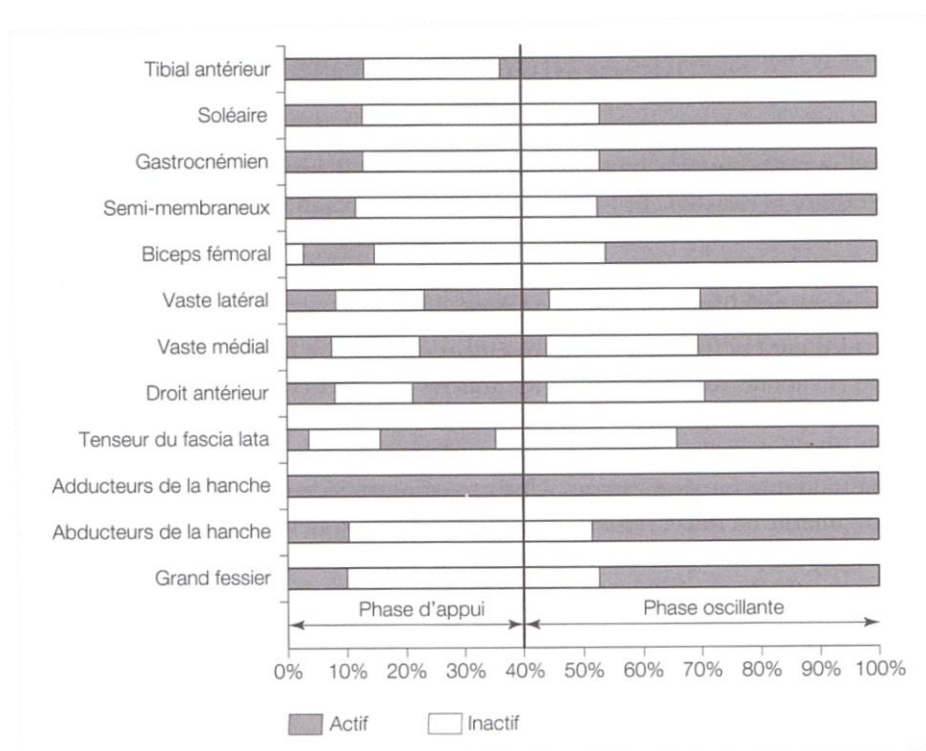


Fig. 1: Activité musculaire durant la course. L'axe horizontal représente la durée d'un cycle de course complet, de 0% à la frappe d'un talon jusqu'à 100% à la nouvelle frappe du même talon⁴.

⁴ Grimshaw, P., Burden, A. (2010). *Biomécanique du sport et de l'exercice*. Bruxelles: de Boeck, p.301

La figure 1 ci-dessus présente l'activité des membres inférieurs lors d'un cycle complet de foulée. L'activité musculaire est maximale lors de l'impact au sol. Ceci est dû à la préactivation des muscles lors du moment qui précède l'impact. Immédiatement après, l'activité augmente pour permettre à la jambe de propulser le corps vers l'avant (cf. voir fig. 2). Cependant, la contraction reste plus importante au moment de l'amortissement que lors de la poussée (cf. voir fig. 3). L'activité musculaire augmente parallèlement avec l'accroissement de la vitesse de course. Il est également important de noter que l'activité musculaire contribue de manière importante à la phase de suspension.

La phase de poussée produit un déplacement vertical plus important en situation de course à pied que lors de la marche. La vitesse verticale est donc plus importante, du fait que le corps tombe de plus haut. Ceci peut s'exprimer à l'aide de la courbe force-temps ci-dessous (cf. voir fig. 2):

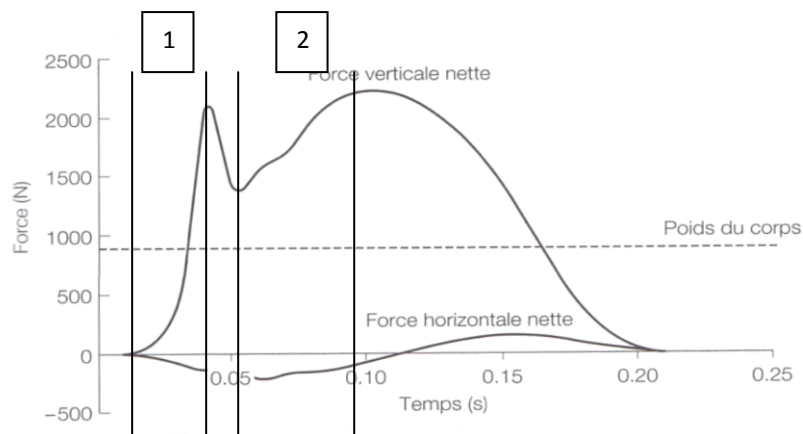


Fig. 2: Forces horizontale et verticale nettes durant la phase d'appui de la course. L'axe horizontal montre la durée en seconde et l'axe verticale la force en Newton. 1) La force augmente rapidement lors de l'impact au sol (phase d'amortissement). 2) La force augmente à nouveau pour permettre de se propulser vers l'avant (phase de poussée)⁵.

Le pic de force intervient à 0,05s après l'impact (0,15s pour la marche). Les structures du pied sont mobilisées plus rapidement lorsque la contrainte est supérieure. Cette force verticale est directement liée au poids de l'athlète. En règle générale, elle peut atteindre 2 à 2,5 fois le poids du corps. De plus, la force d'impact verticale croît en même temps que la vitesse de course augmente. Quant à la force de propulsion verticale, elle est moins affectée par la vitesse et reste donc constante. La variation de force intervient plus rapidement en situation de course car la phase d'appui dure moins longtemps.

⁵ Grimshaw, P., Burden, A. (2010). *Biomécanique du sport et de l'exercice*. Bruxelles: de Boeck, p.303.

L'activité musculaire présentée, il est maintenant important de clarifier les différentes phases composant la foulée. Nous pourrions ainsi analyser de façon plus pertinente les paramètres de course à pied, qui sont l'objet de recherche de notre étude. Le cycle de course se divise en deux phases distinctes. La première est constituée par la prise d'appui (cf. voir fig. 3, phase 1). Il s'agit du moment où le pied entre en contact avec le sol. Intervient ensuite une phase de vol (cf. voir fig. 3, phase 2), où les deux pieds se trouvent simultanément en l'air. La course se caractérise par des appuis simples, c'est-à-dire qu'un seul pied peut-être en contact à la fois au sol. Chaque phase d'appui est séparée par une phase de vol. Les périodes où le pied est en appui au sol constituent en moyenne 40% du temps du cycle de la course et les phases de vol les 60% restant. Mais ce temps varie selon la vitesse de course (que 20% de temps d'appui lorsque la course est maximale). Dans le jargon de la course à pied, ce mouvement d'enjambée est appelé la foulée.





Phase 1: prise d'appui			Phase 2: vol
Amortissement	Soutien	Poussée	Suspension
			

Fig. 3: Les différentes phases de la foulée de course à pied⁶.

Un entraînement spécifique peut augmenter la vitesse de course en allongeant la foulée et en améliorant la fréquence des pas. Cette amélioration touche en premier lieu l'allongement de la foulée, car il existe une fréquence optimale demandant un coût énergétique minime (Cavanagh et al. 1982; Conley et al. 1984; Cavanagh, et al. 1985). Le coût énergétique augmente rapidement lorsque la cadence s'accélère. La flexibilité et la force du sujet sont des facteurs plus déterminants que la taille pour la longueur de la foulée.

⁶ *Les différentes phases de la foulée de course à pied.* Consulté le 24 septembre 2015. Disponible sur: <http://www.volodalen.com/14biomecanique/la foulée20.htm>

1.2. PLIOMÉTRIE

Pour analyser le régime de contraction propre à la course à pied, nous allons commencer par présenter les régimes de contraction existants. Lorsqu'un muscle est en activité, le raccourcissement des myofibrilles entraîne un étirement des éléments élastiques tels que les tendons ou les tissus conjonctifs. Mais il existe différents régimes de contraction selon le mouvement effectué. Dans un premier temps, on dit qu'une contraction est *isométrique* lorsqu'il n'y a pas de changement de longueur du muscle ou d'angle dans l'articulation. Les segments du corps où est produite la force restent statiques. En terme physique, le travail⁷ mécanique est nul puisqu'il n'y a aucun déplacement du point d'application. Si la longueur du muscle varie lors de son activation et qu'on observe un raccourcissement ou un allongement du bras de levier, ce type de contraction s'appelle *isotonique*. Contrairement à la première, celle-ci est dynamique. Les mouvements sportifs sont en grande partie produits par des contractions isotoniques. En effet, il est rare que les segments du corps sous tension restent en position statique. Dans ce cas, on peut mesurer le travail mécanique en multipliant la tension par le déplacement du point d'application (en Newton mètre = Nm). Puisqu'il y a une variation d'un bras de levier, on observe deux régimes de contraction à l'intérieur de la classe isotonique. Lorsque le muscle se raccourcit et que le travail produit est positif, il s'agit d'une contraction *concentrique*. Dans le cas inverse, l'allongement du muscle engendre un travail négatif que l'on appelle contraction *excentrique*.

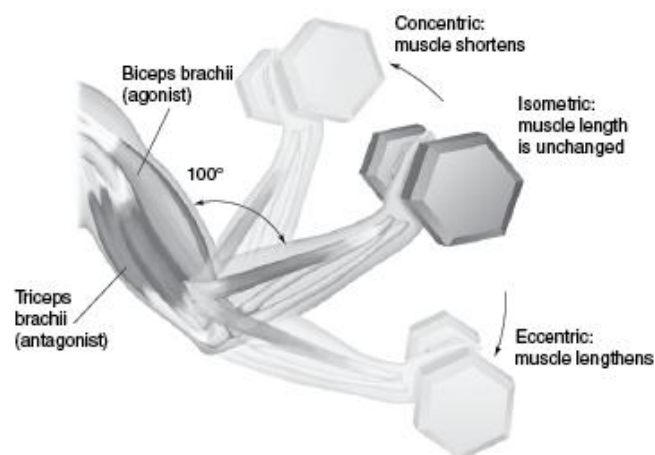


Fig. 4: Types de contraction musculaire⁸.

⁷ Déplacement d'une charge par un mouvement de levier autour de l'axe formé par l'articulation.

⁸ *Types de contraction*. Consulté le 24 septembre 2015. Disponible sur : http://inhome-personaltrainer.com/?attachment_id=2452

En ce qui concerne la course à pied, le régime de contraction prédominant est le régime pliométrique. Celui-ci décrit un muscle sous tension subissant dans un premier temps un étirement (phase excentrique), puis dans un deuxième temps un raccourcissement (phase concentrique) intervenant directement après. Les physiologistes appellent cette action "cycle étirement-détente". La phase excentrique correspond au moment de l'impact au sol, plus précisément à l'amortissement. La flexion des articulations est causée par la force gravitationnelle qui s'exerce sur le corps. Celle-ci provoque une contraction excentrique des muscles extenseurs. La force de résistance produite par le muscle s'oppose à la flexion des articulations. Cette contraction excentrique correspond à la phase d'étirement. L'énergie produite lors de cet étirement est alors emmagasinée dans les structures élastiques du muscle pour être restituée lors de la contraction. La phase concentrique se traduit par la poussée permettant à la jambe de propulser le corps vers l'avant. Lorsque l'intervalle entre la phase d'étirement et de propulsion est court (temps d'inversion doit être inférieur à 200 ms), la force produite est plus importante.

L'entraînement pliométrique est une méthode très utilisée chez les coureurs. Il vise une augmentation des performances en effectuant des exercices basés sur l'utilisation du poids du corps. L'objectif principal de cet entraînement est la conversion de la puissance musculaire en vitesse, en produisant des montées de force rapides (cf. voir la pente force-vitesse de la courbe fig. 5). Pour cela, cette méthode reprend des exercices très brefs qui consiste à étirer le muscle par une phase excentrique, puis à produire un raccourcissement intervenant immédiatement après grâce à une phase concentrique. Ce processus utilise également l'énergie élastique du muscle et le réflexe myotatique pour augmenter l'intensité de la contraction. Le mouvement produit est ainsi plus puissant sur un laps de temps très court (temps d'inversion < 200ms).

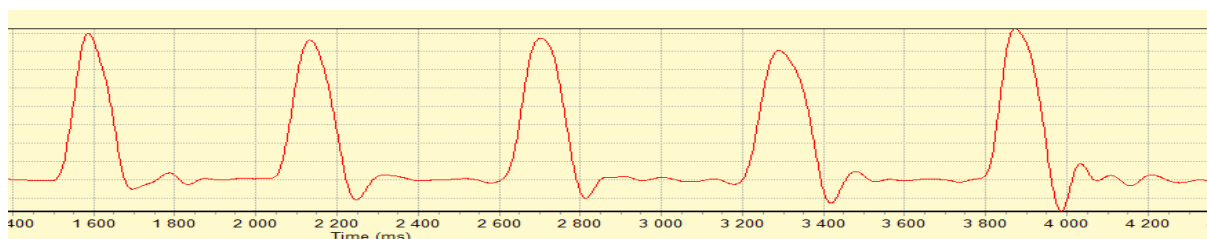


Fig. 5: Courbe représentant les pics de force lors d'un test pliométrique mesuré à l'aide d'un accéléromètre Myotest. L'axe horizontal représente le temps (en ms).

Ces exercices ont des répercussions sur le système neurologique et musculaire, en augmentant la vitesse à laquelle ils peuvent produire une force (cf. voir fig. 5). Le développement de la

puissance musculaire va de pair avec une meilleure économie de course. La durée de contraction des muscles est plus courte. Comme la puissance augmente et que le système neurologique est plus efficient, le rendement musculaire est par conséquent meilleur. On observe ainsi une amélioration de l'économie de course, donc un retardement de l'apparition de la fatigue musculaire.

Ce type d'entraînement vise également l'amélioration des composantes élastiques en série (CES) de la structure musculo-tendineuse. A.F. Huxley et Simmons (1971) ont développé un modèle moléculaire élaboré, distinguant deux éléments au niveau de la composante élastique série:

- CC: une composante purement contractile responsable de la production de force. Elle se caractérise par les ponts actine-myosine (sarcomère).
- CEP: une composante élastique parallèle située au niveau du tissu conjonctif et du sarcolemme. Elle correspond également à la théorie de l'interaction résiduelle entre protéines contractiles sur le muscle inactivé (D.K. Hill, 1968) et celle de la titine assurant la connexion entre filament épais et strie Z (Horowitz, 1992), conférant au muscle sa propriété élastique.
- CES: une composante élastique en série divisée en deux fractions. La première fraction, dite passive, se situe au niveau des tendons. La deuxième fraction est active et intervient au niveau des ponts actine-myosine.

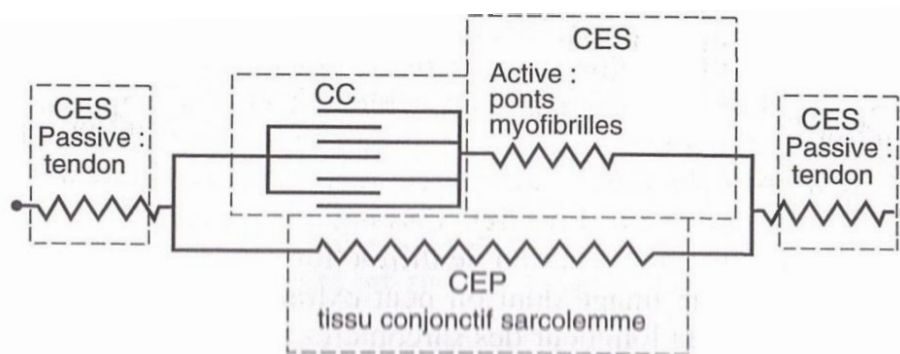


Fig. 6: Modèle à trois composantes fractionnant la composante élastique série en deux parties (Hill, 1951). La CC représente la composante contractile. La CES représente la composante élastique en série. Le CEP représente la composante élastique parallèle⁹.

⁹ Goubel, F., Lensel-Corbeil, G. (2003). *Biomécanique: éléments de mécanique musculaire*. 2ème édition. Paris: Masson, p.17.

Lorsque le muscle subit un étirement, ces composantes emmagasinent de l'énergie. Celle-ci est ensuite restituée lors de la contraction musculaire, à condition que la durée de restitution soit inférieure à 200ms. Un étirement de grande amplitude stocke une quantité importante d'énergie élastique. La contraction musculaire qui s'ensuit est donc plus intense (Handel et al., 1997 ; McHugh et al., 1999).

Les exercices de pliométrie doivent s'intégrer aux séances d'entraînements. Il faut trouver un agencement judicieux de la charge, au même titre que l'entraînement de la VO_2 max ou l'entraînement au seuil lactique pour avoir une efficacité maximale d'une charge aérobie. La durée de ces séances varie selon les exercices. Toutefois, il est important que la durée permette l'apparition de la fatigue musculaire. Il faut veiller à ce que le système nerveux et musculaire ne soit pas soumis à de trop fortes contraintes, aux risques de provoquer une surcharge, des blessures voir une diminution du potentiel de performance.

1.3. SECONDE LOI DE NEWTON ET LOI DE HOOKE

Le mouvement se définit par le déplacement, la vitesse et l'accélération. L'accélération (a) peut être déterminée grâce à la deuxième loi de Newton, qui reprend la formule suivante:

$$F = m \cdot a \quad (1)$$

Cette mesure est réalisable à condition de pouvoir mesurer les forces (F) externes qui s'exercent sur le corps. De nombreuses situations ne permettent donc pas de procéder à ces mesures. L'accélération peut, dans ces cas-là, être mesurée à l'aide d'un accéléromètre. Ces appareils de mesure suivent également la seconde loi de Newton, mais également la loi de Hooke.

La seconde loi de Newton stipule que tout corps ayant une masse (m) subit une accélération a soumis à une force nette F (équation 1). En ce qui concerne la loi de Hooke, elle décrit que la déformation d'un ressort est proportionnelle à la force qui s'exerce sur ce dernier. Mais cette force dépend de certains facteurs, tels que la raideur (k) et la déformation (d) du ressort. On peut alors dire:

$$F = k \cdot d \quad (2)$$

Nous pouvons donc combiner ces deux formules (équation 1 et 2) afin de trouver l'accélération:

$$a = (k \cdot d)/m \quad (3)$$

1.4. ELASTICITÉS

Les corps solides ont la capacité de se déformer et cela notamment lorsqu'ils sont soumis à une force. Cette dernière peut se traduire par une force simple, un moment de force ou les deux à la fois. Dans le cas où ce corps solide subit une force à chacune de ses extrémités, on dit qu'il subit une contrainte (C), c'est-à-dire la distribution de la force (F) à la surface du corps (A) (cf. voir fig. 7 à gauche):

$$C = F/A \quad (4)$$

Dans ce cas présent, le corps subit alors une déformation qui se traduit par une variation de longueur de l'état initial exprimée en pourcentage. On parle d'extension lorsque le corps s'allonge ou de contraction lorsqu'il se raccourcit. En phase de contact lors de la course, le talon d'Achille possède la capacité de se déformer d'environ 3%. Selon la loi de Hooke, cette déformation est proportionnelle à la contrainte qui s'applique sur le corps. Cependant, cette loi reste valable jusqu'au moment où le corps atteint la limite d'élasticité. A cet instant, il se déforme de manière irréversible et finit par se rompre. La limite avant que le talon d'Achille ne cède se situe à 10%. (cf. voir fig. 7 à droite)

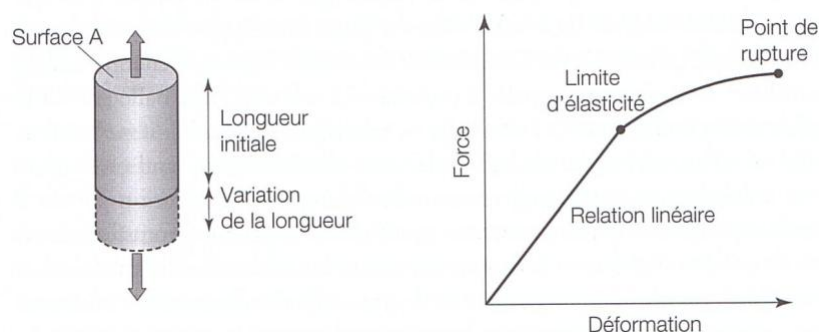


Fig. 7: Contrainte (force par unité de surface) et déformation d'un corps solide. A gauche, force s'exerçant sur une surface solide. A droite, courbe de déformation d'un corps par rapport à la force¹⁰.

¹⁰ Grimshaw, P., Burden, A. (2010). *Biomécanique du sport et de l'exercice*. Bruxelles: de Boeck, p.259

Un corps est dit élastique lorsqu'il peut se déformer sous l'effet d'une contrainte et reprendre rapidement sa forme initiale (ex: un ressort). On le qualifie d'inélastique lorsqu'il se déforme mais que son retour à l'état initial se fait difficilement (ex: béton). Selon la loi de Hooke (équation 2), la raideur se traduit par le rapport entre la force et la variation de longueur. Le module d'élasticité représente le rapport entre la raideur et la déformation. Cette relation linéaire implique que ces rapports soient des constantes. Il est possible de le mesurer selon la formule suivante:

$$F = k \cdot d \quad (5)$$

Cette force produit donc un travail emmagasiné dans le corps sous forme d'énergie potentielle élastique (E_{pe}):

$$E_{pe} = \frac{1}{2} k \cdot d^2 \quad (6)$$

Une fois la contrainte levée, le corps reprend sa forme initiale. On appelle ce phénomène la restitution. La force pour restituer le muscle à sa longueur d'origine est toujours inférieure à la force nécessaire pour produire la déformation. La perte d'énergie en phase de restitution est appelée hystérésis. On peut comparer cette énergie potentielle élastique au rebond d'une balle de tennis. Lorsqu'on lâche la balle, la compression induite par l'impact de la balle au sol permet, grâce à la restitution, de repartir vers le haut. Mais la balle n'atteindra jamais la hauteur initiale. Les forces de frottement lors de l'impact produisent une perte d'énergie qui est transformée en chaleur. C'est pourquoi la balle rebondit de moins en moins haut. Cette énergie potentielle élastique est représentée par la surface sous la courbe force-variation de longueur de la figure 8.

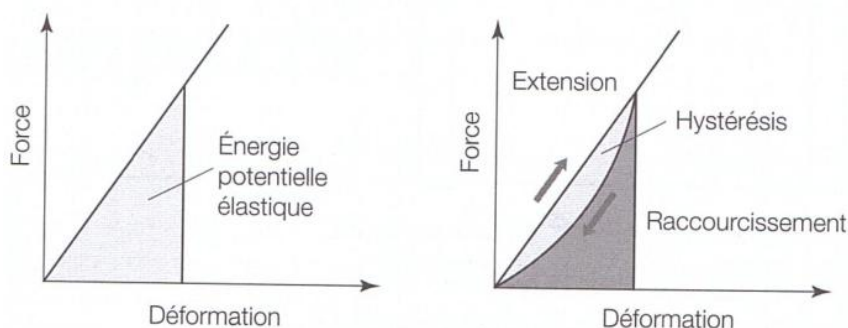


Fig. 8: A gauche, énergie de déformation. A droite, énergie de restitution¹¹.

¹¹ Grimshaw, P., Burden, A. (2010). *Biomécanique du sport et de l'exercice*. Bruxelles: de Boeck, p.261

1.5. RELATION FORCE-LONGUEUR

La force produite par un muscle varie selon la longueur des fibres lors de la contraction. Dans le cas d'un muscle non-activé étiré progressivement, on peut observer un changement de tension pour une longueur donnée. Il s'agit de la longueur de référence. Il est important de relever que l'augmentation de la force n'est pas proportionnelle à la longueur du muscle. Ceci s'explique du fait que le muscle étiré devient de moins en moins extensible. Les propriétés élastiques du muscle ne sont pas soumises à la loi de Hooke (équation 2). La raideur n'est donc pas constante. Le muscle subit tout d'abord une tension provoquée par les filaments de titine. Puis dans un deuxième temps, un nombre plus important de fibres du tissu conjonctif sont sollicitées. Le muscle a la capacité de s'étirer jusqu'à une certaine longueur. Une fois cette longueur dépassée, la tension devient trop grande et provoque la rupture du tendon.

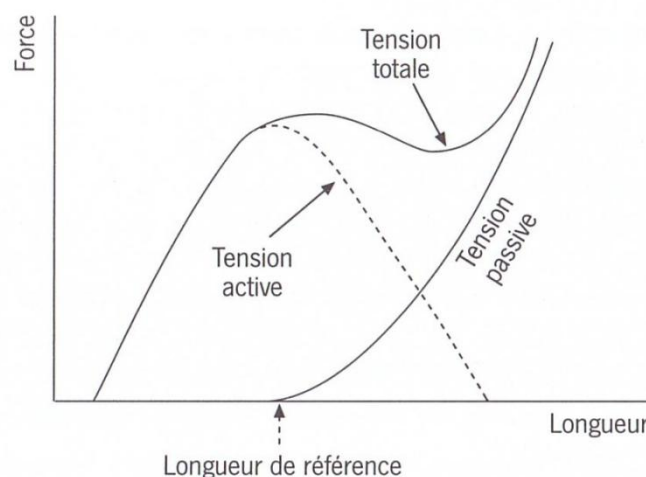


Fig. 9: Relation force-longueur (ou tension longueur) à l'échelle du muscle entier (Hill, 1951)¹².

La deuxième situation décrit le cas d'un muscle étiré lors d'une contraction maximale. Une tension apparaît pour environ 60% de sa longueur de référence. Celle-ci augmente avec l'étirement, puis descend légèrement avant de remonter. La troisième courbe définit la relation force active-longueur. Elle représente la force-longueur des éléments contractiles du muscle. En d'autres termes, elle ne prend pas en compte les structures élastiques musculaires. Cette courbe augmente jusqu'à obtenir un maximum, puis redescend. Cette longueur optimale du muscle, proche de la longueur de référence, permet la création maximale des ponts actine-myosine. Il existe différents niveaux d'allongement d'un sarcomère:

¹² Millet, G., Perrey, S. (2005). *Physiologie de l'exercice musculaire*, Paris: Ellipses, p.48.

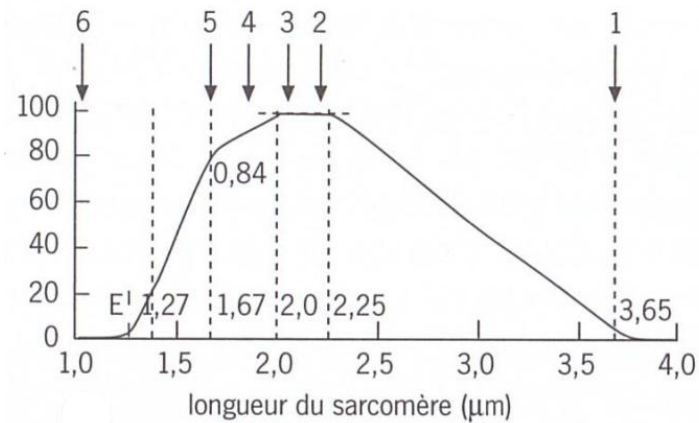


Fig. 10: Relation force-longueur à l'échelle du sarcomère (Hanson & Huxley, 1955)¹³.

1.6. RÉACTIVITÉ

La réactivité correspond au rapport entre le temps de vol (t_{vol}) et le temps de contact au sol ($t_{contact}$). Il se définit par la formule suivante:

$$Re = t_{vol} / t_{contact} \quad (7)$$

Cette formule donne un coefficient de réactivité Re. Cette indice est une unité arbitraire (au). Un coefficient élevé indique une bonne réactivité. Au contraire, un coefficient bas indique une mauvaise réactivité des jambes. Le but du coureur est d'avoir un ratio optimal entre ces deux facteurs pour obtenir un coefficient le plus élevé possible.

1.7. RAIDEUR

La raideur correspond à la capacité des muscles et des tendons à résister à la déformation. Pour une analyse précise, il faudrait isoler chaque tissu élastique pour déterminer sa contribution. L'articulation, les tendons ou les propriétés élastiques du muscle travaillent en symbiose, ayant chacun un effet sur ce phénomène. Ce dernier est étroitement lié à la phase d'amorti et de propulsion, puisqu'il est responsable de la variation d'angle des segments du corps lors de la foulée.

¹³ Millet, G., Perrey, S. (2005). *Physiologie de l'exercice musculaire*, Paris: Ellipses, p.50.

L'ensemble des muscles qui constituent le mollet joue un rôle crucial de ressort dans le mouvement de la course à pied. La prise d'appui sur l'avant-pied sollicite particulièrement ces muscles. Grâce à sa triple insertion au niveau du calcanéum, du tibia/péroné et du fémur, il possède une influence sur les différentes articulations de la jambe (genou, cheville et sous-talienne). Il joue donc un rôle de régulateur angulaire de la cheville et du genou. De ce fait, il alterne un travail excentrique au moment de l'amorti de la foulée, puis concentrique lors de la propulsion vers l'avant. Il endosse le rôle de relais mécanique en amortissant efficacement le corps lors de la réception, tout en utilisant la force de réaction au sol pour limiter l'angle des articulations.

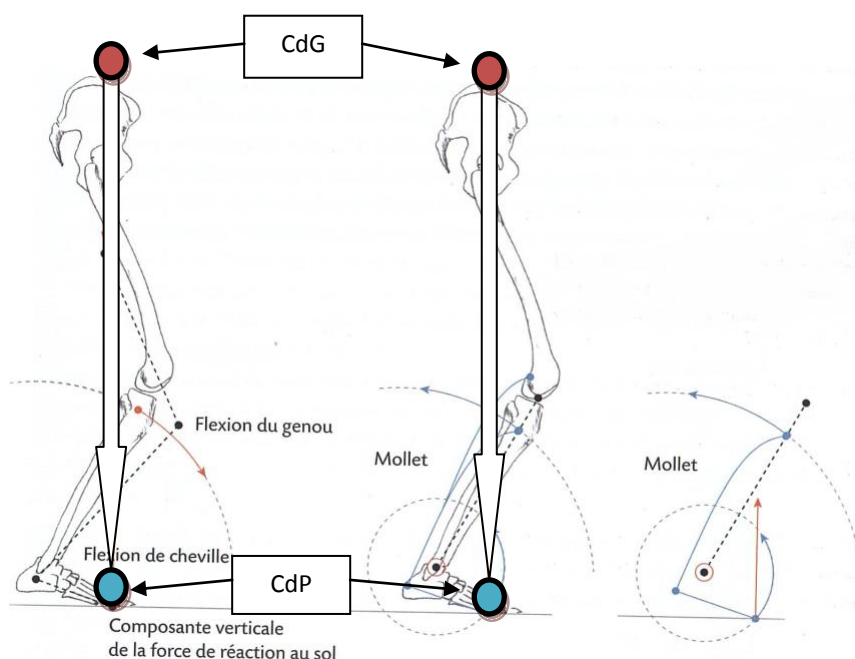


Fig. 11: Force de réaction des jambes au sol. Le centre de gravité (CdG) représente la résultante des forces permettant à un corps de se tenir en équilibre. Le centre de pression (CdP) correspond au point d'application de la force de réaction au sol. La raideur peut s'exprimer par le rapport entre la charge du poids du corps qui s'exerce au sol et le changement de longueur entre le CdG et le CdP par rapport à la position initiale¹⁴.

La raideur k , ou stiffness k , indique le rapport entre la contrainte (C), c'est-à-dire la charge qui s'exerce sur les muscles de la jambe, et la déformation des muscles (d), qui correspond à la variation de longueur des muscles de la jambe par rapport à leur position initiale. Elle se traduit par la formule suivante (dédié de l'équation 2):

$$k = C/d \quad (8)$$

¹⁴ Brigaud, F. (2011). *La course à pied: posture, biomécanique, performance*. Méolans-Revel: DésIris, p.47

En ce qui concerne nos tests, la raideur s'exprime en kN/m. La force verticale qui s'emmagazine au centre de pression (CdP) au sol lors du contact est mesurée en Newton. Le freinage dû au déplacement du centre de gravité (CdG) vers le bas est exprimé en mètre.

2. MÉTHODES ET MATÉRIELS

2.1. PARTICIPANTS

Pour cette expérience, 18 sujets ont été recrutés (8 femmes et 10 hommes). Leurs données personnelles sont les suivantes: âge 19 ± 3 (moyenne \pm écart-type) ans (17 à 25 ans), taille 172 ± 9 cm et poids 60 ± 12 kg. Les sujets proviennent du club d'athlétisme de Sion. En effet, ils ont été choisis selon leur discipline athlétique, c'est-à-dire le demi-fond. Les sujets sont en bonne condition physique et ne présentent pas de maladie cardio-respiratoire ou vasculaire. Cette étude est menée en accord entre le club athlétique de Sion et l'Université de Fribourg.

Les sujets ont été évalués sur la base de la course à pied et des sauts avant le début de l'expérience. Le test de course "Runcheck" fournit des valeurs sur la réactivité et le test "Pliométrie" des valeurs sur la raideur des jambes. A l'issue des pré-tests, les sujets ont obtenu une moyenne de réactivité de 3.63 ± 0.66 et de stiffness de 46.5 ± 27.7 kN/m. Après avoir analysé les résultats, l'échantillon se divise en deux populations distinctes. Cette division se fait en utilisant la médiane du groupe (médiane de réactivité $Re=3.5$, médiane de stiffness $k=39.0$ kN/m). Les 10 sujets ayant obtenu des valeurs inférieures au niveau de la réactivité et de la stiffness (groupe expérimental = GE) sont astreints à suivre un programme d'entraînement pliométrique de quatre semaines. Les huit autres sujets (groupe contrôle = GC) continuent leurs activités athlétiques normales, sans suivre de programme d'entraînement pliométrique. A la fin des quatre semaines d'entraînement, les deux groupes (GE et GC) passent les post-tests afin d'évaluer à nouveau la réactivité et la stiffness.

2.2. DÉROULEMENT

L'expérience a été menée sur la piste d'athlétisme en tartan du club d'athlétisme de Sion. Les pré-tests ont eu lieu le 01.05.2015. Après avoir analysé les résultats, la population de base a été divisée en deux échantillons. Les sujets du GE ont effectué huit entraînements pliométriques sur une durée de quatre semaines. Ces séances intervenaient au début de l'entraînement, directement après l'échauffement. Pendant ce temps, le GC effectuait des exercices de coordination et d'école de course à pied avec leur entraîneur. Une fois le programme effectué, le GC et le GE reprenaient l'entraînement habituel. A la fin des quatre semaines, tous les sujets ont effectué les post-tests le 01.06.2015.

Date	Séances	Types d'entraînement
01.05.2015	Pré-test	Test
04.05.2015	Entraînement 1	Découverte des exercices
08.05.2015	Entraînement 2	Intermittent court
11.05.2015	Entraînement 3	Intermittent long
15.05.2015	Entraînement 4	Circuit training
18.05.2015	Entraînement 5	Combiné
22.05.2015	Entraînement 6	Intermittent court
25.05.2015	Entraînement 7	Intermittent long
29.05.2015	Entraînement 8	Circuit training
01.06.2015	Post-test	Test

Les tests ont été agendés deux jours après leur dernier entraînement pour éviter un état de fatigue. Les sujets devaient également porter les mêmes chaussures pour les pré et post-tests afin ne pas altérer les valeurs. Malgré les dispositions prises pour avoir des conditions similaires, certains facteurs tels que l'hygiène de vie, le sport ou l'alimentation de ces athlètes n'ont toutefois pas pu être contrôlés, ce qui pourrait influencer les résultats.

2.3. ACCÉLÉROMÉTRIE

L'utilisation d'un accéléromètre permet de mesurer des paramètres mécaniques de la foulée. A l'aide de cette technologie, il est possible d'évaluer les fonctionnalités des propriétés des membres inférieurs. Selon le principe de l'accéléromètre, la déformation du ressort (Δd = variation de distance par rapport à la longueur initiale) est proportionnelle à l'accélération (équation 3). La plupart des accéléromètres fonctionnent selon ce principe masse-ressort. Ce ressort s'allonge jusqu'à ce que l'accélération de la masse soit égale à celle du système:

$$a = k \cdot \Delta d / m \quad (9)$$

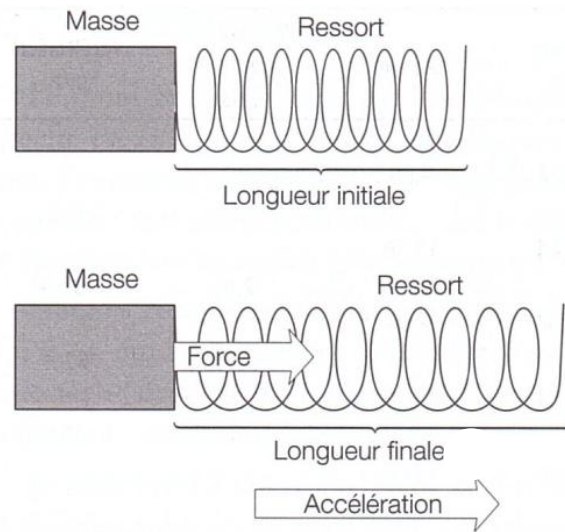


Fig. 12: Principe de l'accéléromètre¹⁵.

Pour cette étude, deux accéléromètres de la firme Myotest¹⁶ ont été utilisés pour les prises de mesure. Les sujets sont évalués individuellement. Ils donnent leurs informations concernant le poids, la taille et l'âge pour entrer les valeurs dans l'accéléromètre. La ceinture est serrée convenablement pour garantir un maintien adéquat du boîtier. L'accéléromètre est positionné au niveau de la taille, sur le côté droit de la hanche (éviter de le mettre au centre à cause du balancement provoqué par le mouvement). Puis, les sujets reçoivent les consignes concernant les protocoles de test. Ces accéléromètres mesurent l'accélération du corps. Ils suivent la loi fondamentale de la dynamique de Newton (équation 1). Les mesures sont prélevées à l'aide des modalités de test "Runcheck" pour la course à pied et "Pliométrie" pour le saut. Les signaux ont été numérisés à un taux d'échantillonnage de 500 Hz par l'accéléromètre Myotest.

¹⁵ Grimshaw, P., Burden, A. (2010). *Biomécanique du sport et de l'exercice*. Bruxelles: de Boeck, p.373

¹⁶ La société Myotest SA a été créée par Patrick Flaction en 2004 à Sion. Les accéléromètres Myotest apportent une technologie efficace aux sports et aux professionnels de la santé ainsi que le marché industriel en mesure de qualifier et de quantifier les capacités physiques. Informations disponibles sur : <http://www.myotest.com/>

2.3.1. RUNCHECK

Le test de course "Runcheck" évalue les paramètres de la course en mesurant l'accélération du centre de gravité durant une phase de course rectiligne. Il fournit des indications de stiffness k (équation 8) sur la tension des jambes.

Le test s'effectue sur une distance de 80 mètres en ligne droite. Les cônes sont disposés le long de la piste d'athlétisme chaque 12 mètres, le dernier cône étant placé à 8 mètres (pour totaliser une distance de 80 mètres). Un beeper retentit toutes les 3 secondes pour donner une vitesse de référence équivalente à 14.4km/h. Le sujet doit parcourir les 12 mètres afin d'arriver à chaque signal sonore au cône suivant. Une distance préparatoire de 24 mètres est placée avant la zone de mesure pour atteindre le rythme idéal (départ en course). Le départ et la fin du test sont indiqués par un double cône afin que le sujet démarre et arrête lui-même le test en appuyant sur le bouton central de l'accéléromètre.

2.3.2. PLIOMÉTRIE

Le test de saut "Pliométrie" permet de relever les valeurs de réactivité Re (équation 7). Il évalue la réactivité et les qualités de coordination des membres inférieurs. Les valeurs mesurées fournissent ainsi des indications sur la qualité du rebond. Un saut haut avec un temps de contact court présentera un bon indice de réactivité. Au contraire, un saut bas avec un temps de contact élevé indiquera un indice de réactivité faible.

Pour le protocole du test, le sujet se tient prêt et immobile, les mains sur les hanches pour pouvoir enclencher l'accéléromètre. Après être resté statique quelques secondes, un signal sonore indique automatiquement le début du test. Au bip de départ, le sujet effectue une série de 7 sauts consécutifs avec un temps de contact au sol le plus court possible et une hauteur la plus élevée possible. Le saut s'effectue grâce à l'extension du pied, en évitant de plier les genoux. L'impulsion doit être rapide et le temps de contact très bref. Le deuxième signal sonore indique la fin du test.

2.4. ENTRAÎNEMENT PLIOMÉTRIQUE

Le groupe expérimental effectue huit entraînements pliométriques agencés sur quatre semaines (deux entraînements par semaine). Les séances interviennent directement après l'échauffement et durent entre 20 et 30 minutes selon les types d'entraînement. Les exercices pliométriques sont issus du programme d'entraînement de l'accéléromètre Myotest. Ils comprennent trois exercices de réactivité et trois exercices de stiffness. Ces exercices sont présentés sous différentes formes d'entraînement: découverte des exercices, intermittent court, intermittent long, circuit training et combiné (Annexe 4). Les séances intermittent court, intermittent long et circuit training sont dispensées deux fois (Annexe 3).

Le programme d'entraînement reprend une série de trois exercices proposés pour les tests de réactivité Myotest:


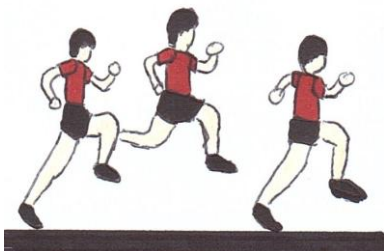

Réactivité allégée	Foulées bondissantes	Réactivité sur place
		
Le sujet doit sauter le plus haut possible avec un temps de contact au sol le plus court possible. L'appui des mains sur une barrière permet de ressentir un rebond léger et aérien.	Le sujet effectue des foulées hautes et longues, afin de percevoir une impression de suspension dans les airs.	Le sujet doit sauter sur place, le plus haut possible avec un temps de contact au sol le plus court possible. Il doit éviter la flexion des genoux.

Fig. 13: Exercices de réactivité selon Myotest.

En ce qui concerne la stiffness, le programme d'entraînement reprend une série de trois exercices proposés pour les tests de raideur Myotest:

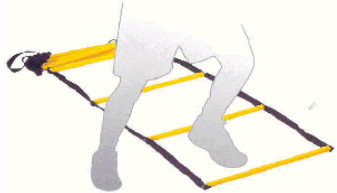
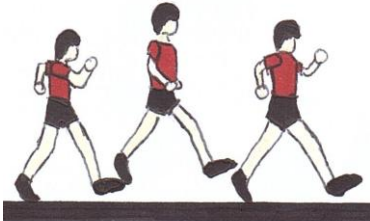
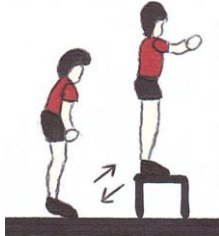
Taping	Pas de l'oie	Rebonds arrière-avant
		
Le sujet doit frapper le plus rapidement possible les pieds au sol.	Le sujet effectue des foulées les jambes tendues, en tirant à chaque pas la pointe du pied vers le haut.	Le sujet saute en contrebas, puis rebondit immédiatement sur la marche de départ. Il doit éviter la flexion du genou.

Fig. 14: Exercices de stiffness selon Myotest.

2.5. ANALYSE STATISTIQUE

Pour analyser les résultats, les tests statistiques sont effectués à l'aide du logiciel RStudio (Version 0.99.441 – © 2009-2015 RStudio, Inc). Dans un premier temps, le test Shapiro-Wilk permet de tester la normalité de la distribution des données. Puis, le test de Levene permet d'évaluer l'homogénéité des variances. Les résultats des tests de stiffness du GC et GE sont paramétriques. En ce qui concerne les tests de réactivité, le GC présente des résultats paramétriques. Le GE montre des résultats non-paramétriques (voir Annexe 5).

Pour déterminer la significativité des programmes d'entraînement, les résultats paramétriques sont analysés à l'aide des tests " PAIRED-T-TEST". Quant aux résultats non-paramétriques, nous utilisons le test "WILCOX-TEST". Ces tests fournissent une p-value (cf. voir Annexe 6). Si la valeur est inférieure à 5% ($p \leq 0.05$), le programme d'entraînement produit un changement significatif sur les valeurs mesurées.

3. RÉSULTATS

3.1. RÉACTIVITÉ

Pour interpréter les résultats, les valeurs sont représentées sous forme de Boxplot (boîte à moustache). Le tableau ci-dessous (fig. 15) schématise les résultats de la réactivité:

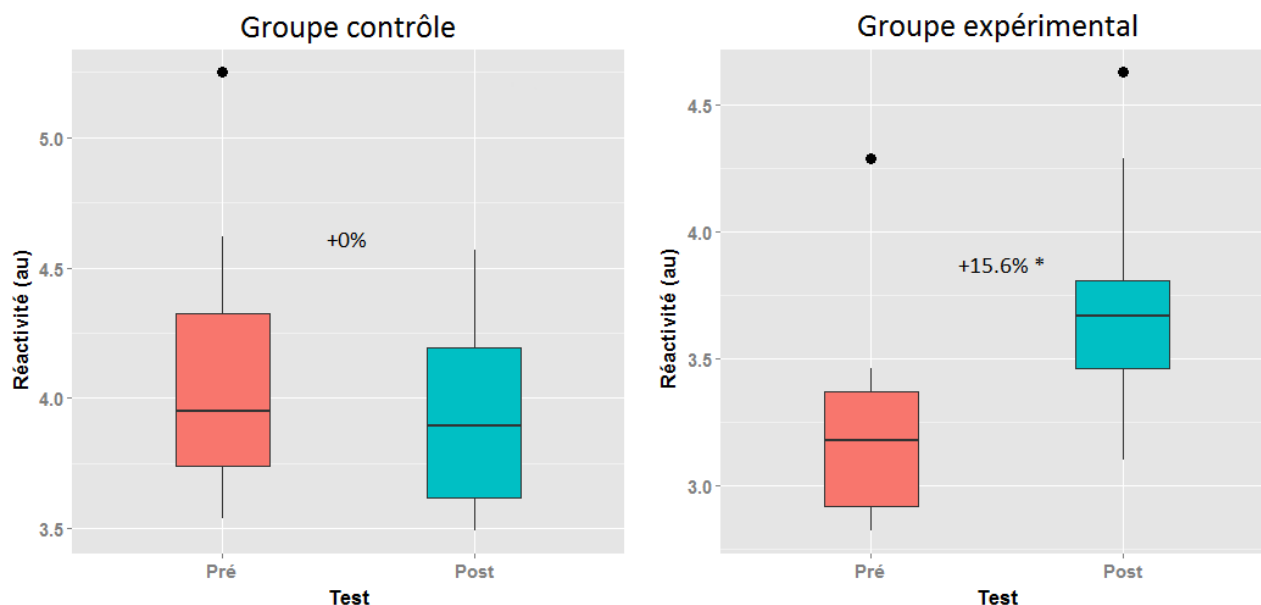


Fig. 15: Boxplot de la réactivité. A gauche, groupe contrôle. A droite, groupe expérimental. L'axe horizontal représente le test effectué. L'axe vertical indique la propriété mesurée et son unité de mesure. L'évolution est indiquée en pourcent et l'étoile indique si le test présente un résultat significatif. La boîte correspond au 50% de la population située au centre de la série. Le trait noir horizontal représente la médiane. Les traits noirs verticaux représentent les moustaches (dispersion des valeurs en début et en fin de série). Les points noirs représentent les valeurs extrêmes.

La figure 15 de gauche représente les résultats du GC. Il ne montre pas de différence au niveau de la réactivité ($p = 0.16$) après quatre semaines d'entraînement habituel. La moyenne du groupe a stagné avec une valeur de 4.0 ± 0.6 en pré-test et de 4.0 ± 0.4 en post-test (amélioration de 0%). Nous pouvons constater une dispersion plus régulière de la population centrale, avec une médiane au centre de la boîte.

La figure 15 de droite schématise les résultats du GE. Le test présente une différence significative ($p = 0.002$). L'entraînement pliométrique produit un effet notoire sur la réactivité

des jambes. Nous pouvons apercevoir une amélioration des valeurs des sujets entre le pré-test et le post-test à la fin des quatre semaines d'entraînement (amélioration de 15.6%). La moyenne est passée de 3.2 ± 0.4 à 3.7 ± 0.5 . Nous pouvons également noter une dispersion plus importante des valeurs au post-test. La médiane indique une dispersion équilibrée de la population.

3.2. RAIDEUR

La figure ci-dessous (fig. 16) schématise les résultats de la stiffness:

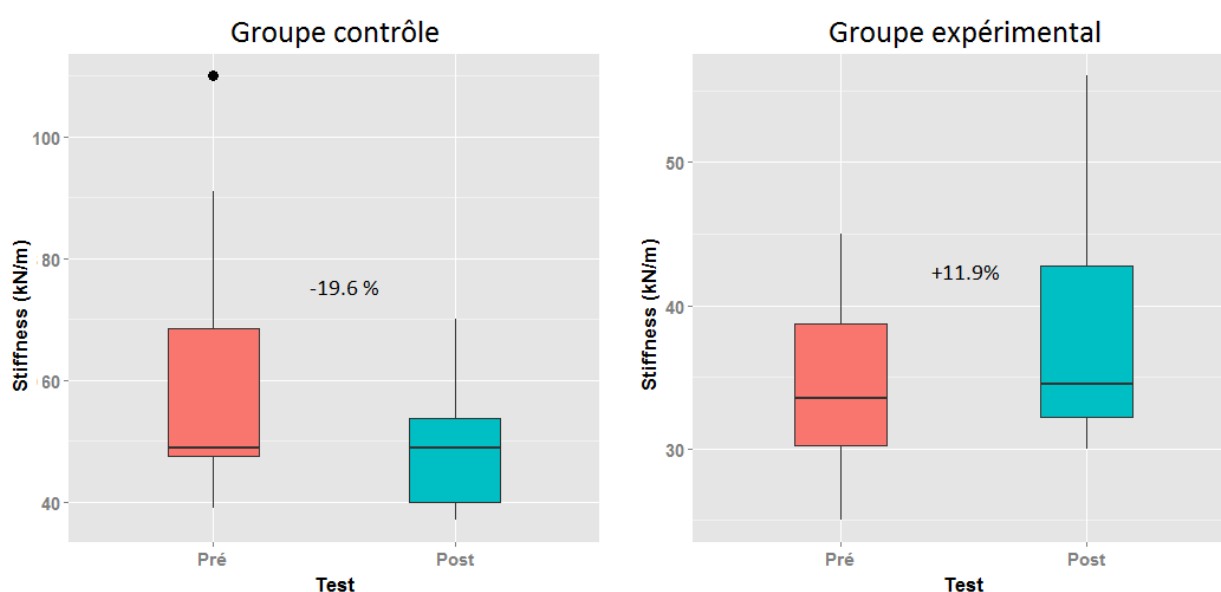


Fig. 16: Boxplot de la stiffness. A gauche, groupe contrôle. A droite, groupe expérimental. L'axe horizontal représente le test effectué. L'axe vertical indique la propriété mesurée et son unité de mesure. L'évolution est indiquée en pourcent et l'étoile indique si le test présente un résultat significatif. La boîte correspond au 50% de la population située au centre de la série. Le trait noir horizontal représente la médiane. Les traits noirs verticaux représentent les moustaches (dispersion des valeurs en début et en fin de série). Les points noirs représentent les valeurs extrêmes.

La figure 16 de gauche représente les résultats du GC. L'entraînement habituel ne provoque pas de différence significative au niveau de la raideur ($p = 0.1$). On peut apercevoir une tendance à la baisse des valeurs entre le pré-test et le post-test. La moyenne a considérablement diminué en passant de 61.6 ± 25.3 à 49.5 ± 11.7 kN/m (diminution de 19.6%).

La figure 16 de droite schématise les résultats du GE. Le test ne démontre pas de différence significative au niveau de la raideur ($p = 0.16$). Nous pouvons toutefois relever une augmentation de la moyenne de stiffness de 34.4 ± 6.4 à 38.5 ± 8.8 kN/m (augmentation de 11.9%). Nous pouvons noter une dispersion plus prononcée de la population située au-dessus de la médiane du post-test, alors que le pré-test indique une dispersion plus équilibrée des valeurs.

4. DISCUSSION ET CONCLUSION

L'objectif de ce travail était de mesurer les effets d'un entraînement pliométrique sur les paramètres de raideur et de réactivité dans la course à pied. Cette étude a permis de démontrer que le programme d'entraînement pliométrique de quatre semaines améliore la réactivité musculaire. Nous n'avons cependant pas pu démontrer un changement significatif au niveau de la raideur.

S'agissant de la réactivité, les sujets du groupe expérimental ont montré une amélioration des propriétés de ce paramètre (moyenne du GE est passée de 3.2 ± 0.4 à 3.7 ± 0.5). L'entraîneur n'incluait pas ce genre d'exercices durant les séances d'entraînement habituel. Les athlètes n'ont probablement jamais pratiqué les exercices de réactivité, ce qui pourrait expliquer la nette amélioration (+15.6%). Ces exercices pliométriques s'appuient principalement sur le cycle étirement-détente. Ils visaient une amélioration de la restitution de l'énergie élastique emmagasinée dans les structures élastiques du muscle. Ce mécanisme reste valide à condition que le temps d'inversion soit inférieur à 200ms. Mais l'indice de réactivité indique le rapport entre le temps de contact et le temps de vol. L'accéléromètre ne pouvait donc pas évaluer directement les propriétés élastiques, ni la restitution d'énergie. Il est difficile de savoir si le programme d'entraînement pliométrique a amélioré l'efficacité des structures élastiques du muscle. Il est possible que l'amélioration de la réactivité provienne d'une meilleure efficacité musculaire développée durant les exercices, impliquant d'autres mécanismes d'économie de course (A.M. Turner et al., 2003). Il a été prouvé qu'un entraînement pliométrique chez les athlètes en course à pied améliore l'économie de course (T. Anderson & W. Tseh, 1994; C. Dunke et al., 2010; P.U. Saunders et al, 2004), mais ne démontrait pas de changement significatif sur la réactivité lors du CMJ (A.M. Turner et al., 2003). Comme la mesure de la réactivité est indirecte, il serait intéressant pour une étude future d'évaluer la corrélation entre les propriétés élastiques du muscle et le coût énergétique de la course suite à un entraînement

pliométrie. Il serait ainsi possible d'analyser la contribution des propriétés élastiques du paramètre de réactivité de la course à pied.

Sur le plan de la raideur musculaire, le programme d'entraînement n'a pas produit de changement significatif (la moyenne de stiffness est passée de 34.4 ± 6.4 à 38.5 ± 8.8 kN/m), même s'il ont peut relever une augmentation de 11.9% par rapport au pré-test. Après concertation avec l'entraîneur, celui-ci intégrait déjà, durant ses entraînements habituels, des exercices de stiffness. Les sujets effectuaient régulièrement le pas de l'oie et le taping durant les exercices de l'école de course et de coordination. De ce fait, les résultats ont probablement pu être biaisés et ne montrent pas de différence significative. Il est important de relever que la température musculaire est également un facteur déterminant dans ce genre de charge. Une différence de température des muscles entre le pré-test et le post-test peut avoir une incidence sur les valeurs mesurées. Une étude a également démontré que la raideur était étroitement corrélée avec l'économie de course (Dunke, C. et al., 2010). Lorsque la raideur augmente, l'activation musculaire diminue. Une étude parallèle (Spurrs, R.W., 2003) démontre qu'un entraînement pliométrique de six semaines améliore la stiffness, mais également l'ergonomie de course. Il aurait été intéressant d'analyser les effets de l'entraînement pliométrique sur la raideur musculaire parallèlement à l'ergonomie de course en effectuant un test supplémentaire.

Un autre paramètre à prendre en compte était la durée du programme d'entraînement. Les sujets du GE avaient deux entraînements pliométriques hebdomadaires pendant quatre semaines. Il est possible qu'une période aussi courte n'ait pas pu engendrer de changement au niveau des paramètres mesurés. Une étude (Saunders, P.U., 2004) faite sur des athlètes de haut niveau a montré les effets de trois séances pliométriques hebdomadaires de trente minutes, pendant neuf semaines. Les sujets ont démontré une augmentation de 15% de leur force lors d'un test de 5 sauts pliométriques. Cette étude a fait ressortir les effets probants de cet entraînement sur les propriétés biomécaniques de la course à pied.

Il faut également souligner l'aspect contraignant d'un entraînement pliométrique. Ces exercices induisent une grande fatigue musculaire. Deux sujets du groupe expérimental ont dû cesser le programme d'entraînement suite à des douleurs musculaires. Après avis médical, l'un des athlètes souffrait d'une tendinite. Une mauvaise planification pourrait en être la cause. Il aurait été judicieux de programmer trois séances par semaine moins intensives, au lieu des deux séances prévues. Le choix s'est porté à deux entraînements par semaine, du fait que les

sujets s'entraînaient deux fois par semaine au sein du club, plus un entraînement cantonale ou ils devaient se déplacer dans d'autres clubs. Il faut aussi prendre en compte l'état physique des athlètes. Il y avait une grande disparité au sein du groupe, ce qui pourrait probablement expliquer une meilleure tolérance de certains sujets par rapport aux autres.

En conclusion, l'entraînement n'a pas changé significativement la raideur musculaire. En revanche, on a pu noter une amélioration de la réactivité. Les résultats doivent se restreindre aux conditions de cette étude. Le fait de choisir des athlètes confirmés peut minimiser l'effet de l'entraînement pliométrique. Malgré la répétition des exercices à chaque séance, la variation des formes d'entraînement a permis de maintenir une certaine motivation de la part des sujets jusqu'à la fin de l'étude. Ils ont également apprécié le fait de pouvoir mesurer leurs propriétés athlétiques et de les comparer après quatre semaines d'entraînement. Un test supplémentaire serait intéressant pour analyser l'amélioration en compétition, par exemple en effectuant une course de 800m chronométrée pré et post-entraînement.

5. REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier le Club d'athlétisme de Sion qui a généreusement collaboré dans le cadre de cette étude. Une entente chaleureuse et une bonne communication ont permis de mettre en place cette expérience dans les meilleures conditions. Les sujets ont également fait preuve d'une grande motivation lors des entraînements.

Je tiens également à remercier l'Université de Fribourg qui a encadré cette étude. Ils ont mis à disposition les appareils et autres instruments nécessaires pour la mise en place de l'expérience. Je remercie mon co-conseillé Alain Rouvenaz et mon conseiller Didier Staudenman pour leur aide et l'encadrement professionnel tout au long de l'étude.

6. BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages:

- Åstrand, P.-O., Rodahl, K. (1994). *Précis de physiologie de l'exercice musculaire*. 3^{ème} édition. Paris; Milan: Masson.
- Brigaud, F. (2011). *La course à pied: posture, biomécanique, performance*. Méolans-Revel: DésIris.
- Dufour, M. (2009). *Les diamants neuromusculaires: l'explosivité et la puissance musculaire*. Les qualités physiques; Tome 1. Chavéria: Volodalen.
- Dessons, Drut, Dubois, Herbrard, Hubiche, Lacour et al. (1982). *Traité d'athlétisme: les courses*. 2^{ème} édition; Paris: Editions Vigot.
- Goubel, F., Lensele-Corbeil, G. (2003). *Biomécanique: éléments de mécanique musculaire*. 2^{ème} édition. Paris: Masson.
- Grimshaw, P., Burden, A. (2010). *Biomécanique du sport et de l'exercice*. Bruxelles: de Boeck.
- Jäger, J.M., Krüger, K. (2012). *Der Muskel im Sport: Anatomie, Physiologie, Training, Rehabilitation*. Berlin, KVM.
- Millet, G., Perrey, S. (2005). *Physiologie de l'exercice musculaire*, Paris: Ellipses.
- Monod, H., Flandrois, R. (2003). *Physiologie du sport: bases physiologiques des activités physiques et sportives*. 5^{ème} édition; Paris: Masson.
- Puleo, J., Milroy, P. (2012). *Course à pied: anatomie et mouvement: un guide illustré pour accroître sa force, sa vitesse et son endurance*. Paris: Vigot.
- Weineck, J. (1984). *Anatomie fonctionnelle du sportif*. Paris: Masson.

Articles scientifiques:

- Anderson, T. and Tseh, W. (1994). Running economy, anthropometric dimensions and kinematic variables. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 26(5), 170.
- Cavanagh, P.R. & Williams, K. R. (1982). The effect of stride length variation on oxygen during distance running. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 14 (1), 30-35.
- Cavanagh, P.R. & Kram, R. (1985). Mechanical and muscular factors affecting the efficiency of human movement. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 17, 304-308.

- Cometti, G. *La détente et la pliométrie*. Centre d'expertise de la performance, UFR STAPS Dijon.
- Conley, D.L., Krahenbuhl, G.S., Burkett, L.N. & Lynn Millar, A. (1984). Following Steve Scott: Physiological changes accompanying training. *The Physician and Sportsmedicine*, 12, 103-106.
- Dunke, C. Pfaffenroth, C.M. McBride, J.M. (2010). Relationship between muscle strength, power and stiffness and running economy in trained male runners. *Health and Human Performance Faculty Publications*. 6-2010.
- Gras, L. L. (2011). *Thèse de doctorat: Caractérisation du comportement mécanique du muscle à différentes vitesses de sollicitation*. Paris: Arts et métiers Paris Tech
- Hamner, S. R., Seth, A. & Delp, S. L. (2010). Muscle contributions to propulsion and support during running. *Journal of Biomechanics*, 43(14), 2709-2716.
- Handel, M., Horstmann, T., Dickhuth, H-H., Gülch, R.W. (1997). *Effects of contract-relax stretching training on muscle performance in athletes*. European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology. Volume 76, Issue 5, pp 400-408.
- Hanson, J., Huxley, H.E. (1955). The structural basis of contraction in striated muscle. In: Brown, R., Danielli, J.F. (eds). *Symposia of society for experimental biology*. Number 9: fibrous proteins and their biological significance. Academic, New-York, pp. 228-264.
- Huxley, A. F., Niedergerke, R. (1954). *Structural changes in muscle during contraction*. University of Cambridge: Physiological Laboratory. 173(4412), 971-3.
- Kong, P.W. Kong. de Heer, H. (2008). Anthropometric, gait and strength characteristics of Kenyan distance runners. *Journal of Sports Science and Medicine* 7, 499-504.
- Leboeuf, F., Achard de Leluardière, F., Lacouture, P., Duboy, J., Leplanquais, F., Junqua, A. (2006). *Etude biomécanique de la course à pied*. Université de Poitiers. 27-020-A-20.
- McHugh, M.P., Connelly, D.A.J., Esron, R.G., Kremenich, I.J., Nicholas, S.J., Gleim, G.W. (1999). *The role of passive muscle stiffness in symptoms of exercise-induced muscle damage*. Am. J. Sports Med. Volume 27 no. 5 594-599.
- Morin, J-B. (2011). *Analyse de la biomécanique de la foulée de course par Myotest*. Université de Saint-Etienne: Laboratoire de physiologie de l'exercice.
- Novacheck, T. F. (1998). The biomechanics of running. *Gait posture*, 7(1), 77-95.

- Saunders, P.U. Pyne, D.B. Telford, R.D. Hawley, J.A. (2004). Factors Affecting Running Economy Trained Distance Runners. *Sports Med*, 34 (7), 465-485.
- Spurrs, R.W. Murphy, A.J. Watsford, M.I. Spinks W.I. Whitty, A.G. (2003). The effect of plyometric training on 3-km running performance. *European Journal Of Applied Physiology*. 89 (1), 1-7.
- Turner, A.M. Owings, M. Schwane, J.A. (2003). Improvement in Running Economy After 6 weeks of Plyometric Traing. *Journal of Strength and Conditionning Research*. 17 (1), 60-67.

7. DÉCLARATION PERSONNELLE

« Je soussigné certifie avoir réalisé le présent travail de façon autonome, sans aide illicite quelconque. Tout élément emprunté littéralement ou mutatis mutandis à des publications ou à des sources inconnues, a été rendu reconnaissable comme tel. »

Lieu, date

Signature

8. DROITS D'AUTEUR

« Je, sous-signé, reconnais que le présent travail est une partie constituante de la formation en Sciences du Mouvement et du Sport à l'Université de Fribourg. Je m'engage donc à céder entièrement les droits d'auteur- y compris les droits de publication et autres droits liés à des fins commerciales ou bénévoles- à l'Université de Fribourg.

La cession à tiers des droits d'auteur par l'Université est soumise à l'accord du soussigné uniquement.

Cet accord ne peut faire l'objet d'aucune rétribution financière. »

Lieu, date

Signature

9. ANNEXES

Annexe 1: Résultats des tests

Sujet:	1	Age:	16
Poids:	53.0 kg	Taille:	175 cm
Sexe:	M	Groupe (présence):	Exp.
TEST Pré-entraînement			
Saut de réactivité (pliométrie)		Runcheck	
N° de saut:	7	Distance:	80 m
		Vitesse:	15 km/h
Hauteur:	28.5 cm	Longueur des pas:	164 cm
Temps de contact:	112 ms	Temps de contact:	158 ms
Réactivité:	4.29	Stiffness:	30 kN/m
Stiffness:	40.8 kN/m	Réactivité:	1.6
		Fréquence:	146 ppm
TEST Post-entraînement			
N° de saut:	7	Distance:	80 m
		Vitesse:	15 km/h
Hauteur:	28.0 cm	Longueur des pas:	159 cm
Temps de contact:	103 ms	Temps de contact:	151 ms
Réactivité:	4.63	Stiffness:	33 kN/m
Stiffness:	58.4 kN/m	Réactivité:	1.6
		Fréquence:	153 ppm

Sujet:	2	Age:	17
Poids:	55.0 kg	Taille:	167 cm
Sexe:	M	Groupe (présence):	Exp.
TEST Pré-entraînement			
Saut de réactivité (pliométrie)		Runcheck	
N° de saut:	7	Distance:	80 m
		Vitesse:	15 km/h
Hauteur:	31.9 cm	Longueur des pas:	99 cm
Temps de contact:	177 ms	Temps de contact:	136 ms
Réactivité:	2.89	Stiffness:	45 kN/m
Stiffness:	22.2 kN/m	Réactivité:	1.4
		Fréquence:	187 ppm
TEST Post-entraînement			
N° de saut:	7	Distance:	80 m
		Vitesse:	15 km/h
Hauteur:	27.3 cm	Longueur des pas:	175 cm
Temps de contact:	110 ms	Temps de contact:	134 ms
Réactivité:	4.29	Stiffness:	45 kN/m
Stiffness:	53.1 kN/m	Réactivité:	1.5
		Fréquence:	179 ppm

Sujet:	3	Age:	19
Poids:	54.0 kg	Taille:	178 cm
Sexe:	M	Groupe (présence):	Contrôle
TEST Pré-entraînement			
Saut de réactivité (pliométrie)		Runcheck	
N° de saut:	7	Distance:	80 m
		Vitesse:	15 km/h
Hauteur:	29.4cm	Longueur des pas:	165 cm
Temps de contact:	120 ms	Temps de contact:	117 ms
Réactivité:	4.08	Stiffness:	61 kN/m
Stiffness:	51.5 kN/m	Réactivité:	2.1
		Fréquence:	166 ppm
N° de saut:			
TEST Post-entraînement			
N° de saut:	7	Distance:	80 m
		Vitesse:	15 km/h
Hauteur:	38.5 cm	Longueur des pas:	156 cm
Temps de contact:	123 ms	Temps de contact:	114 ms
Réactivité:	4.57	Stiffness:	62 kN/m
Stiffness:	39.2 kN/m	Réactivité:	2.3
		Fréquence:	159 ppm

Sujet:	4	Age:	16
Poids:	55.0 kg	Taille:	171 cm
Sexe:	M	Groupe (présence):	Exp. (50%)
TEST Pré-entraînement			
Saut de réactivité (pliométrie)		Runcheck	
N° de saut:	7	Distance:	80 m
		Vitesse:	15 km/h
Hauteur:	21.7 cm	Longueur des pas:	146 cm
Temps de contact:	124 ms	Temps de contact:	157 ms
Réactivité:	3.38	Stiffness:	34 kN/m
Stiffness:	45.8 kN/m	Réactivité:	1.3
		Fréquence:	169 ppm
TEST Post-entraînement			
N° de saut:	7	Distance:	80 m
		Vitesse:	15 km/h
Hauteur:	22.2 cm	Longueur des pas:	164 cm
Temps de contact:	125 ms	Temps de contact:	156 ms
Réactivité:	3.42	Stiffness:	34 kN/m
Stiffness:	44.8 kN/m	Réactivité:	1.3
		Fréquence:	169 ppm

Sujet:	5	Age:	16
Poids:	45.0 kg	Taille:	156 cm
Sexe:	F	Groupe (présence):	Exp.
TEST Pré-entraînement			
Saut de réactivité (pliométrie)		Runcheck	
N° de saut:	7	Distance:	80 m
		Vitesse:	15 km/h
Hauteur:	12.7 cm	Longueur des pas:	166 cm
Temps de contact:	112 ms	Temps de contact:	168 ms
Réactivité:	2.86	Stiffness:	25 kN/m
Stiffness:	54.1 kN/m	Réactivité:	1.1
		Fréquence:	173 ppm
TEST Post-entraînement			
N° de saut:	7	Distance:	80 m
		Vitesse:	15 km/h
Hauteur:	20.6 cm	Longueur des pas:	128 cm
Temps de contact:	119 ms	Temps de contact:	150 ms
Réactivité:	3.44	Stiffness:	30 kN/m
Stiffness:	39.1 kN/m	Réactivité:	1.1
		Fréquence:	189 ppm

Sujet:	6	Age	16
Poids:	50.0 kg	Taille:	168 cm
Sexe:	F	Groupe (présence):	Contrôle
TEST Pré-entraînement			
Saut de réactivité (pliométrie)		Runcheck	
N° de saut:	7	Distance:	80 m
		Vitesse:	15 km/h
Hauteur:	30.1 cm	Longueur des pas:	152 cm
Temps de contact:	117 ms	Temps de contact:	136 ms
Réactivité:	4.23	Stiffness:	39 kN/m
Stiffness:	42.6 kN/m	Réactivité:	1.4
		Fréquence:	184 ppm
TEST Post-entraînement			
N° de saut:	7	Distance:	80 m
		Vitesse:	15 km/h
Hauteur:	17.7 cm	Longueur des pas:	137 cm
Temps de contact:	105 ms	Temps de contact:	133 ms
Réactivité:	3.61	Stiffness:	41 kN/m
Stiffness:	63.1 kN/m	Réactivité:	1.5
		Fréquence:	184 ppm

Sujet:	7	Age:	16
Poids:	53.0 kg	Taille:	168 cm
Sexe:	F	Groupe (présence):	Exp.
TEST Pré-entraînement			
Saut de réactivité (pliométrie)		Runcheck	
N° de saut:	7	Distance:	80 m
		Vitesse:	15 km/h
Hauteur:	20.2 cm	Longueur des pas:	168 cm
Temps de contact:	117 ms	Temps de contact:	162 ms
Réactivité:	3.46	Stiffness:	31 kN/m
Stiffness:	56.3 kN/m	Réactivité:	1.2
		Fréquence:	169 ppm
TEST Post-entraînement			
N° de saut:	7	Distance:	80 m
		Vitesse:	15 km/h
Hauteur:	26.8 cm	Longueur des pas:	139 cm
Temps de contact:	130 ms	Temps de contact:	168 ms
Réactivité:	3.61	Stiffness:	30 kN/m
Stiffness:	44.6 kN/m	Réactivité:	1.0
		Fréquence:	177 ppm

Sujet:	8	Age:	17
Poids:	49.0 kg	Taille:	160 cm
Sexe:	F	Groupe (présence):	Exp.
TEST Pré-entraînement			
Saut de réactivité (pliométrie)		Runcheck	
N° de saut:	7	Distance:	80 m
		Vitesse:	15 km/h
Hauteur:	15.7 cm	Longueur des pas:	127 cm
Temps de contact:	119 ms	Temps de contact:	138 ms
Réactivité:	3.0	Stiffness:	38 kN/m
Stiffness:	44.8 kN/m	Réactivité:	1.4
		Fréquence:	183 ppm
TEST Post-entraînement			
N° de saut:	7	Distance:	80 m
		Vitesse:	15 km/h
Hauteur:	17.6 cm	Longueur des pas:	127 cm
Temps de contact:	99.1 ms	Temps de contact:	144 ms
Réactivité:	3.82	Stiffness:	35 kN/m
Stiffness:	67.3 kN/m	Réactivité:	1.3
		Fréquence:	180 ppm

Sujet:	9	Age:	18
Poids:	57.0 kg	Taille:	177 cm
Sexe:	F	Groupe (présence):	Exp.
TEST Pré-entraînement			
Saut de réactivité (pliométrie)		Runcheck	
N° de saut:	7	Distance:	80 m
		Vitesse:	15 km/h
Hauteur:	27.6 cm	Longueur des pas:	125 cm
Temps de contact:	141 ms	Temps de contact:	153 ms
Réactivité:	3.35	Stiffness:	39 kN/m
Stiffness:	23.1 kN/m	Réactivité:	1.1
		Fréquence:	189 ppm
TEST Post-entraînement			
N° de saut:	7	Distance:	80 m
		Vitesse:	15 km/h
Hauteur:	20.8 cm	Longueur des pas:	126 cm
Temps de contact:	109 ms	Temps de contact:	158 ms
Réactivité:	3.78	Stiffness:	36 kN/m
Stiffness:	58.9 kN/m	Réactivité:	1.1
		Fréquence:	184 ppm

Sujet:	10	Age:	17
Poids:	45.0 kg	Taille:	159 cm
Sexe:	F	Groupe (présence):	Exp.
TEST Pré-entraînement			
Saut de réactivité (pliométrie)		Runcheck	
N° de saut:	7	Distance:	80 m
		Vitesse:	15 km/h
Hauteur:	23.2 cm	Longueur des pas:	142 cm
Temps de contact:	140 ms	Temps de contact:	151 ms
Réactivité:	3.11	Stiffness:	30 kN/m
Stiffness:	23.8 kN/m	Réactivité:	1.2
		Fréquence:	184 ppm
TEST Post-entraînement			
N° de saut:	7	Distance:	80 m
		Vitesse:	15 km/h
Hauteur:	25 cm	Longueur des pas:	133 cm
Temps de contact:	121 ms	Temps de contact:	147 ms
Réactivité:	3.73	Stiffness:	32 kN/m
Stiffness:	32.3 kN/m	Réactivité:	1.2
		Fréquence:	186 ppm

Sujet:	11	Age:	17
Poids:	67.0 kg	Taille:	170 cm
Sexe:	F	Groupe (présence):	Exp.
TEST Pré-entraînement			
Saut de réactivité (pliométrie)		Runcheck	
N° de saut:	7	Distance:	80 m
		Vitesse:	15 km/h
Hauteur:	23.0 cm	Longueur des pas:	141 cm
Temps de contact:	153 ms	Temps de contact:	165 ms
Réactivité:	2.82	Stiffness:	39 kN/m
Stiffness:	28.7 kN/m	Réactivité:	1.1
		Fréquence:	177 ppm
TEST Post-entraînement			
N° de saut:	7	Distance:	80 m
		Vitesse:	15 km/h
Hauteur:	22.8 cm	Longueur des pas:	137 cm
Temps de contact:	139 ms	Temps de contact:	132 ms
Réactivité:	3.10	Stiffness:	54 kN/m
Stiffness:	47.1 kN/m	Réactivité:	1.6
		Fréquence:	173 ppm

Sujet:	12	Age:	17
Poids:	56.0 kg	Taille:	175 cm
Sexe:	F	Groupe (présence):	Exp.
TEST Pré-entraînement			
Saut de réactivité (pliométrie)		Runcheck	
N° de saut:	7	Distance:	80 m
		Vitesse:	15 km/h
Hauteur:	13.0 cm	Longueur des pas:	147 cm
Temps de contact:	100 ms	Temps de contact:	164 ms
Réactivité:	3.25	Stiffness:	33 kN/m
Stiffness:	79.9 kN/m	Réactivité:	1.1
		Fréquence:	174 ppm
TEST Post-entraînement			
N° de saut:	7	Distance:	80 m
		Vitesse:	15 km/h
Hauteur:	16.1 cm	Longueur des pas:	127 cm
Temps de contact:	103 ms	Temps de contact:	119 ms
Réactivité:	3.52	Stiffness:	56 kN/m
Stiffness:	68.4 kN/m	Réactivité:	1.6
		Fréquence:	197 ppm

Sujet:	13	Age:	19
Poids:	62.0 kg	Taille:	172 cm
Sexe:	M	Groupe (présence):	Contrôle
TEST Pré-entraînement			
Saut de réactivité (pliométrie)		Runcheck	
N° de saut:	7	Distance:	80 m
		Vitesse:	15 km/h
Hauteur:	35.3 cm	Longueur des pas:	171 cm
Temps de contact:	102 ms	Temps de contact:	137 ms
Réactivité:	5.25	Stiffness:	49 kN/m
Stiffness:	66.2 kN/m	Réactivité:	1.4
		Fréquence:	184 ppm
TEST Post-entraînement			
N° de saut:	7	Distance:	80 m
		Vitesse:	15 km/h
Hauteur:	29.5 cm	Longueur des pas:	144 cm
Temps de contact:	109 ms	Temps de contact:	157 ms
Réactivité:	4.50	Stiffness:	37 kN/m
Stiffness:	62.3 kN/m	Réactivité:	1.3
		Fréquence:	162 ppm

Sujet:	14	Age:	25
Poids:	77.0 kg	Taille:	185 cm
Sexe:	M	Groupe (présence):	Contrôle
TEST Pré-entraînement			
Saut de réactivité (pliométrie)		Runcheck	
N° de saut:	7	Distance:	80 m
		Vitesse:	15 km/h
Hauteur:	29.6 cm	Longueur des pas:	126 cm
Temps de contact:	106 ms	Temps de contact:	196 ms
Réactivité:	4.62	Stiffness:	110 kN/m
Stiffness:	66.8 kN/m	Réactivité:	2.1
		Fréquence:	203 ppm
TEST Post-entraînement			
N° de saut:	7	Distance:	80 m
		Vitesse:	15 km/h
Hauteur:	26.5 cm	Longueur des pas:	148 cm
Temps de contact:	113 ms	Temps de contact:	125 ms
Réactivité:	4.09	Stiffness:	70 kN/m
Stiffness:	45.6 kN/m	Réactivité:	1.6
		Fréquence:	186 ppm

Sujet:	15	Age:	24
Poids:	80.0 kg	Taille:	179 cm
Sexe:	M	Groupe (présence):	Contrôle
TEST Pré-entraînement			
Saut de réactivité (pliométrie)		Runcheck	
N° de saut:	7	Distance:	80 m
		Vitesse:	15 km/h
Hauteur:	25.3 cm	Longueur des pas:	156 cm
Temps de contact:	123 ms	Temps de contact:	162 ms
Réactivité:	3.68	Stiffness:	48 kN/m
Stiffness:	62.5 kN/m	Réactivité:	1.1
		Fréquence:	177 ppm
TEST Post-entraînement			
N° de saut:	7	Distance:	80 m
		Vitesse:	15 km/h
Hauteur:	29.9 cm	Longueur des pas:	165 cm
Temps de contact:	136 ms	Temps de contact:	193 ms
Réactivité:	3.62	Stiffness:	37 kN/m
Stiffness:	50.7 kN/m	Réactivité:	0.9
		Fréquence:	166 ppm

Sujet:	16	Age:	24
Poids:	77.0 kg	Taille:	173 cm
Sexe:	M	Groupe (présence):	Contrôle
TEST Pré-entraînement			
Saut de réactivité (pliométrie)		Runcheck	
N° de saut:	7	Distance:	80 m
		Vitesse:	15 km/h
Hauteur:	27.9 cm	Longueur des pas:	131 cm
Temps de contact:	131 ms	Temps de contact:	153 ms
Réactivité:	3.54	Stiffness:	49 kN/m
Stiffness:	55.1 kN/m	Réactivité:	1.3
		Fréquence:	169 ppm
TEST Post-entraînement			
N° de saut:	7	Distance:	80 m
		Vitesse:	15 km/h
Hauteur:	32.0 cm	Longueur des pas:	150 cm
Temps de contact:	146 ms	Temps de contact:	155 ms
Réactivité:	3.49	Stiffness:	49 kN/m
Stiffness:	37.4 kN/m	Réactivité:	1.3
		Fréquence:	171 ppm

Sujet:	17	Age:	25
Poids:	66.0 kg	Taille:	166 cm
Sexe:	M	Groupe (présence):	Contrôle
TEST Pré-entraînement			
Saut de réactivité (pliométrie)		Runcheck	
N° de saut:	7	Distance:	80 m
		Vitesse:	15 km/h
Hauteur:	23.8 cm	Longueur des pas:	149 cm
Temps de contact:	117 ms	Temps de contact:	146 ms
Réactivité:	3.76	Stiffness:	46 kN/m
Stiffness:	63.7 kN/m	Réactivité:	1.4
		Fréquence:	172 ppm
TEST Post-entraînement			
N° de saut:	7	Distance:	80 m
		Vitesse:	15 km/h
Hauteur:	26.8 cm	Longueur des pas:	148 cm
Temps de contact:	123 ms	Temps de contact:	140 ms
Réactivité:	3.82	Stiffness:	49 kN/m
Stiffness:	61.9 kN/m	Réactivité:	1.5
N° de saut:	7	Fréquence:	173 ppm

Sujet:	18	Age:	23
Poids:	82.0 kg	Taille:	190 cm
Sexe:	M	Groupe (présence):	Contrôle
<u>TEST Pré-entraînement</u>			
Saut de réactivité (pliométrie)		Runcheck	
N° de saut:	7	Distance:	80 m
		Vitesse:	15 km/h
Hauteur:	26.7 cm	Longueur des pas:	133 cm
Temps de contact:	122 ms	Temps de contact:	114 ms
Réactivité:	3.82	Stiffness:	91 kN/m
Stiffness:	73.6 kN/m	Réactivité:	1.6
		Fréquence:	206 ppm
<u>TEST Post-entraînement</u>			
N° de saut:	7	Distance:	80 m
		Vitesse:	15 km/h
Hauteur:	30.4 cm	Longueur des pas:	148 cm
Temps de contact:	125 ms	Temps de contact:	156 ms
Réactivité:	3.97	Stiffness:	51 kN/m
Stiffness:	57.2 kN/m	Réactivité:	1.3
		Fréquence:	156 ppm

Annexe 2: Exercices Myotest

RÉACTIVITÉ

10. Réactivité allégée



20 rebonds enchaînés.

Placez le Myotest sur la ceinture et appuyez sur enter. Au bip sautez le plus haut possible, avec un temps de contact très court. Un appui avec les mains vous permet de ressentir un rebond léger et aérien. Myotest vous donne la réactivité: élevée, moyenne ou faible.

11. Foulées bondissantes



10 foulées enchaînées.

Placez le Myotest sur la ceinture et appuyez sur enter. Au bip démarrez les foulées hautes et longues. Une impression de suspension dans l'air doit être perceptible. Myotest vous donne la réactivité: élevée, moyenne ou faible.

12. Réactivité sur place



10 rebonds enchaînés.

Placez le Myotest sur la ceinture et appuyez sur enter. Au bip sautez le plus haut possible, avec un temps de contact le plus court possible. Les jambes fléchissent très peu. Myotest vous donne la réactivité: élevée, moyenne ou faible.

STIFFNESS

13. Taping

5 secondes.

Placez le Myotest sur la ceinture et appuyez sur enter. Au bip, frappez le plus de fois possible le sol avec les pieds. Au double bip, fin de l'exercice. Myotest compte seulement le temps.

14. Pas de l'oie



10 pas.

Placez le Myotest sur la ceinture et appuyez sur enter, placez-vous. Au bip commencez l'exercice.

Myotest compte les foulées correctement réalisées et signale la fin de l'exercice par un double bip.

15. Rebonds arrière-avant



5 sauts aller-retour enchaînés.

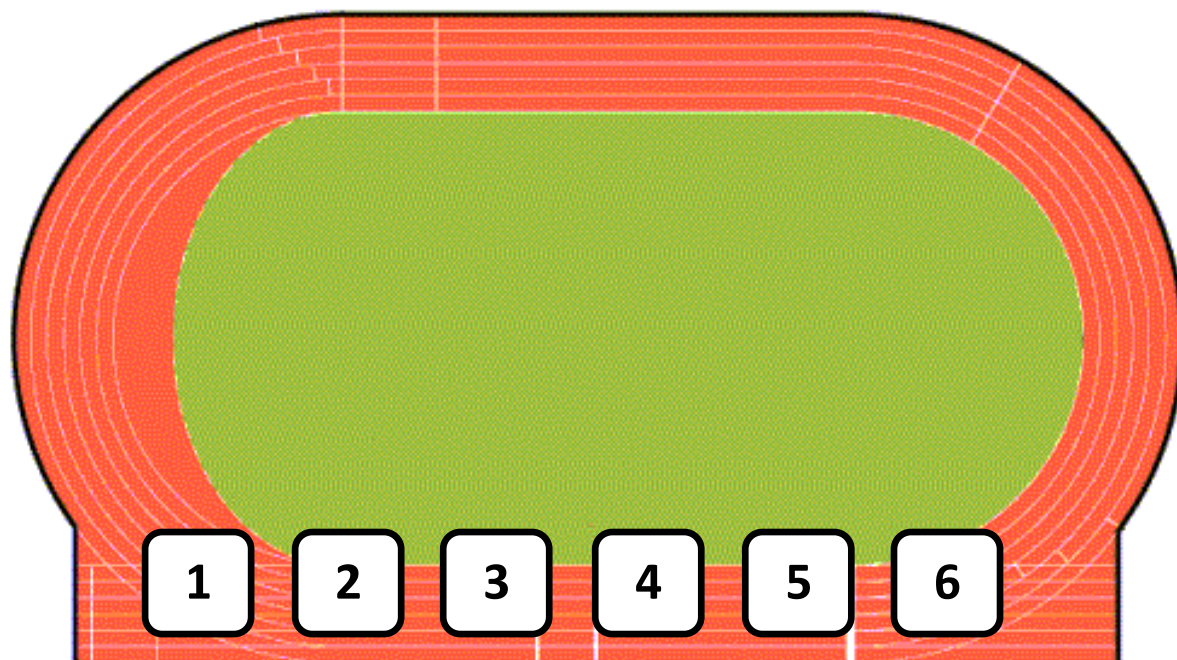
Placez le Myotest sur la ceinture et appuyez sur enter, placez-vous sur la marche. Au bip sauter en arrière en contre bas et rebondissez sur la marche de départ. Les jambes fléchissent très peu. Myotest vous donne le temps de contact: court, moyen ou long.

Annexe 3: Planification du programme d'entraînement

Jours	Cycle	Type d'entraînement
Vendredi 1er mai 2015		Test pré-entraînement
Lundi 4 mai 2015	Cycle 1	Découverte des exercices
Vendredi 8 mai 2015		Intermittent court
Lundi 11 mai 2015		Intermittent long
Vendredi 15 mai 2015		Circuit training
Lundi 18 mai 2015	Cycle 2	Combiné
Vendredi 22 mai 2015		Intermittent court
Lundi 25 mai 2015		Intermittent long
Vendredi 29 mai 2015		Circuit training
Lundi 1er juin 2015		Test post-entraînement

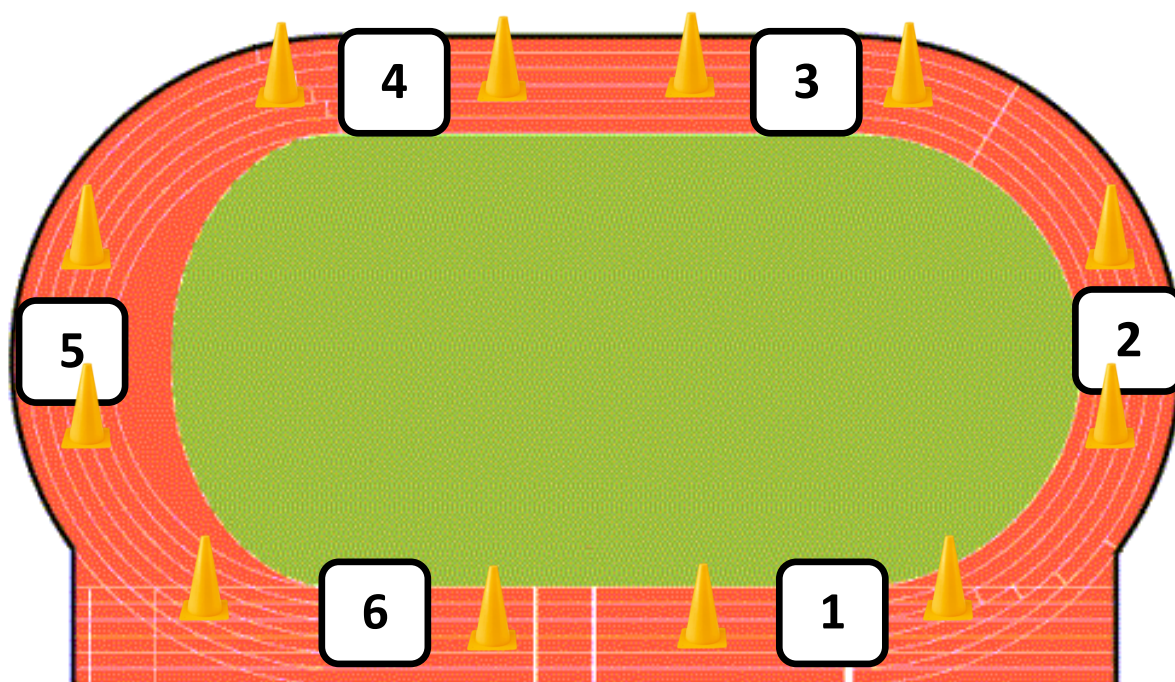
Annexe 4 : Programme d'entraînement pliométrique

Séance 1: découverte des exercices



Exercices	Durée/intensité	Matériel	Illustrations
<u>1. Réactivité allégée</u> Effectuer des rebonds enchainés le plus haut possible, avec un temps de contact au sol le plus court, en s'appuyant sur une barrière. Les jambes fléchissent très peu	5 x 20 rebonds avec 20 sec. de récup.	Barrière	
<u>2. Taping</u> Effectuer des pas avec la cadence la plus élevée possible, sur place	5x 5 sec. avec 15 sec. de récup.	Cerceau	
<u>3. Réactivité sur place</u> Faire des rebonds enchainés le plus haut possible, avec un temps de contact au sol le plus court, sur place. Les jambes fléchissent très peu	5x 10 rebonds avec 20 sec. de récup	Cônes	
<u>4. Pas de l'oie</u> Effectuer des pas les jambes en ciseaux, sans plier le genou, en tirant la pointe du pied vers le haut	5x 10 pas avec récup. active jusqu'à la ligne de départ	Cônes	
<u>5. Foulée bondissante</u> Effectuer des foulées longues et hautes, en ayant l'impression d'être en suspension dans les airs	5x 10 foulées avec récup. active jusqu'à la ligne de départ	Cônes	
<u>6. Rebond arrière-avant</u> Sauter en contrebas et rebondissez le plus vite sur la marche de départ, en fléchissant très peu les jambes	5x 5 aller-retour enchainés avec 20 sec. de récup.	Marche	

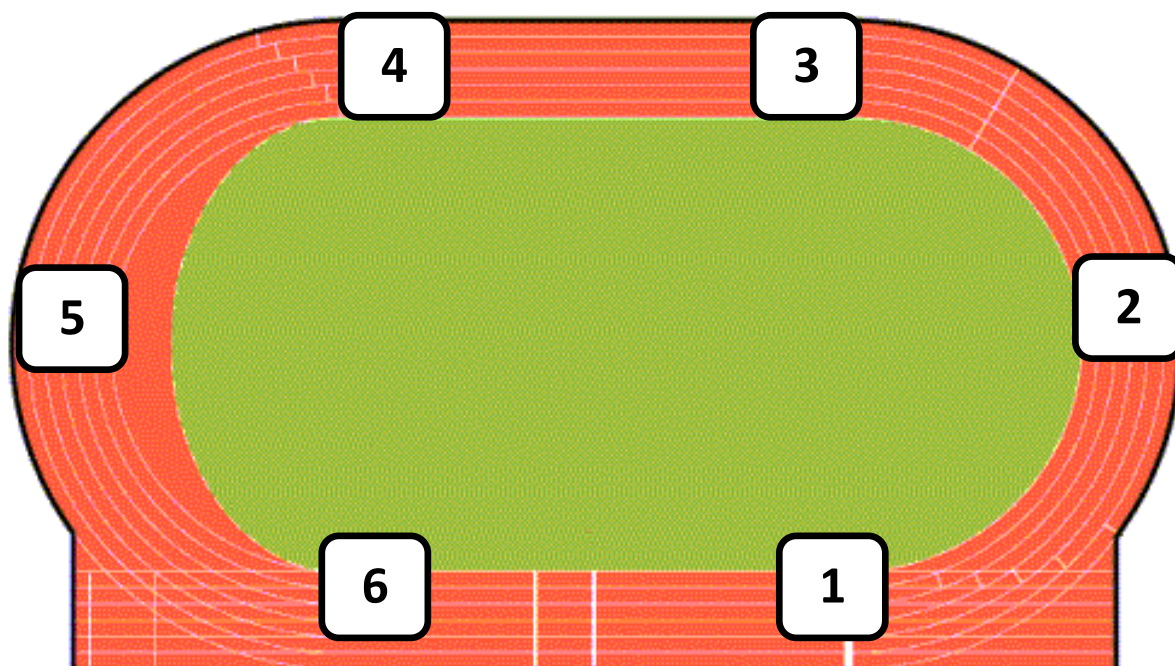
Séance 2-6: intermittent court


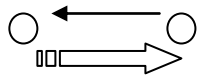
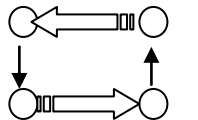
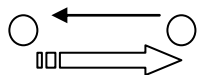
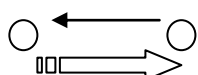



Exercices	Durée/récup.	Matériel	Illustrations
<u>1. Réactivité allégée</u> 10 rebonds de suite	50 sec. avec récup. active en tournant autour du cône	Barrière	
<u>2. Taping</u> Taping avec 2 pas dans chaque case	50 sec. avec récup. active jusqu'au départ	Cerceau	
<u>3. Réactivité sur place</u> 10 rebonds dans un cerceau et on passe au suivant, en carré	50 sec. avec récup. active entre les cerceaux.	Cônes	
<u>4. Pas de l'oie</u> Pas de l'oie entre les cônes	50 sec. avec récup. active jusqu'au départ	Cônes	
<u>5. Foulée bondissante</u> Foulée entre les cônes	50 sec. avec récup. active jusqu'au départ	Cônes	
<u>6. Rebond arrière-avant</u> 5 rebonds arrière-avant avec monté de 3 marche pieds joints	50 sec. avec récup. active jusqu'au départ	Marche	

Sprint (80 % de la vitesse max) entre les postes et faire 2x le circuit

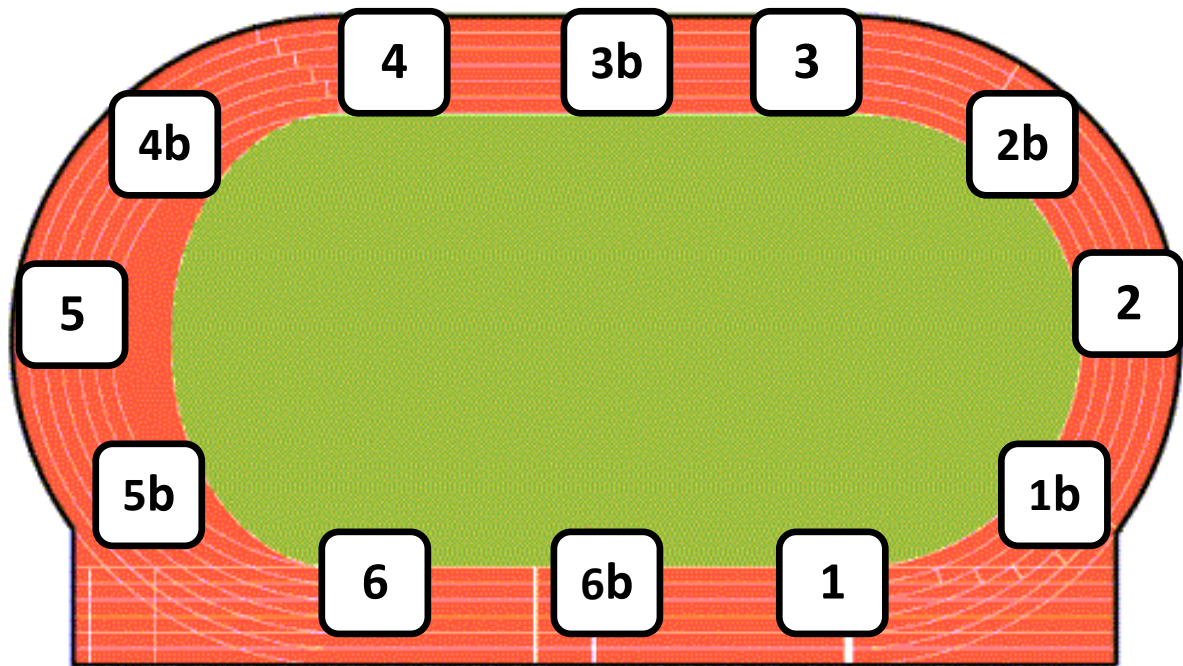
Séance 3-7: intermittent long





Exercices	Durée/récup.	Matériel	Illustrations
<u>1. Réactivité allégée</u> 30 rebonds enchainés	1min.30 avec 10 sec. de récup. passive entre chaque série	Barrière	
<u>2. Taping</u> 10 sec. de taping sur place avec départ en sprint sur 15 m.	1min.30 avec récup. active jusqu'au départ	Cerceau Cône	
<u>3. Réactivité sur place</u> Rebonds en alternant gauche droite par dessus la ligne en avançant, récup sur la largeur et même chose en reculant sur la ligne (travail en carré)	1min.30 avec récup. active sur la largeur	Cônes	
<u>4. Pas de l'oie</u> Pas de l'oie entre les cônes	1min.30 avec récup active jusqu'au départ	Cônes	
<u>5. Foulée bondissante</u> Foulée entre les cônes	1min.30 avec récup. active jusqu'au départ	Cônes	
<u>6. Rebond arrière-avant</u> 10 rebonds arrière-avant enchainés	1min.30 avec 10 sec. de récup. passive entre chaque série	Marche	

Effectuer 1x le circuit, avec un tour de piste à allure moyenne (environ 40% de sa vitesse max) entre chaque exercice.

Séance 4-8: circuit training

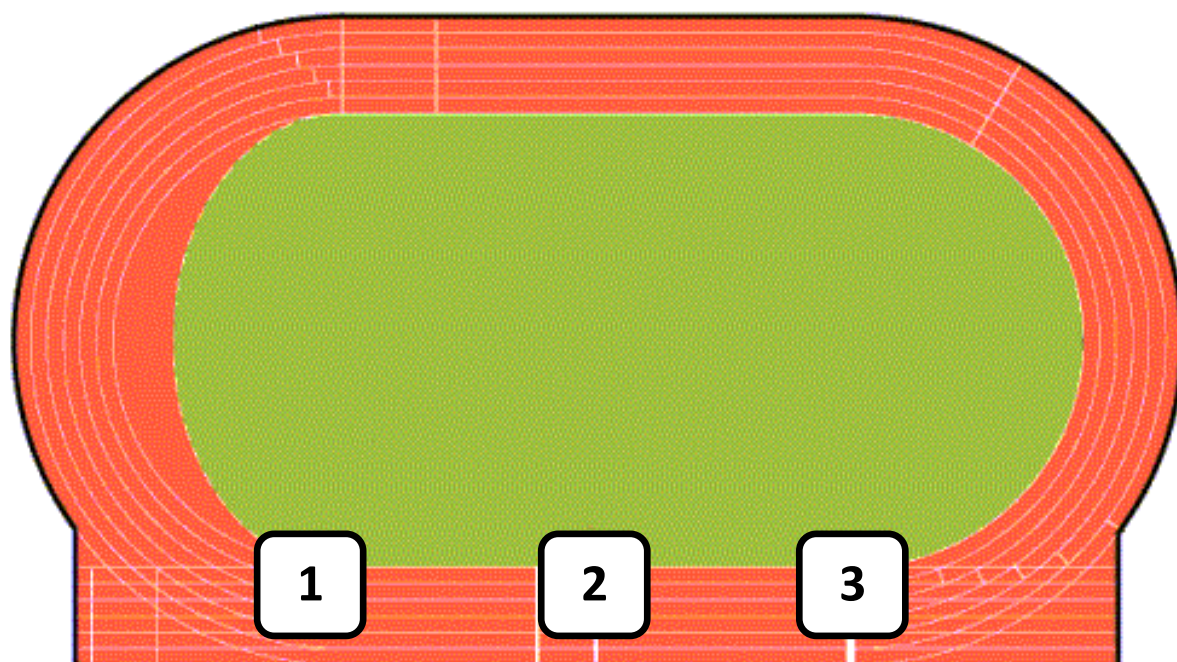


Exercices	Durée/récup.	Matériel	Illustrations
<u>1. Réactivité allégée</u> Rebonds enchainés	15 sec. avec 10 sec. de récup. active en allant au poste suivant	Barrière	
<u>1b. Lunch</u> Effectuer un grand pas en avant en abaissant le genou arrière à angle droit	idem	Cônes	
<u>2. Taping</u> Taping sur place	idem	Cerceau	
<u>2.b Abdominaux</u> Effectuer des abdos droits en gardant les muscles sous tensions	Idem		
<u>3. Réactivité sur place</u> Rebonds sur place	idem		
<u>3.b Squats</u> Effectuer des squats le dos droit, jambes à hauteur des hanches	idem		
<u>4. Pas de l'oie</u> Pas de l'oie entre les cônes	idem	Cônes	
<u>4.b Pas du patineur</u> Effectuer des sauts écartés de gauche à droite en avançant	idem	Cônes	

<u>5. Foulée bondissante</u> Foulée entre les cônes	idem	Cônes	
<u>5.b Fessiers</u> En position de planche, lever alternativement la jambe gauche puis la droite	idem		
<u>6. Rebond arrière-avant</u> Rebonds arrière-avant	idem	Marche	
<u>6.b Sauts sur marche</u> Monter les marches en sautant pieds joints	idem	Marche	

Effectuer 2x le circuit

Séance 5: combiné



Exercices	Durée/récup.	Matériel	Illustrations
<u>1. Réactivité allégée + rebonds arrière-avant</u> 10 rebonds de suite + 5 rebonds arrière-avant	1 min. avec récup. active en tournant autour du cône	Barrière	
<u>2. Réactivité sur place + Pas de l'oie</u> 10 rebonds dans un cerceau + Pas entre les cônes	1 min. avec récup. active jusqu'au départ	Cônes Cerceau	
<u>3. Taping + Foulée bondissante</u> 5 sec. de taping + foulée entre les cônes	1 min. avec récup. active jusqu'au départ	Cônes Cerceau	

Effectuer 4x le circuit 30 sec. de récup entre chaque série

Annexe 4: Répartition de la population

	Sujets	Groupe	Réactivité1	Stiffness1	Réactivité2	Stiffness2
1	Sujet 1	Expérimental	4.29	30	4.63	33
2	Sujet 2	Expérimental	2.89	45	4.29	45
3	Sujet 3	Contrôle	4.08	61	4.57	62
4	Sujet 4	Expérimental	3.38	34	3.42	34
5	Sujet 5	Expérimental	2.86	25	3.44	30
6	Sujet 6	Contrôle	4.23	39	3.61	41
7	Sujet 7	Expérimental	3.46	31	3.61	30
8	Sujet 8	Expérimental	3.00	38	3.82	35
9	Sujet 9	Expérimental	3.35	39	3.78	3
10	Sujet 10	Expérimental	3.11	30	3.73	32
11	Sujet 11	Expérimental	2.82	39	3.10	54
12	Sujet 12	Expérimental	3.25	33	3.52	56
13	Sujet 13	Contrôle	5.25	49	4.50	37
14	Sujet 14	Contrôle	4.62	110	4.09	70
15	Sujet 15	Contrôle	3.68	48	3.62	37
16	Sujet 16	Contrôle	3.54	49	3.49	49
17	Sujet 17	Contrôle	3.76	46	3.82	49
18	Sujet 18	Contrôle	3.82	91	3.97	51

Annexe 5: Analyse statistique

Test paramétrique pour analyser la normalité de la distribution de la réactivité du groupe contrôle

```
> writelines("SKEWNESS KURTOSIS NORMALITY")
SKEWNESS KURTOSIS NORMALITY
> print(stat.desc(cbind(mydatawide2$RéactivitéContrPré,mydatawide2$RéactivitéContrPost),basic=FALSE,norm=TRUE))
```

	v1	v2
median	3.9500000	3.8950000
mean	4.1225000	3.9587500
SE.mean	0.2022264	0.1438804
CI.mean.0.95	0.4781896	0.3402230
var	0.3271643	0.1656125
std.dev	0.5719828	0.4069552
coef.var	0.1387466	0.1027989
skewness	0.8002597	0.3750997
skew.2SE	0.5320158	0.2493678
kurtosis	-0.8318156	-1.6221606
kurt.2SE	-0.2808517	-0.5477014
normtest.w	0.8916204	0.9075936
normtest.p	0.2422755	0.3374291

Levene test pour définir l'homogénéité des variances du groupe contrôle

```
> writeLines("LEVENE:")
LEVENE:
> print(leveneTest(mydata$long2$value,mydata$long2$variable,center=
r=median))
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
      Df F value Pr(>F)
group  1  0.3757 0.5497
      14
```

Test paramétrique pour analyser la normalité de la distribution de la réactivité du groupe expérimental

```
> writeLines("SKEWNESS KURTOSIS NORMALITY")
SKEWNESS KURTOSIS NORMALITY
> print(stat.desc(cbind(mydata$wide$RéactivitéExpPré,mydata$wide$
RéactivitéExpPost),basic=FALSE,norm=TRUE))
      V1      V2
median  3.18000000 3.67000000
mean    3.24100000 3.73400000
SE.mean 0.13745666 0.1402236
CI.mean.0.95 0.31094857 0.3172079
var      0.18894333 0.1966267
std.dev  0.43467612 0.4434261
coef.var 0.13411790 0.1187536
skewness 1.19250163 0.6526226
skew.2SE 0.86785090 0.4749504
kurtosis 0.59956460 -0.6172175
kurt.2SE 0.22468246 -0.2312978
normtest.w 0.83887733 0.9289889
normtest.p 0.04277821 0.4380214
```

Levene test pour définir l'homogénéité des variances du groupe expérimental

```
> writeLines("LEVENE:")
LEVENE:
> print(leveneTest(mydata$long$value,mydata$long$variable,center=
median))
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
      Df F value Pr(>F)
group  1  0.0067 0.9356
      18
```

Test paramétrique pour analyser la normalité de la distribution de la stiffness du groupe contrôle

```
> writelines("SKEWNESS KURTOSIS NORMALITY")
SKEWNESS KURTOSIS NORMALITY
> print(stat.desc(cbind(mydatawide2$StiffnessContrPré,mydatawide2$StiffnessContrPost),basic=FALSE,norm=TRUE))
```

	V1	V2
median	49.00000000	49.00000000
mean	61.62500000	49.50000000
SE.mean	8.92816070	4.1490102
CI.mean.0.95	21.11174532	9.8108502
var	637.69642857	137.7142857
std.dev	25.25265191	11.7351730
coef.var	0.40977934	0.2370742
skewness	0.90509123	0.4680246
skew.2SE	0.60170822	0.3111446
kurtosis	-0.96273251	-1.3187814
kurt.2SE	-0.32505409	-0.4452694
normtest.w	0.79227269	0.9104571
normtest.p	0.02364764	0.3572934

Levene test pour définir l'homogénéité des variances du groupe contrôle

```
> writelines("LEVENE:")
LEVENE:
> print(leveneTest(mydataalong2$value,mydataalong2$variable,center=median))
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
      Df F value Pr(>F)
group 1  0.8045 0.3849
      14
```

Test paramétrique pour analyser la normalité de la distribution de la stiffness du groupe expérimental

```
> writelines("SKEWNESS KURTOSIS NORMALITY")
SKEWNESS KURTOSIS NORMALITY
> print(stat.desc(cbind(mydatawide$StiffnessExpPré,mydatawide$StiffnessExpPost),basic=FALSE,norm=TRUE))
```

	V1	V2
median	33.50000000	34.50000000
mean	34.40000000	38.50000000
SE.mean	1.8511258	3.0632227
CI.mean.0.95	4.1875375	6.9294912
var	34.2666667	93.8333333
std.dev	5.8537737	9.6867607
coef.var	0.1701678	0.2516042
skewness	0.1940682	0.8294267
skew.2SE	0.1412344	0.6036208
kurtosis	-1.0937875	-1.1029026
kurt.2SE	-0.4098889	-0.4133047
normtest.w	0.9664021	0.8008962
normtest.p	0.8556308	0.0148667

Levene test pour définir l'homogénéité des variances du groupe expérimental

```
> writeLines("LEVENE:")
LEVENE:
> print(leveneTest(mydata$long$value,mydata$long$variable,center=
median))
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
      Df F value Pr(>F)
group 1  0.6009 0.4483
      18
```

Annexe 6: Résultats statistiques

"PAIRED-T-TEST" de la raideur du groupe contrôle (p-value = 0.1006)

```
T-TEST:
> myTTest2=t.test(StiffnessContrPré,StiffnessContrPost,paired=T
RUE)
> print(myTTest2)

      Paired t-test

data:  StiffnessContrPré and StiffnessContrPost
t = 1.8908, df = 7, p-value = 0.1006
alternative hypothesis: true difference in means is not equal t
o 0
95 percent confidence interval:
 -3.038635 27.288635
sample estimates:
mean of the differences
      12.125
```

"PAIRED-T-TEST" de la réactivité du groupe contrôle (p-value = 0.3156)

```
T-TEST:
> myTTest2=t.test(RéactivitéContrPré,RéactivitéContrPost,paired
=TRUE)
> print(myTTest2)

      Paired t-test

data:  RéactivitéContrPré and RéactivitéContrPost
t = 1.0807, df = 7, p-value = 0.3156
alternative hypothesis: true difference in means is not equal t
o 0
95 percent confidence interval:
 -0.194527  0.522027
sample estimates:
mean of the differences
      0.16375
```

"PAIRED-T-TEST" de la raideur du groupe expérimentale (p-value = 0.1594)

```
T-TEST:
> myTTest=t.test(StiffnessExpPré,StiffnessExpPost,paired=TRUE)
> print(myTTest)

        Paired t-test

data:  StiffnessExpPré and StiffnessExpPost
t = -1.534, df = 9, p-value = 0.1594
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -10.146071  1.946071
sample estimates:
mean of the differences
              -4.1
```

"WILCOXON-TEST" de la réactivité du groupe expérimentale (p-value = 0.001953)

```
WILCOX:
> wilcox=wilcox.test(RéactivitéExpPré,RéactivitéExpPost,paired=
TRUE)
> print(wilcox)

        wilcoxon signed rank test

data:  RéactivitéExpPré and RéactivitéExpPost
V = 0, p-value = 0.001953
alternative hypothesis: true location shift is not equal to 0
```