



Master STAPS

Faculté des Sciences du Sport de Dijon

Entraînement et Optimisation de la Performance Sportive

Année universitaire : 2018-2019

Mémoire recherche

Quelle méthode de musculation privilégier afin d'optimiser
les gains de force et de puissance, dans le cadre des
entraînements combinés ?

Rédigé par :

Geoffrey BAUMGARTEN

Sous la tutelle de :

Nicolas BABAULT

Table des matières

I. Introduction	5
II. Cadre théorique	6
1. Problématique des entraînements combinés	6
2. Les mécanismes	7
3. Stratégies de réduction des interférences	15
4. Objectif et Hypothèses	21
III. Matériel et méthode	23
1. Sujets	23
2. Conception de l'étude	23
3. Protocole	24
4. Entraînements	27
5. Mesures	29
6. Analyse statistique.....	29
IV. Résultats	30
1. Force maximale	31
2. Puissance maximale.....	31
3. Données anthropométriques	32
V. Discussion	33
VI. Références	38

I. Introduction

L'amélioration des qualités physiques des sportifs dépend du type d'entraînement réalisé. Deux grands types d'entraînements physiques peuvent être cités, l'entraînement d'endurance et l'entraînement de force. Nommés de cette manière, diverses compréhensions sont possibles. En effet, l'endurance peut se définir comme la capacité de résister à la fatigue. Ainsi, un travail nommé entraînement d'endurance peut représenter un effort de plusieurs heures à basse intensité ou encore la réalisation d'une série de vingt répétitions en musculation. Pour la force, le principe est semblable, de quelle force parlons-nous réellement ? Dans le cadre des entraînements combinés, définis comme le couplage d'entraînements de force et d'endurance dans le même programme d'entraînement, on se rend compte que la définition des termes varie (Docherty, 2000). Ainsi, une étude traitant des entraînements combinés peut définir la force sur l'aspect puissance maximale et l'endurance fondamentale alors qu'une autre s'intéressera à la force maximale et à la vitesse maximale aérobie (VMA). Une définition plus complète des entraînements combinés pourrait donc être le couplage d'entraînements de force (pour renforcer la force, l'hypertrophie et/ou la puissance) et d'endurance (pour améliorer le potentiel aérobie) et ce, dans un même programme (Wilson, 2012 ; Hawley, 2009).

Diverses définitions indiquent que les protocoles expérimentaux sont très variés. L'espacement entre les séances, l'ordre des séances, le volume d'exercice et leur intensité sont des éléments clés dans l'optimisation des gains de force. En effet, nos recherches s'intéressent à l'optimisation des gains de force au cours des entraînements combinés. Le contenu des séances de musculation est toujours décrit dans les protocoles expérimentaux, il est donc chose aisée de ressortir les méthodes utilisées dans les études. Cependant, nous ne pouvons pas réellement comparer des méthodes qui n'ont pas été réalisées dans la même étude, il y aurait trop de biais. Nous nous sommes donc demandé s'il existait une méthode de musculation permettant d'optimiser les gains de force ou de puissance car aucune étude ne compare réellement deux méthodologies de musculation.

II. Cadre théorique

Ce cadre théorique est composé de quatre parties. Une première partie décrit la problématique des entraînements combinés. La deuxième partie s'intéresse aux mécanismes responsables des interférences dans le cadre des entraînements combinés. Cette partie est assez générale et permet de bien cerner les origines des interférences. La troisième partie énonce des stratégies de réduction des interférences puis aborde notre problématique. La dernière partie correspond au développement de nos hypothèses en rapport à notre problématique.

1. Problématique des entraînements combinés

Très peu de sports demandent uniquement des qualités de force ou uniquement des qualités aérobies (Baar, 2014). Hormis les courses sur route longue distance ou l'haltérophilie, la plupart des sports sont un mélange de ces deux qualités (Baar, 2014). Il s'agit donc de travailler les deux qualités dans la même journée ou la même semaine. Pourtant, ces deux qualités peuvent bien sembler opposées dans l'entraînement (Hickson, 1980 ; Dudley, 1985 ; Kraemer, 1995). En effet, les adaptations physiologiques sont différentes pour les deux qualités (Bottinelli, 2000). Il existe très peu de point commun concernant les adaptations à l'entraînement de force et à l'entraînement d'endurance. Par ailleurs, des études ont rapporté que l'entraînement simultané d'endurance et de musculation, comparé à l'entraînement en musculation seul, conduit à une réduction des gains de force maximale (Dolezal, 1998 ; Hickson, 1980 ; Kraemer, 1995), d'hypertrophie musculaire (Hickson, 1980 ; Kraemer, 1995), et de puissance maximale (Kraemer 1995). D'autres études suggèrent que l'entraînement combiné améliorerait la force ou l'endurance ou même les deux qualités simultanément (Bell, 1991, Izquierdo, 2005 ; Losnegard, 2010). Cependant, les adaptations à l'entraînement d'endurance semblent ne pas interférer avec le travail de force. Il existerait donc des stratégies d'entraînements permettant d'optimiser les gains de force lors du couplage de la force et de l'endurance dans l'entraînement sportif (Baar, 2014).

Des variables d'entraînement telles que l'ordre, le volume, l'intensité, la fréquence, les types d'exercices, le temps de récupération entre les sessions, les groupes musculaires mis en jeu lors des séances ou encore la

nutrition peuvent influencer les gains en force. L'amélioration des qualités physiques grâce aux entraînements combinés serait donc multifactorielle, ce qui signifie qu'aucune recette applicable chez tous les sportifs n'existe. Les entraîneurs et préparateurs physiques devront jouer sur plusieurs variables de l'entraînement afin d'optimiser les gains de force.

Abordons, en premier lieu, les mécanismes responsables des interférences entre le travail de force et d'aérobie.

2. Les mécanismes

Cette partie décrit trois mécanismes importants qui pourraient être responsables de l'opposition de la force et de l'endurance dans l'entraînement. Le premier est le mécanisme cellulaire. Nous y regroupons la typologie myofibrillaire et l'aspect nerveux. Le second mécanisme intervient au niveau moléculaire. Le dernier mécanisme qui pourrait être responsable de la réduction des gains de force lors d'un entraînement combiné est celui de la fatigue.

a) Au niveau cellulaire

Le muscle squelettique humain est composé d'une variété de fibres possédant des particularités bien propres à chacune. Leur recrutement sélectif permet aux muscles de remplir des actions bien spécifiques. En effet, les fibres rapides sembleraient pouvoir se contracter trois fois plus rapidement que les fibres musculaires à contraction lente (Close, 1972).

(1) Adaptations à l'entraînement de force

Certaines propriétés musculaires sont déterminées génétiquement dès les premiers stades de développement de l'individu, telles que la structure anatomique des muscles, l'orientation des fascicules ou encore les insertions tendineuses et aponévrotiques (Blaauw, 2013). Dans le contexte de la plasticité musculaire, la fibre et son environnement semblent s'adapter (Fluck, 2003). Des données provenant de modèles de rongeurs indiquent que la plasticité du muscle squelettique implique une réponse des fibres et des structures associées (nerfs et capillaires) (Chopard, 2001 ; Frenette, 1998 ; Tyml, 2001 ; Deschenes, 2001).

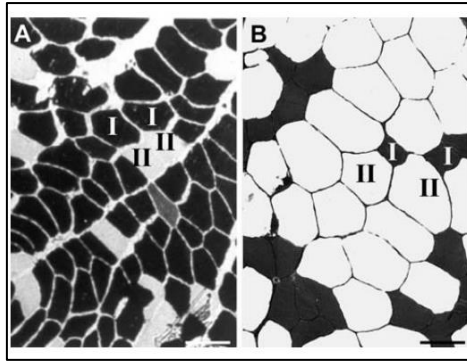


Figure 1 : La plasticité des types de fibres du muscle squelettique humain. Images histochimiques montrant les adaptations des types de fibres chez l'homme dans le muscle vaste latéral suite à des entraînements d'endurance (A) et suite à des entraînements de force (B). Les fibres lentes (I) et rapides (II) y sont indiquées (Fluck, 2003)

D'autres propriétés du muscle squelettique sont à aborder ensuite. Les propriétés de force-vitesse, la vitesse maximale de raccourcissement et la puissance maximale (Bottinelli, 2000). Sur la Figure 2, nous pouvons constater que la vitesse maximale de raccourcissement varie selon le type de fibre (Bottinelli, 2000). Des auteurs nous confirment que la puissance maximale des fibres de type I est environ dix fois inférieure à celles des fibres IIx, les fibres IIa étant intermédiaires (Bottinelli, 1996 ; Widrick, 2002).

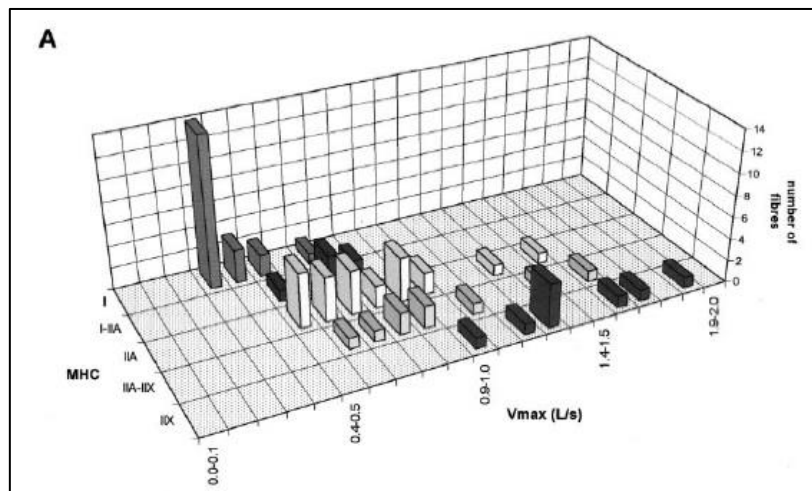


Figure 2 : Distribution de la vitesse de raccourcissement maximale (V_{max}) dans une population de 67 fibres musculaires squelettiques humaines. Les fibres sont regroupées sur la base de leur composition en isoformes de la chaîne lourde de la myosine (MHC) (Bollinetti 2000 d'après Bollinetti 1996).

En utilisant un exercice à haute intensité avec peu de répétition (type force maximale), les muscles squelettiques humains montrent des gains de force importants dus à la fois à des adaptations neuronales et à une augmentation de la surface transversale du muscle (Sale, 1988).

Par ailleurs, les protocoles d'entraînement de musculation entraînent généralement une diminution du pourcentage de fibres de type IIx (Andersen, 2000, Adams, 1993 ; Andersen, 1994b ; Klitgaard, 1990). Ceci est confirmé par des auteurs dans une étude s'étalant sur 12 semaines d'entraînements en musculation (Andersen, 2000). Dans leur étude, les fibres de type IIx sont passés d'environ 9% à 2%, tandis que la teneur en chaînes lourdes de la myosine IIa est passée de 42% à 49% (Andersen, 2000). Dans cette étude, une augmentation significative de la surface de section transversale des fibres de type II a été observée post entraînements, parallèlement à une augmentation de la force maximale isométrique du quadriceps (Andersen, 2000).

Comme introduit plus haut, les adaptations à l'entraînement de force se retrouvent aussi au niveau nerveux. Des auteurs ont analysé les muscles inter-osseux dorsaux de la main chez sept haltérophiles et sept sujets témoins. Leurs observations démontrent que les haltérophiles possèdent un taux important de synchronisation des unités motrices (Milner-Brown, 1975). Puis, ces mêmes auteurs ont vérifié que ces synchronisations étaient un résultat direct de l'entraînement et non une prédisposition génétique. Pour cela, ils ont analysé quatre sujets avant et après 6 semaines de pratique d'un entraînement spécifique impliquant le premier muscle inter-osseux dorsal de la main (Milner-Brown, 1975). Cet exercice a entraîné une augmentation significative du niveau de synchronisation des unités motrices chez ces sujets. Ces données suggèrent que la synchronisation des unités motrices observée chez les haltérophiles est le résultat direct de l'entraînement et n'est pas due à des différences physiologiques qui pourraient les distinguer de la population en général (Milner-Brown, 1975).

Les haltérophiles effectuent fréquemment des tâches balistiques (épaulé, arraché) qui nécessitent à la fois des forces élevées et des vitesses élevées (explosivité). Les unités motrices contenant des fibres de type II sont donc ciblées. Sur la base de l'ordre de recrutement des fibres (Henneman, 1965), les haltérophiles recrutent probablement des unités motrices contenant à la fois des fibres de type I et de type II, permettant ainsi aux deux types d'unités motrices d'être entraînés (Suchomel, 2018).

(2) Adaptations à l'entraînement aérobie

L'entraînement en endurance vise à prolonger la durée d'un exercice. Les protocoles sont généralement basés sur un volume d'activité élevé et d'une intensité modérée. Cependant, le travail à haute intensité tel que l'entraînement intermittent semble aussi très efficace (Assadi, 2012).

En utilisant une approche morphométrique sur des fibres musculaires de types histochimiques, des auteurs (Howald, 1985) ont démontré qu'un programme d'entraînement en endurance sur ergo-cycle d'une durée de six semaines entraîne une augmentation de la densité volumique de la mitochondrie dans les trois types de fibres, l'augmentation étant plus importante dans les fibres de type IIa que dans les fibres de type I et de type IIx (Howald, 1985). Cette conclusion peut sembler surprenante car on ne s'attendait pas à ce que les fibres de type IIx soient recrutées dans un exercice de type endurance à basse intensité ni que les fibres IIa s'adaptent d'avantage que les fibres I (Fluck, 2003). Des données similaires sont observées dans une étude (figure 3, Howald, 1985). De plus, un certain nombre d'études transversales comparant des sujets sédentaires à des sportifs bien entraînés ont montré que les meilleurs coureurs de longue distance, cyclistes, rameurs ou skieurs de fond, présentent un pourcentage élevé de fibres de type I dans leur vaste latéral, leur gastrocnémiens et leurs deltoïdes (Burke, 1976 ; Costill, 1976 ; Gollnick, 1972 ; Ingjer, 1979 ; Saltin, 1977). Ces données sont confirmées ailleurs, précisant que les coureurs de marathon de haut-niveau se montrent fortement prédisposés à l'expression des chaînes lourdes de la myosine de type I (Andersen, 2000). En effet, 80% à 90% des fibres musculaires sont composés de chaînes lourdes de la myosine de type I, le reste étant des chaînes de type IIa (Andersen, 2000). Dans le contexte de ces observations, il a été démontré chez l'homme qu'une courte période d'entraînement intense en endurance induisait le passage des isoformes rapides des chaînes lourdes de la myosine à la variété lente dans les fibres du muscle vaste latéral (Schaub, 1989). Toutes ces données sont confirmées dans un rapport de chercheurs démontrant qu'un exercice sur ergo-cycle de sept jours induisait une diminution significative de l'ARNm des chaînes lourdes de la myosine de type IIx (O'Neill, 1999).

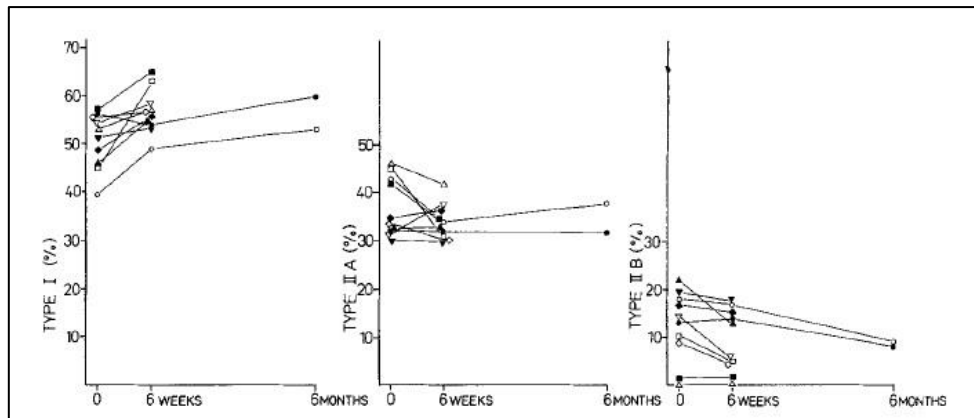


Figure 3 : Changements dans la répartition des types de fibres après 6 semaines (10 sujets) et 6 mois (2 sujets) d'entraînement en endurance. Les symboles ouverts représentent des femmes, les symboles fermés représentent des sujets masculins (Howald, 1985).

Les auteurs de la figure 3 ajoute que les adaptations des fibres à l'exercice d'endurance semblent être assez locales (Howald, 1985). En effet, des coureurs de marathon et des athlètes d'ultra-endurance de classe mondiale semblent posséder un nombre de fibres remarquablement élevé dans leurs groupes musculaires entraînés (Andersen, 2000; Ricoy, 1998).

(3) Adaptations aux entraînements combinés

Des adaptations myofibrillaires sont observables suites à des entraînements combinés. En effet, après six semaines d'entraînements combinés, l'activité de la succinate déhydrogenase semble être plus faible pour les fibres de type IIx chez le rat (Furrer, 2013). A l'inverse de ce résultat, l'activité de cette même enzyme dans les fibres de type I est plus importante à la suite des six semaines d'entraînements combinés (Furrer, 2013). Ces données n'étant pas reliées à une diminution de transcription de l'ARN messager, la synthèse protéique n'est pas altérée (Furrer, 2013). Egalement, aucune augmentation de l'aire de section transversale des fibres du muscle vaste latéral n'est observée après huit semaines d'entraînements combinés chez des hommes actifs (De Souza, 2014). Par ailleurs, des chercheurs constatent une augmentation de la coupe transversale du vaste latéral après 21 semaines d'entraînements combinés (Hakkinen, 2003). Cette différence est certainement due à la durée des protocoles (8 semaines contre 21). Egalement, pas de changement dans la proportion des fibres musculaires. D'autres études obtiennent des résultats positifs sur l'hypertrophie musculaire du vaste latéral de la cuisse (Tsitkanou, 2017 ; Hakkinen, 2003). Cette hypertrophie étant moins marquée pour le groupe entraînements combinés à la fin de deux mois de

protocole. Le pourcentage de répartition des fibres ne semble pas être modifié de façon significative à la suite de 21 semaines d'entraînements combinés (Hakkinen, 2003). Cependant, les fibres de type IIx auraient tendance à diminuer dans ce groupe.

Abordons ensuite les mécanismes moléculaires pouvant être responsables des interférences entre le travail de force et d'aérobie.

b) Au niveau moléculaire

(1) Adaptation à l'entraînement de force

L'augmentation de la masse musculaire squelettique consécutive à l'augmentation de la charge est en corrélation avec l'augmentation de la synthèse des protéines (Goldberg, 1964). Cela suggère que le contrôle de la synthèse des protéines pourrait jouer un rôle important dans la régulation de la masse musculaire induite par la charge. Trois protéines clés sont exprimées dans tous les types de cellules (Mathews, 1996):

- eIF-2
- 4E-BP
- p70S6k

La protéine eIF-2 semble réguler la synthèse générale des protéines, alors que 4E-BP et p70S6k semblent contrôler la synthèse des protéines liées à la croissance (Mendez, 1997). L'importance fonctionnelle de l'activation de p70S6k dans différents types de cellules a été démontrée en utilisant des anticorps et des agents pharmacologiques afin de bloquer spécifiquement son activité. Le traitement des fibroblastes avec un anticorps anti-p70S6k élimine 90% de l'augmentation de la synthèse protéique après stimulation du sérum (Lane, 1993). Ces données suggèrent que la phosphorylation (activation) de p70S6k est essentielle pour augmenter la synthèse protéique cellulaire (Baar, 1999).

Des études ont montré que pour l'hypertrophie musculaire suite à un entraînement de force, la molécule de signalisation clé est la cible de la rapamycine chez les mammifères (mechanistic target of rapamycin : mTOR). mTOR est une protéine kinase. Après l'exercice de résistance, il y a une augmentation significative et soutenue de l'activité de mTOR (Baar, 1999). La première indication que cette augmentation de l'activité de

mTOR est importante pour l'hypertrophie musculaire provient d'une étude qui a montré que l'activité de mTOR six heures après l'exercice de musculation était corrélée à l'augmentation de la masse musculaire à la suite de six semaines d'entraînement (Baar, 2014). Cette découverte chez les rats a depuis été démontrée chez l'homme (Terzis, 2008), suggérant que l'activation de mTOR est la clé pour augmenter la masse et la force musculaire.

Dans de nombreuses cellules, mTOR est activée par des facteurs de croissance pour stimuler la synthèse protéique (Sengupta, 2010). Dans les heures qui suivent l'exercice de musculation, il y a aussi une augmentation du taux d'absorption d'acides aminés du sang dans le muscle (Baar, 1999). En effet, le taux de leucine et de glutamine augmente dans le muscle ayant travaillé (MacKenzie, 2009 ; Biolo, 1995). Cette augmentation de la leucine dans le muscle est probablement le résultat d'une augmentation de l'ARN messager (Churchward, 2012). À mesure que la leucine pénètre dans le muscle, elle déclenche la synthèse des protéines en grande partie grâce à sa capacité à activer mTOR (Crozier, 2005). Ce processus moléculaire complexe explique l'activation de mTOR dépendante de la charge sur la synthèse protéique et donc sur l'hypertrophie musculaire (Kim, 2008 ; Tipton, 1999).

(2) Adaptations à l'entraînement d'endurance

Alors que la réponse de l'hypertrophie musculaire à l'exercice de musculation semble converger vers un seul complexe protéique (mTOR), les adaptations à l'entraînement d'endurance sont le résultat d'une variété de signaux métaboliques et moléculaires (Baar, 2014). En même temps, des modifications systémiques des hormones, telles que les catécholamines, peuvent influencer les adaptations musculaires. Ces signaux métaboliques et hormonaux activent les protéines de signalisation dans le muscle. Uniquement s'ils sont répétés à une fréquence suffisante, ils conduisent à une augmentation de la masse mitochondriale, à une amélioration de l'oxydation des graisses et du glucose et à une augmentation de la densité capillaire (Baar, 2014). La diminution de l'adénosine triphosphate (ATP) et du glycogène puis l'augmentation de l'adénosine diphosphate (ADP) et de l'adénosine monophosphate (AMP) lors de l'exercice d'endurance à haute intensité, activent la protéine kinase activée par l'AMP (AMPk). L'AMPk actif est impliqué dans l'augmentation de

l'oxydation des graisses pendant l'effort (Winder, 1996) et joue également un rôle dans la régulation à long terme de la masse mitochondriale (Hardie, 2012). D'ailleurs, puisque toutes ces molécules de signalisation sont activées par l'exercice d'endurance, il est possible qu'une ou plusieurs d'entre elles puissent simultanément inhiber l'activation de mTOR et limiter l'hypertrophie du muscle squelettique au cours d'un entraînement combiné.

(3) Adaptations aux entraînements combinés

L'amélioration du niveau de force musculaire, l'augmentation de l'activation neurale, la taille des fibres musculaire et la raideur du tissu conjonctif sont modifiables avec l'entraînement de force et d'endurance. Par conséquent, l'exercice d'endurance combiné pourrait diminuer les adaptations de tous ces paramètres physiologiques (Baar, 2014). Ainsi, l'effet principal de l'exercice d'endurance semble être une diminution de l'hypertrophie musculaire induite par l'exercice de force (Baar, 2014).

Un mécanisme moléculaire qui pourrait expliquer la nuisance de l'exercice d'endurance dans un but d'hypertrophie musculaire au cours d'un entraînement combiné est le stress métabolique, qui bloquerait l'activité de mTOR (Inoki, 2003). La molécule AMPk semblerait être nécessaire dans l'inhibition du stress métabolique sur mTOR (Inoki, 2003). Par ailleurs, des chercheurs ont montré qu'une altération de la croissance musculaire était observée chez les rats où l'activité de l'AMPk était la plus élevée, soutenant l'hypothèse que l'AMPk était responsable de l'effet d'interférence (Thomson, 2005). Même si les études animales ont été impressionnantes en montrant que l'AMPk pouvait inhiber directement l'activité de mTOR et la croissance musculaire, les études aiguës chez les humains ne sont pas aussi définitives (Baar, 2014).

D'autres chercheurs non pas observés d'interférences sur mTOR à la suite d'une séance d'hypertrophie musculaire en salle de musculation enchainé avec 30 minutes de pédalage à 70% du VO₂max (Apro, 2013). Les raisons de ces résultats ne sont pas évidentes à expliquer, allant à l'encontre d'autres recherches utilisant un format de protocole similaire (Chen, 2003 ; Wang, 2011).

Abordons ensuite le dernier mécanisme responsable des interférences, la fatigue.

c) Au niveau de la fatigue

La fatigue est définie comme la diminution de performance musculaire pendant et après des contractions répétitives (Enoka, 1992). La fatigue se révèle dépendante de la tâche (Enoka, 1992) et est généralement considérée comme apparaissant par l'intermédiaire de deux mécanismes principaux. La fatigue centrale se produit à proximité des axones moteurs et conduit à des diminutions d'activation des unités motrices (Babault, 2005). La fatigue périphérique est localisée dans le muscle lui-même, avec des composants également liés à la jonction neuromusculaire ou aux branches terminales des axones moteurs (Babault, 2005).

Lorsque l'objectif est le développement des performances neuromusculaires, il semblerait que réaliser la séance de musculation avant la séance aérobie permettrait de meilleurs gains (Küüsmäa-Schildt, 2017 ; Cadore, 2012). Cet effet d'ordre serait corrélé au niveau de fatigue. En effet, la fatigue accumulée lors de la session aérobie avant une session de musculation prédispose le sujet à un état de fatigue plus ou moins important (Eklund, 2014 ; Lepers, 2001). En effet, le niveau de diminution de force musculaire varie en fonction du taux de tensions musculaires rencontrés lors de la partie aérobie (Lepers, 2001). Or, il est établi que la fraîcheur neuromusculaire est importante lors du développement des qualités neuromusculaires du sportif (Küüsmäa-Schildt, 2017). Un des facteurs pouvant modifier le niveau de fatigue est l'intensité de l'exercice réalisé. Un exercice aérobie réalisé à basse intensité permet moins de fatigue qu'un exercice réalisé à haute intensité (Cadore, 2012).

La partie suivante s'intéresse aux variables clés pouvant augmenter ou réduire le niveau d'interférence entre la force et l'aérobie.

3. Stratégies de réduction des interférences

Une bonne planification des variables du programme d'entraînement (intensités, fréquences, volumes, récupérations, ordre des séances), semblerait être nécessaire pour optimiser les adaptations physiologiques et éviter le surentraînement (Garcia-Pallares, 2011 ; Cadore, 2012). Ceci est particulièrement important pour les sports dits cycliques (disciplines qui requièrent des mouvements continus répétés comme la course, la

marche, la natation, l'aviron, le ski de fond, le cyclisme ou le canoë), où les qualités aérobies et de force doivent être simultanément améliorées pour optimiser les performances (Garcia-Pallares, 2011). Il sort des études que la charge d'entraînement et la programmation impactent directement la hauteur du phénomène d'interférence.

a) Charge de travail

La charge de travail est définie comme le volume d'entraînement réalisé à une certaine intensité de travail. Une première étude innovante s'est intéressée à l'entraînement combiné et a tenté de trouver des pistes d'explications de ce phénomène d'interférence entre la force et l'endurance (Hickson, 1980). Dans cette étude, il y avait trois groupes (force, endurance et entraînement combiné). Le groupe entraînement combiné devait réaliser à la fois les séances du groupe endurance et les séances du groupe force. Ce groupe s'entraînait donc deux fois plus que les deux autres groupes de l'étude. Les sujets de l'étude n'étaient pas des sportifs réguliers mais des sédentaires. De ce fait, il aura suffi de six semaines d'entraînements combinés pour observer une diminution des gains de force par rapport au groupe ne faisant que de la force (Hickson, 1980). La raison principale de cette baisse semble être due à une fatigue résiduelle nommée surmenage. Dans leur protocole, la charge de travail n'était pas adaptée au public, elle était bien trop importante.

Quelques années plus tard, des chercheurs ont tenté de reprendre l'étude réalisée par Hickson en 1980 en réduisant le volume d'entraînement du groupe « entraînements combinés » (Dudley, 1985). Ce dernier groupe passait donc de 11 séances par semaine (Hickson, 1980) à 6 (Dudley, 1985). Une séance de force est entrecoupée d'une séance d'endurance. Ainsi, le volume d'entraînement était bien plus réduit par rapport à l'étude d'Hickson, ce qui favoriserait les adaptations. Les résultats semblent plus cohérents quant aux gains de force maximale. En effet, on constate que les gains de force sont réduits pour de hautes vitesses d'exécution comme le montre la figure 4. En revanche, la force maximale (faible vitesse) est améliorée malgré les interférences possibles de l'entraînement combiné (Dudley, 1985).

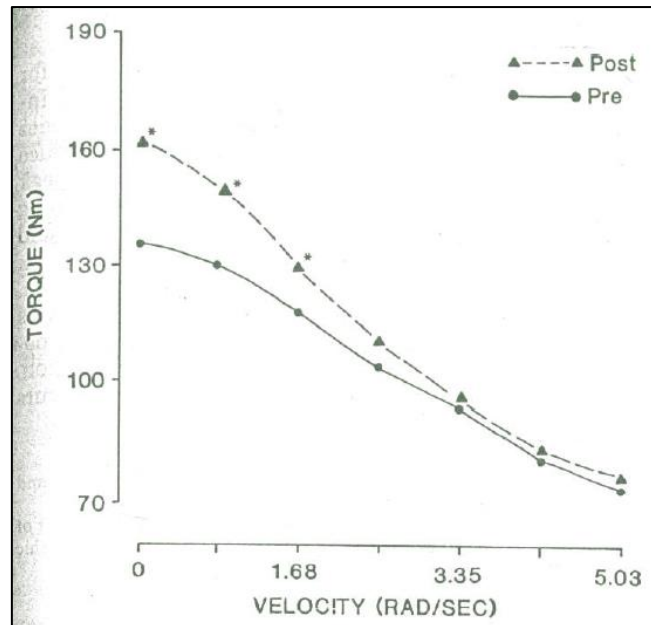


Figure 4 : Courbe de force maximale des extenseurs du genou en fonction de différentes vitesses sur ergomètre isocinétique. Avant et après un entraînement combiné de 7 semaines. D'après Dudley, 1985.

La figure 5 présente un modèle qui devrait permettre le développement d'hypothèses prédisant les protocoles d'entraînement qui minimiseront ou maximiseront l'effet d'interférence (Docherty, 2000). Un modèle proposé pour l'entraînement combiné de la force et de la puissance maximale aérobie porte sur la manipulation de l'intensité (Docherty, 2000). D'après le modèle, les auteurs supposent que l'interférence serait maximisée lorsque les athlètes utiliseraient un entraînement par intervalles à haute intensité avec un protocole d'entraînement de musculation axé sur le développement de l'hypertrophie (zone d'interférence grisée). Si l'entraînement aérobie par intervalles (PMA ou VMA) est combiné à un entraînement de force maximale (<5RM), le modèle prédirait moins d'interférences car le stimulus d'entraînement pour augmenter la force mettrait l'accent sur le système neuronal principalement. L'entraînement aérobie continu devrait donc avoir une interférence minimale sur le développement de la force en utilisant des charges lourdes (<5RM). D'autres combinaisons sembleraient possibles : un travail de force maximale associé à un travail de PMA ou encore un travail d'hypertrophie avec un travail d'endurance (>seuil anaérobie).

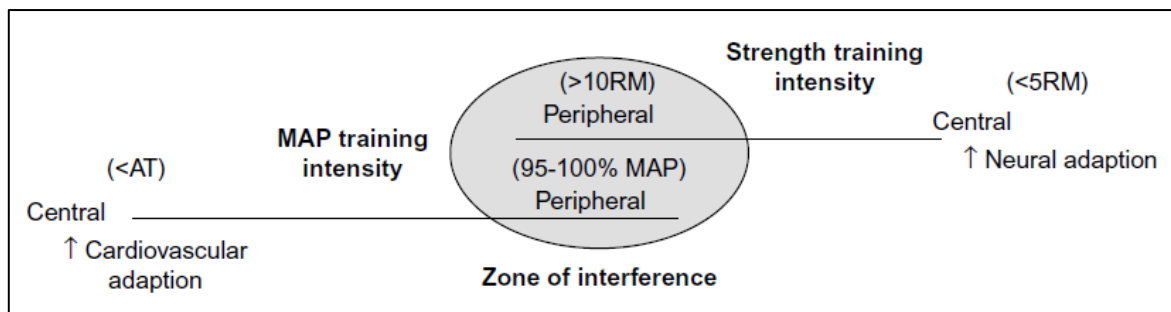


Figure 5 : Model de l'entraînement combiné représentant différentes intensités et la localisation des adaptations de la puissance maximale aérobie (PMA) et l'entraînement de force. La bulle centrale représente la zone d'interférence possible lorsque les deux modes d'entraînement sont combinés. AT = seuil anaérobie; RM = répétition maximale; ↑ = augmenté. D'après Docherty 2000.

La fréquence des entraînements combinés semblerait également influencer les gains neuromusculaires. En effet, il semblerait qu'une faible fréquence d'entraînements combinés (deux par semaine) favorise les gains en force (Chtara, 2008). Dans ce cas aucune interférence n'est observée par les chercheurs (Chtara, 2008). A l'inverse, une haute fréquence d'entraînements combinés (4-6 par semaine) réduirait considérablement les gains nerveux (Eklund, 2014). Cependant, la plupart des études utilisent des sujets sédentaires, de ce fait, une fréquence d'entraînement de deux par semaine semble être cohérente pour ce public. Une haute fréquence ne l'est plus si l'on n'est pas entraîné. Qu'elles en seraient les interférences si les sujets utilisés étaient des sportifs de haut niveau ?

Il est important de noter, que lorsque la fréquence, l'intensité ou que le volume de l'entraînement diminue, le degré d'interférence diminue. Des études ont montré que faire du vélo trois jours par semaine pendant 50 minutes à 70% de VO₂max n'était pas suffisant pour altérer la force (McCarthy, 1995) ou l'hypertrophie (McCarthy, 2002). En ce sens, des chercheurs ont montrés que pédaler pendant 30 minutes deux fois par semaine en dessous du seuil anaérobie n'était pas suffisant pour altérer la force ou la masse maigre chez les femmes d'âge moyen (Sillanpa, 2009) ou les hommes âgés (Sillanpa, 2008). Malgré tout, dès que la fréquence des entraînements aérobie dépasse les quatre par semaine ou bien que l'intensité de l'exercice dépasse 80% du VO₂max, on constate une diminution des gains de masse musculaire et de force maximale. Ceci a bien été illustré dans une méta-analyse qui a démontré que l'effet de l'entraînement en force seul sur l'hypertrophie musculaire était de +1,22% et que la force était de +1,71% (Wilson, 2012). Les chiffres correspondants pour l'entraînement combiné étaient de +0,8% et +1,28%, ce qui indique que l'exercice

d'endurance altère la taille du muscle et les adaptations de force (Wilson, 2012). D'autres chercheurs confirment ces résultats en montrant que la course et la musculation réalisée à haute intensité quatre jours par semaine durant douze semaines entraîneraient une baisse de puissance concomitante à une altération de l'hypertrophie musculaire (Kraemer, 1995).

L'organisation des séances, c'est-à-dire leur emplacement dans la journée ou dans la semaine semble également jouer un rôle sur le niveau des interférences.

b) Effet d'ordre et récupération

Le modèle ci-dessous est réalisé sur l'animal (Figure 6). Les auteurs ont tenté de comparer la mise en place du travail de force avant ou après le travail d'endurance. Ils ont fait faire un exercice d'endurance (60 minutes) avant ou après un exercice de force maximale (5 séries de 10 contractions maximales évoquées durant 3 secondes) à des rats. Ils ont observé que l'activation de l'AMPk chevauchait l'activation de mTORC1 que lorsque l'exercice d'endurance était effectué après l'exercice de force (Makanae, 2015). Ce chevauchement atténuait l'activation de mTORC1 induite par l'exercice de force ainsi que la synthèse des protéines musculaires (Makanae, 2015).

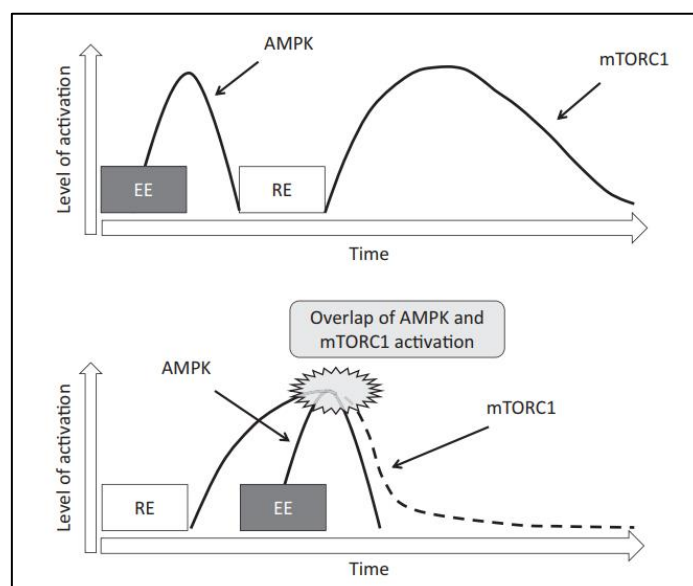


Figure 6 : Modèle schématique d'événements de signalisation en réponse à un exercice combiné. EE: exercice d'endurance, RE: exercice de musculation. D'après Makanae, 2015.

Ces données sont confirmées et complétées par d'autres auteurs (Baar, 2014). En effet, lorsque l'on a la possibilité d'éloigner les séances de force et d'aérobie, des chercheurs conseillent d'effectuer toute séance d'entraînement d'endurance à haute intensité tôt dans la journée (Baar, 2014) afin d'éviter les éventuelles interférences au niveau moléculaire. Ensuite, une période de récupération d'au moins 3 heures devrait être donnée, de sorte que l'activité AMPk et SIRT1 puisse revenir à un niveau basique, avant que l'exercice de force soit débuté (Baar, 2014). Cette suggestion est basée sur le fait que l'activité AMPk augmente rapidement puis revient aux niveaux de référence dans les trois premières heures après un exercice de haute intensité (Wojtaszewski, 2000), alors que l'activité de mTOR peut être maintenue pendant au moins 18 heures après un exercice de musculation (Baar, 1999 ; MacKenzie, 2009). Si l'on se base au niveau de la fatigue, il semblerait que réaliser la séance de musculation avant la session aérobie favorise les gains neuromusculaires lorsque les séances de suivent sans récupération (Cadore, 2012). En ce sens, préférant réaliser la force avant le travail aérobie, des auteurs conseillent de laisser un minimum de 6h de récupération entre deux entraînements de force et d'aérobie (Robineau, 2016). L'effet interférentiel de l'entraînement combiné serait différent selon la durée de récupération séparant les sessions d'entraînement (Robineau, 2016). La récupération idéale serait de 24 heures mais cette modalité ne répond pas aux critères du sport de haut niveau (Robineau, 2016 ; Sale, 1990). En effet, le sport de haut niveau demande une charge d'entraînement quotidienne voire bi-quotidienne dans certaines disciplines permettant de pousser l'organisme humain le plus haut possible.

L'heure à laquelle sont réalisés les entraînements combinés pourrait également jouer un rôle sur les gains neuromusculaires. C'est ce que confirme une étude comparant deux groupes d'entraînements combinés, un groupe s'entraînerait le matin à 7 heures et l'autre s'entraînerait à 17 heures (Küüsmäa-Schildt, 2017). Les meilleurs gains neuromusculaires (force maximale 1RM) seraient obtenus à la suite des 24 semaines d'entraînement combinés le soir à 17 heures (Küüsmäa-Schildt, 2017).

La plupart des études ont étudié le phénomène d'interférence de l'entraînement combiné en mettant en jeu les mêmes groupes musculaires. Exemple, la course à pieds et le Leg extension (Hickson, 1980 ; Hennessy,

1994). Or des auteurs supposent que l'interférence pourrait être locale (Hennessy, 1994). Sur la base des mécanismes moléculaires, les effets des entraînements combinés doivent être observés lorsque le même muscle est soumis à la fois à des exercices de musculation et d'endurance (Tomiya, 2017). Une méta-analyse a rapporté que l'interférence locale avec la force du bas du corps survient lorsque l'exercice de musculation est réalisé simultanément avec un exercice d'endurance sur le bas du corps (Wilson, 2012). De plus, il semblerait qu'un entraînement de musculation complet (haut et bas du corps) associé à des exercices d'endurance du bas du corps permette l'augmentation de la force du haut du corps (Jones, 2016). Ces gains étaient similaires à ceux de l'entraînement en force seul (Jones, 2016). Une revue systématique avec une méta-analyse conclut que le circuit training (entraînement de musculation en circuit) pourrait augmenter le VO₂max et la répétition maximale (1RM) au développé couché chez les adultes en bonne santé et ce, indépendamment du protocole utilisé dans les études (Munoz-martinez, 2017). Cette méthode d'entraînement peut donc être intéressante chez les débutants.

4. Objectif et Hypothèses

Parmi ces stratégies ayant pour but de réduire les interférences entre la force et l'endurance, nous ne ressortons pas de recommandations concernant le contenu des séances de musculation. D'après nos recherches, aucune étude ne compare réellement différents types de séances de musculation sur les adaptations neuromusculaires. Afin de répondre à ce manque, nous avons mis en place un protocole basé sur la comparaison de deux types d'entraînements de musculation (force et puissance) durant quatre semaines d'entraînements combinés.

L'objectif principal de cette étude est orienté sur la planification des séances d'entraînements combinés. Nous nous demandons quel type de séance en musculation permettrait d'optimiser les gains nerveux (amélioration des performances de force maximale et de puissance). Notre problématique est donc : Quelle méthode de musculation privilégier afin d'optimiser les gains de force et de puissance, dans le cadre des entraînements combinés ? Pour cela, nous comparons deux types de séances de musculation.

Un sujet réalisant de la force maximale dans le cadre des entraînements combinés :

- Progressera certainement en force maximale (Dudley, 1985),
- Maintiendra sa puissance maximale car les gains de puissance semblent interférer avec le travail aérobique (Dudley, 1985),
- Améliorera sa composition corporelle (Perte de masse adipeuse avec ou sans prise de masse musculaire).

Un sujet réalisant de la puissance dans le cadre des entraînements combinés :

- Pourrait progresser en force maximale étant donné le haut travail nerveux mais jusqu'à un certain seuil,
- Maintiendra sa puissance maximale car les gains de puissance semblent interférer avec le travail aérobique (Dudley, 1985),
- Améliorera sa composition corporelle (Perte de masse adipeuse avec ou sans prise de masse musculaire).

Globalement nous pensons que la séance de force maximale est à privilégier si l'on recherche des adaptations nerveuses lors d'entraînements combinés.

III. Matériel et méthode

1. Sujets

Vingt joueurs de rugby espoirs de l'US Carcassonne [âge, $20,2 \pm 1,8$ ans ; masse $96,4 \pm 15,6$ kg ; taille $1,81 \pm 6,1$ cm ; année d'entraînement $8,3 \pm 2,2$ ans ; expérience en musculation $2,1 \pm 0,8$ ans] se sont portés volontaire pour l'étude. Ils s'entraînent trois fois par semaine en musculation et réalisent deux sessions aérobies. S'ajoute à cela, les quatre séances de rugby par semaine. Durant le protocole expérimental, les sujets ont maintenu une activité rugbystique et leur nutrition habituelle. Les sujets ont été familiarisés avec le protocole deux jours avant la première session de tests. En effet, l'expérimentateur leur a expliqué la problématique des entraînements combinés avant de démontrer l'ensemble des mouvements du protocole avec les critères de validations. Ils ont par la suite réalisé les mouvements à vide afin de répondre aux critères des tests (amplitude, sécurité...).

Tout sujets n'ayant pas pu réaliser les huit séances d'entraînements combinés à la fin des quatre semaines ont été enlevé des participants. Au cours tu protocole expérimental, sept sujets ont dû interrompre le programme pour des raisons de blessure ou d'imprévus personnels. Deux sujets se sont blessé le bas du corps et ont donc uniquement passé les tests de développé couché ainsi que les mesures anthropométriques. Au final, le groupé 1 (force maximale) était composé de sept sujets dont deux blessés bas du corps et le groupe 2 (puissance) était composé de six sujets. A la fin du protocole, l'analyse des résultats est réalisée sur 13 sujets.

2. Conception de l'étude

L'étude est construite autour de deux groupes de musculation répartissant les sujets de manière randomisée. Sur une durée de quatre semaines, les sujets réalisent deux séances de musculation par semaine. Ces séances sont suivies d'un entraînement aérobic collectif couru sur terrain de rugby. Le premier groupe (n=7) correspond au groupe axé sur le développement de la force maximale. Le second groupe (n=6) est axé sur le développement de la puissance. A noter que cette étude est réalisée au cours de leur trêve hivernale correspondant à une période de sept semaines sans aucune compétition. Des tests de force maximale, de puissance maximale et des mesures anthropométriques sont réalisés avant et après les quatre semaines d'entraînement.

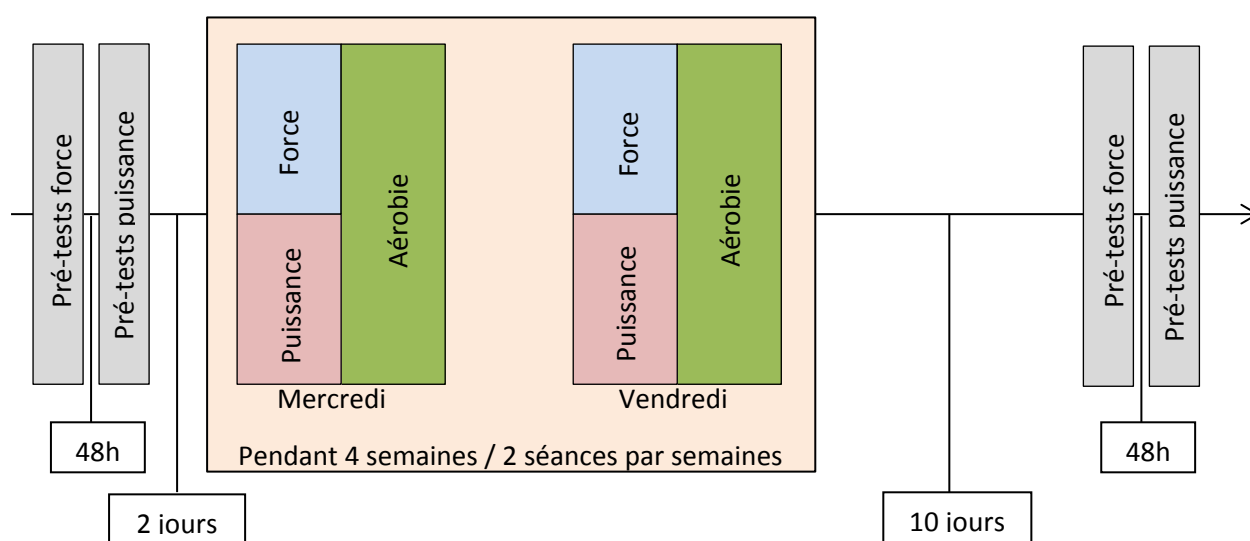


Figure 7 : Représentation schématique du protocole de l'étude.

3. Protocole

a) Mesures anthropométriques

Les sujets sont pesés lors de la première session de test, à leur arrivée en salle de musculation. Le pèse personne utilisée est un SECA 877 (CE 0109, 0123). Ils sont pesés sans les chaussures, en short et en t-shirt, avant de débiter les tests de force maximale. Lors de la deuxième session de tests, les mesures de la circonférence des membres sont réalisées avant les tests de puissance. A l'aide d'un mètre ruban, il s'agit de mesurer la circonférence du bras droit et du haut de la cuisse droite en état de contraction isométrique. Ces mesures sont réalisées avant l'échauffement à froid.

b) Echauffement général

Après avoir réalisé la pesée en première session et les mesures de circonférences des membres en deuxième, les sujets sont guidés par l'expérimentateur pour suivre l'échauffement. L'échauffement précède les deux sessions de tests de force et de puissance. Il est composé d'un déverrouillage articulaire, comprenant de la mobilité et des étirements passifs courts, ainsi qu'un échauffement principalement à poids de corps.

Déverrouillage articulaire - La première situation est un squat profond maintenu en position basse au cours duquel on va amener son poids de corps au-dessus de la cheville droite (vingt secondes) puis de la cheville gauche (20 secondes). Sans récupération, la deuxième position correspond à un mouvement d'ouverture de hanche les tibias au sol (40 secondes). Le troisième mouvement est une ouverture thoracique bras tendu en position quadrupédique (vingt secondes par bras). La cinquième position est une fente debout avec pour consigne de tendre la jambe arrière et restant le buste bien droit (vingt secondes par jambe). L'avant dernier mouvement articulaire est réalisé sur le dos, une jambe tendue au sol, il s'agit de tenir la jambe opposée au niveau de l'ischio-jambier en faisant une extension de celle-ci (vingt secondes par jambe). Le dernier mouvement correspond à une circumduction scapulaire bras tendus avec bâton PVC (quarante secondes). A la fin de ce déverrouillage, le sujet prend une minute de repos, le temps que l'expérimentateur les guide pour la suite.

Echauffement musculaire – Il est composé de cinq exercices formant un bloc. Les sujets réalisent deux blocs sans récupération en prenant le temps de bien faire les mouvements proposés. Le premier est un pont fessier sur une jambe. Les omoplates au sol, fléchir les jambes afin de réaliser une extension de hanche à poids de corps (six répétitions par jambe). Sans repos, en position d'arc postérieur, éloigner et rapprocher les talons en faisant des petits pas en finissant jambe quasiment tendues. Pour cet exercice, les fesses ne touchent pas le sol (quatre aller-retours). Le sujet réalise ensuite des squats à poids de corps (huit répétitions) en cherchant l'amplitude et le placement des genoux par rapport aux pieds. La situation suivante est un écarté de bras à l'élastique fin en position de fente (quatre répétitions par posture). Le dernier exercice correspond à une pompe au sol avec ouverture thoracique bras tendu en restant gainé (huit répétitions alternées). Le sujet prend une minute de récupération avant de se tester sur le test de grip.

c) Mesure de la force maximale

La mesure de la force maximale est réalisée en première session.

Test de grip – En position assise sur une chaise sans accoudoirs, les bras sont suspendus de part et d'autre du corps, le dos est plaqué au dossier et les jambes sont fléchies devant à 90°. L'outil est tenu par la main forte du sujet. Le principe est de serrer le dynamomètre le plus fortement possible durant trois secondes environ puis de relâché. Le sujet possède trois tentatives pour réaliser la meilleure performance possible Un temps de récupération de vingt seconde est pris entre les tentatives. Le model utilisé est un Takai TK200. Le sujet prend une minute de repos avant de commencer l'échauffement spécifique au squat.

1RM Squat – L'échauffement spécifique au squat est le suivant. Le sujet réalise trois séries d'échauffement progressif : 6x30% de la 1RM estimée, récupération de deux minutes puis 4x60% de la 1RM, récupération deux minutes et trente secondes et enfin 2x80% de la 1RM. Il prend un repos post échauffement de cinq minutes passives avant de tenter sa première barre lourde se trouvant théoriquement à 98% de son maximum estimé afin de valider une barre pour l'étude. Trois tentatives lui sont offertes et le sujet prend cinq minutes passives entre les tentatives. Concernant les critères de validation du mouvement. Le dos doit rester droit (rachis vertébral contracté), la poitrine sortie et le regard droit. Le sujet est amené à descendre

le plus bas possible en fonction de sa mobilité. Cette dernière est constatée lors de l'échauffement spécifique permettant à l'expérimentateur d'invalider la tentative par manque d'amplitude. Trois pareurs sont exigés pour une sécurité complète du sujet (un pareur derrière et deux sous les disques). Un échec mène à réduire la charge sur la barre si le sujet possède encore des tentatives. Le sujet ne pourra pas essayer la même barre deux fois d'affilé.

1RM Développé couché – L'échauffement spécifique au développé couché est le même que celui du squat. Concernant, la validation du mouvement, la barre descend à la vitesse choisie par le sujet, touche la poitrine et remonte sans aide du pareur. Les bras doivent être verrouillés au début et en fin de mouvement. Si le pareur est amené à toucher la barre, la tentative est refusée par l'expérimentateur.

1RM Tirage haut d'épaulé – L'échauffement spécifique au tirage haut d'épaulé est toujours le même que sur les deux mouvements précédents. La barre est posée sur des box afin qu'elle soit positionnée juste au-dessus de la rotule. Lors du tirage, la barre doit dépasser la ligne mammaire du sujet lorsque le corps est en extension complète (genoux et hanche en extension totale). Le sujet retient la barre sur la descente afin de préserver le matériel pour le reste des tests.

d) Mesure de la puissance maximale

Les mesures de la puissance sont réalisées en seconde session 48h après la première session de tests.

L'échauffement pour les trois mouvements (squat, développé couché, tirage haut d'épaulé) est le même. Le sujet réalise 6x30% de la 1RM mesurée deux jours avant, il prend deux minutes de repos passif puis il poursuit avec 4x60% et prend trois minutes avant de commencer les mesures. La mesure de la puissance maximale est réalisée à quatre pourcentages de la 1RM différents. Le sujet réalise donc cinq répétitions par pourcentage en prenant trois minutes de repos passif entre les mesures. Les pourcentages sont les suivants, 30%, 40%, 50% et 60% de la 1RM. La séance se termine lorsque la mesure du spectre de puissance est complète. L'outil utilisé pour les mesures est un accéléromètre de la marque Push (Toronto, Canada). C'est un dispositif portable connecté à un smartphone sous iOS, conçu pour suivre la vitesse de déplacement au cours de divers exercices de musculation. La bande Push se positionne sur l'avant-bras du sujet à une

distance de 1 à 2 cm du coude. Le transducteur de vitesse linéaire, mesure la vitesse verticale instantanée à une fréquence d'échantillonnage de 1000 Hz.

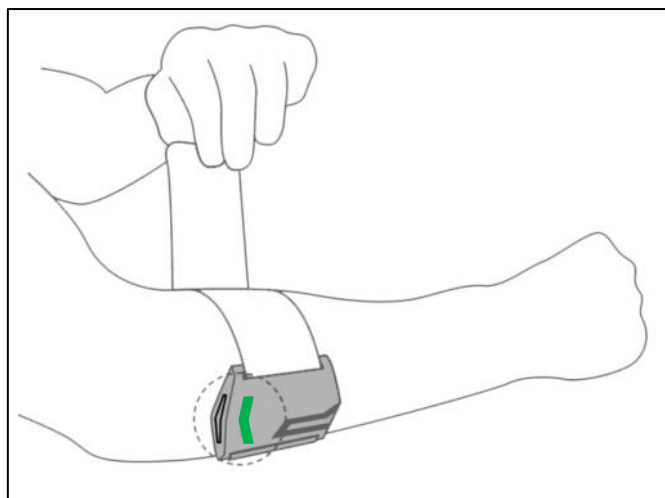


Figure 8 : Placement correct de la bande Push sur l'avant-bras du sujet. La diode lumineuse verte est orientée vers le coude (d'après Balsalobre-Fernández, 2015).

4. Entraînements

Le **groupe 1** (G1) correspond au groupe « Force maximale ». Durant quatre semaines, les participants de ce groupe vont réaliser deux séances de musculation lourde par semaine. Les mouvements utilisés lors de la première séance (mercredi) sont le squat, le développé couché et les tractions. Ceux utilisés lors de la seconde séance (vendredi) sont le soulevé de terre, le développé militaire et le tirage couché. Les participants réalisent trois séries de cinq répétitions en semaine 1. Chaque semaine, une répétition est supprimée afin d'augmenter la charge progressivement. Ils démarrent donc à 5M en semaine 1 et finissent à 2RM en semaine 4. Le temps de récupération entre les séries est de quatre minutes et entre les exercices, ce temps passe à cinq minutes. Avant chaque mouvement, les sujets réalisent un échauffement spécifique permettant de monter en charge progressivement. Trois séries d'échauffement, la première série est constituée de six répétitions à 40% de la 1RM, récupération de 1'30, la deuxième série est constituée de quatre répétitions à 60% de la 1RM, récupération de 2' puis, la dernière série est constituée de deux répétitions à 80% de la 1RM. Ils prennent trois minutes de repos passif en fin d'échauffement.

Le **groupe 2** (G2) correspond au groupe « Puissance maximale». Durant quatre semaines, les participants de ce groupe vont réaliser deux séances de musculation entre 50-65% de leur 1RM par semaine. Les mouvements utilisés lors de la première séance (mercredi) sont le squat jump, le développé couché et l'épaulé suspendu genoux. Ceux utilisés lors de la seconde séance (vendredi) sont l'arraché suspendu genoux, les pompes pliométriques et le jeté nuque. Les participants réalisent trois séries de cinq répétitions au cours des quatre semaines sur chaque mouvement. Chaque semaine, la charge utilisée augmente de 5% allant de 50% en semaine 1 à 65% en semaine 4. Concernant les mouvements, sur lesquels les participants n'ont pas mesuré leur 1RM, la charge utilisée est estimée par leur expérience en musculation. Par rapport aux mouvements à poids de corps tel que les pompes pliométriques, chaque semaine, les participants augmentent la hauteur à utiliser de 10 centimètres (allant de 20 centimètres en semaine 1 à 50 centimètres). Avant chaque exercice, les sujets réalisent un échauffement spécifique de deux séries. Cet échauffement est similaire au groupe 1 sauf que le groupe 2 ne réalise pas la troisième série.

Les **entraînements aérobies** courus qui suivent les séances de musculation sont communs aux deux groupes. La première séance aérobique (mercredi) représente du travail intermittent courus en ligne droite alors que la seconde séance aérobique (vendredi) représente du travail intermittent en navettes. Les sessions aérobiques sont réalisées sur terrain de rugby et en crampons. Pour chaque session, les participants réalisent deux blocs de huit minutes d'intermittent 15"/15". C'est-à-dire que durant les huit minutes, les sujets parcourent une distance correspondant à leur vitesse maximale aérobique intermittente (mesurée un mois avant l'expérience) pendant quinze secondes et se reposent quinze secondes de manière passive. Entre les blocs, il y a 4 minutes de repos. Trois distances sont indiquées sur le terrain : 16, 17 et 18kmh/h correspondant respectivement à 66, 70 et 75 mètres. Lors de la session aérobique en navette du vendredi, 5 mètres sont soustraits aux valeurs annoncées juste avant afin que les sollicitations soient similaires entre les deux sessions.

5. Mesures

La mesure de la force maximale est établie en fonction de la charge déplacée par le sujet en kilogrammes. Cette mesure est acceptée dès lors que les critères de validations sont respectés (amplitude correct, aucune

aide extérieure et intégrité physique totale). Concernant la mesure de la puissance, sur les cinq répétitions réalisées, nous relevons la meilleure puissance sur une répétition. Nous observons donc les cinq répétitions de chaque série sur la tablette. Cette valeur est relevée en Watt.

6. Analyse statistique

Les résultats des groupes sont exprimés en moyennes. Afin de tester les effets du temps et du groupe après les quatre semaines d'entraînements, nous utilisons l'analyse des variances (ANOVA) pour chaque variable mesurée. Le seuil de significativité est fixé à $p \leq 0,05$. En post-hoc, afin de déterminer les différences significatives entre les moyennes des groupes dans l'ANOVA, nous réalisons le test de Newman-Keuls.

IV. Résultats

Table 1 : Résultats pré et post entraînements pour G1 (force maximale) et G2 (puissance).

	G1		G2	
	Pré	Post	Pré	Post
<i>Force maximale</i>				
1RM Squat (kg)	150 ± 16,9	160 ± 16,4*	156,7 ± 21,1	163,3 ± 19,9*
1RM DC (kg)	92,1 ± 11,6	95,4 ± 12,2*	110,8 ± 12,7	114,6 ± 11,5*
1RM Tirage (kg)	72,1 ± 8	76,5 ± 9,7*	81,7 ± 6,2	87,5 ± 8,2*
Grip test (kg)	55,2 ± 8,2	57,1 ± 4,7	56,9 ± 2,7	58,1 ± 5,3
<i>Puissance maximale</i>				
Squat 30% (W)	1766,6 ± 352,8	2381 ± 483,1*	1993,8 ± 160,2	2262,8 ± 321,6*
Squat 40% (W)	1929,1 ± 287,6	2394,4 ± 492,2	2144 ± 282,1	2172,5 ± 312,1
Squat 50% (W)	1886,6 ± 243,1	2223,8 ± 410	2023,2 ± 178,1	2028,5 ± 311,3
Squat 60% (W)	1880,6 ± 314,2	2116,2 ± 448,8	1777,2 ± 194,7	1846,8 ± 182,2
DC 30% (W)	656,7 ± 62,4	658,3 ± 137,2	834,5 ± 184,8	712,5 ± 181,9
DC 40% (W)	671 ± 134,1	649,1 ± 101,2	793,8 ± 131,2	760 ± 101,1
DC 50% (W)	678,6 ± 115,7	635,3 ± 101,8	770,5 ± 95,3	742,3 ± 113,9
DC 60% (W)	633,3 ± 76,5	620,3 ± 132,6	777,2 ± 121,4	602,3 ± 49,4
Tirage 30% (W)	2844 ± 583,4	4122 ± 600*	3059,8 ± 493,6	3799,2 ± 238,1*
Tirage 40% (W)	2646,6 ± 502,3	3877,6 ± 514,8*#	3146,2 ± 488,1	3496,3 ± 624,9*
Tirage 50% (W)	2330,1 ± 306	3247,6 ± 497,6*	2660,2 ± 360,2	2902,3 ± 485,6*
Tirage 60% (W)	2267,4 ± 409	2903,6 ± 335,4	2772,5 ± 418,7	2851,2 ± 514,7
<i>Données anthropométriques</i>				
Masse (kg)	97 ± 19,1	96 ± 19,5	95,7 ± 9,9	95,6 ± 9,1
Cuisse	65,6 ± 7,9	61,1 ± 10,6	65,3 ± 4,3	64,8 ± 4,1
Biceps	39 ± 3,4	38,9 ± 3	39,9 ± 3	39,2 ± 2,3

* Différent en fonction du temps

Différent en fonction du temps et du groupe

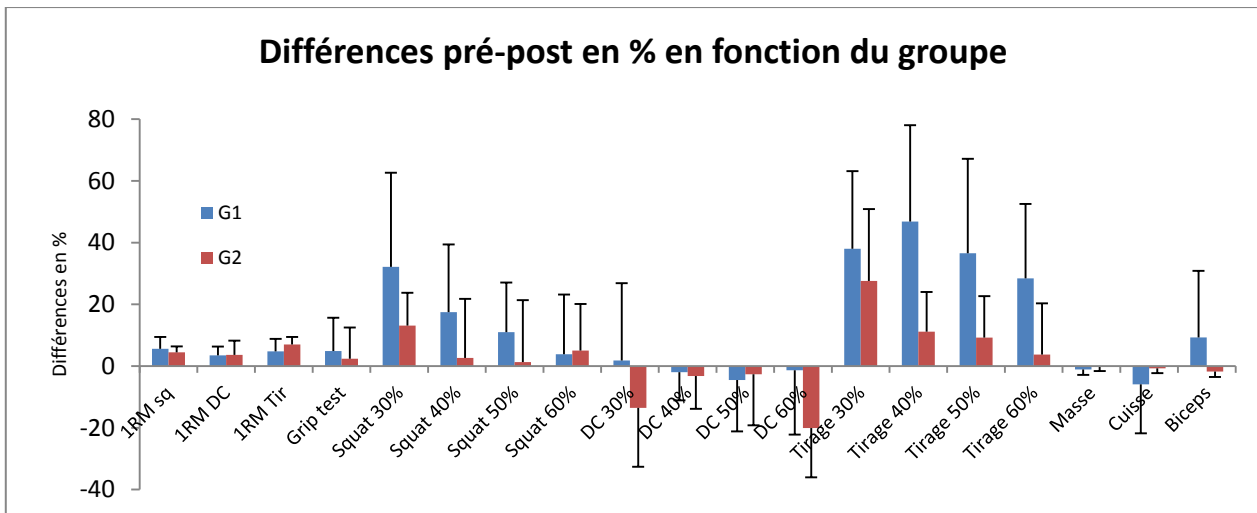


Figure 9 : Différences pré et post entraînements en fonction du groupe.

1. Force maximale

Aucune différence significative n'est observée entre les deux groupes. Après quatre semaines d'entraînements combinés, les deux groupes (force maximale et puissance) s'améliorent en force maximale. Les 1RM des trois mouvements progressent de façon significative. Le groupe force maximale progresse légèrement plus au squat 1RM que le groupe puissance (+5,6% pour le groupe maximale force contre +4,4% pour le groupe puissance), tandis ce que pour le tirage 1RM, c'est le groupe puissance qui progresse le plus (+7% pour le groupe puissance contre +4,8% pour le groupe force maximale). Les gains de force au développé couché sont similaires sans réelle tendance pour un groupe (+3,5% pour le groupe force maximale contre +3,6% pour le groupe puissance). Ces résultats sont valisés avec une probabilité inférieure à 0,5. Concernant le test de grip, les différences ne sont pas significatives, cependant, le groupe force aurait tendance à plus s'améliorer sur la force de poigne (+4,9% pour le groupe force maximale contre +2,4% pour le groupe puissance).

2. Puissance maximale

Très peu de différences sont observées entre les deux groupes. Une amélioration significative de la puissance maximale au squat à 30% de la 1RM est constatée après les quatre semaines d'entraînements combinés chez les deux groupes. Concernant les autres pourcentages de la 1RM au squat (40%, 50% et 60%) la progression constatée n'est pas significative. Malgré cela, nous observons une tendance de progression

supérieure pour le groupe force maximale au niveau du squat avec 40% et avec 50% de la 1RM (+17,5% pour le groupe force maximale contre +2,7% pour le groupe puissance à 40% de la 1RM au squat ; +11% pour le groupe force maximale contre +1,3% pour le groupe puissance). Aucune différence significative n'est observée par rapport à la puissance au développé couché. Nous observons une tendance à la régression pour les deux groupes après quatre semaines d'entraînements combinés. Cependant, le groupe puissance semble obtenir une diminution plus importante que le groupe force maximale (-20,1% pour le groupe puissance contre -1,4% pour le groupe force maximale à 60% de la 1RM). Concernant la puissance au tirage haut d'épaulé et quel que soit le groupe, nous observons des différences significatives pré et post entraînement à 30%, 40% et 50% de la 1RM. A 40% de la 1RM, une différence significative existe entre les deux groupes (+46,8% pour groupe force maximale contre +11,2% pour le groupe puissance).

3. Données anthropométriques

Aucune différence n'est significative concernant les données anthropométriques (masse, circonférence de la cuisse et du biceps). Le groupe force maximale aurait tendance à légèrement réduire sa masse corporelle au cours des quatre semaines. Concernant la circonférence du biceps, le groupe force maximale aurait tendance à progresser plus que le groupe puissance. Egalement pour le tour de cuisse, le groupe puissance, aurait tendance à maintenir le même tour de cuisse après les quatre semaines tandis que le groupe force maximale constaterait une diminution de son tour de cuisse, peut-être en lien avec une réduction de la masse corporelle.

V. Discussion

L'objectif principal de cette étude s'intéressait à la planification des séances de musculation dans la cadre des entraînements combinés. Nous nous demandions quelle serait l'organisation en musculation qui favoriserait les gains de force maximale et de puissance. Les deux groupes de l'étude (force maximale et puissance) progressent de façon significative en force maximale (squat, développé couché et tirage haut d'épaulé). Notre première hypothèse est donc validée, à savoir qu'un haut travail nerveux, quel qu'en soit le type, permettrait d'améliorer une force maximale à la suite de quatre semaines d'entraînements combinés chez un groupe de sportifs relativement jeunes ($20,2 \pm 1,8$ ans). Leur faible expérience en musculation ($2,1 \pm 0,8$ ans) serait peut-être à l'origine de ces gains. En effet, les gestes de musculation sont acquis mais pas automatisés. De ce fait, un travail régulier de quatre semaines sur les mêmes mouvements aura certainement servi d'apprentissage moteur avant tout pour une meilleure coordination. D'ailleurs, lors de la première session de pré-tests (tests de force maximale), la réalisation des mouvements de musculation était assez instable, manquait de fluidité et de gainage alors que la réalisation des mêmes mouvements en post-tests était visuellement plus certaine. Malgré tout le groupe était assez hétérogène car pour un même poste de rugby, certains soulevaient 130kg au squat alors que d'autres en soulevaient 160kg. Il s'agit pour le préparateur physique de faire du cas par cas afin d'individualiser au maximum les séances de musculation. Des résultats similaires sont observés pour des auteurs (McCarthy, 1995) dans une étude avec trois groupes (force uniquement, endurance uniquement et entraînements combinés). Dans leur étude qui durait dix semaines, les sujets du groupe entraînements combinés ont amélioré leur performance au 1RM squat (+22%) tout comme le groupe force uniquement (+23%). D'autres résultats vont dans ce sens pour la 1RM au développé couché (+18% dans les deux groupes force et combinés). Le design de leur étude était très semblable au notre dans la mesure où la force et l'endurance étaient réalisées le même jour. Les différences sont que les participants réalisaient trois sessions par semaines durant dix semaines. Par ailleurs, les sujets de l'étude étaient des personnes sédentaires, ce qui pourrait expliquer les progrès importants. D'autres auteurs (Hickson, 1980) observent une amélioration de la force maximale sur leg extension de la première à la sixième semaine sur un protocole de dix semaines. La diminution des gains de force de la septième à la

dixième étant certainement due à un surmenage car les sujets, non entraînés, réalisaient dix séances par semaine sur dix semaines. On constate bien que le volume, l'intensité, la fréquence et le type d'exercice influent sur les gains nerveux.

Concernant l'hypothèse sur la puissance qui était la même pour les deux groupes, à savoir qu'aucun groupe ne devait réellement progresser car la puissance serait au cœur des interférences avec le travail aérobic, se révèle invalidée (Dudley, 1985). En effet, les deux groupes progressent en puissance maximale (squat et tirage haut d'épaulé) à la suite des quatre semaines d'entraînements combinés. A ce niveau, pas de différences entre les deux groupes sauf pour le tirage haut d'épaulé à une charge de 40% de la répétition maximale, le groupe force maximale progresse plus que le groupe puissance. Ces résultats sont étonnants car le groupe force maximale n'a pas réalisé de mouvements dérivés de l'haltérophilie durant les quatre semaines à l'inverse du groupe puissance. Une des explications possible pourrait être la présence du soulevé de terre pour le groupe force maximale. Le travail lourd réalisé sur ce mouvement aurait peut-être renforcé un gainage profond réutilisé sur le tirage d'épaulé, qui possède une cinématique assez proche. De plus, le travail lourd est certainement plus sollicitant nerveusement que le travail de puissance. Concernant la régression (non significative) de la puissance au développé couché, les résultats obtenus sont surprenants. En effet aucun entraînement aérobic localisé sur le haut du corps n'a été fait. Nous pouvions nous attendre à un minimum de gains ou alors un maintien des qualités de puissance. Nous n'avons pas de réelle explications pour ces résultats. De par ces résultats, nous pouvons constater l'importance du travail de force maximale dans l'amélioration de la puissance maximale. Etant donné que le groupe puissance ne progresse pas plus sur la puissance que le groupe force maximale, nous pourrions nous demander si l'ajout d'exercices de puissance dans un programme de force serait intéressant.

La dernière hypothèse relatait de l'amélioration possible de la composition corporelle des sujets à la fin des quatre semaines. Notre seul moyen de mesure ne nous permet pas de répondre entièrement à notre hypothèse. En effet, seuls, le mètre ruban et le pèse personne ne permettent pas d'analyser une composition corporelle. Un impédancemètre nous aurait certainement plus aidés. La méthode des plis

cutanés nous aurait aussi certainement donnée une idée de l'évolution de la masse adipeuse. Cependant, il n'a pas de données significatives sur une perte de masse corporelle suite à notre protocole de quatre semaines. Ces données sont en accord avec celles d'autres auteurs (Sillanpaa, 2009) qui n'avaient pas obtenu de diminution de masse corporelle chez leur groupe entraînement combiné après 21 semaines. Confirmation de ces résultats chez un autre auteur (Hickson, 1980) qui, à son tour, n'a pas constaté de perte de masse corporelle chez le groupe entraînement combiné à la suite des dix semaines. Des résultats contraires sont obtenus par d'autres auteurs (Hennessy, 1994). Dans leur étude, très similaire à celle étudiée plus haut (Sillanpaa, 2009), le groupe entraînement combiné voit sa masse corporelle diminuée à la fin des huit semaines de pratique. Une explication probable pourrait venir des caractéristiques des sujets. Dans la première étude (Sillanpaa, 2009), les sujets sont sédentaires et sont âgés d'environ cinquante ans. Dans la seconde étude (Hennessy, 1994), les sujets sont des rugbyens d'environ vingt-quatre ans. En effet, les rugbyens plus jeunes et plus actifs auraient pu perdre de la masse corporelle plus facilement que des personnes plus âgées. La différence entre nos résultats et ceux de cette étude (Hennessy, 1994) proviennent peut-être de la durée du protocole d'entraînement (quatre semaines dans notre étude contre huit semaines). Par ailleurs, le gain ou la perte de masse corporelle (voire de la composition corporelle) est aussi et surtout modifiable par l'alimentation. Aucun contrôle de cette dernière n'aura été possible pour cette étude. Aussi n'oublions pas que les sujets de l'étude restent jeunes et qu'ils ne sont pas formés à la nutrition sportive. Également, aucun changement de circonférence des membres n'est observé dans notre étude. L'entraînement n'aura pas permis d'amélioration sur ce plan-ci. Là encore, la durée, relativement courte n'aura pas permis de changement.

Nous pensons que la durée de récupération entre les sessions d'entraînement (du mercredi et du vendredi) n'était pas optimale. En effet, dans leur étude, des auteurs (Evans, 1986) ont constaté la présence de courbatures après un exercice excentrique à basse intensité 24h et 48h après l'arrêt de l'exercice. De plus, ils constatent un pic de l'activité plasmatique en créatine kinase entre 24h et 48h post-exercice, indiquant la récupération incomplète des sujets. Cependant, la charge de travail en excentrique réalisée dans leur étude était bien supérieure à notre protocole de musculation. Également, des auteurs (Linnamo, 1997), nous

montrent que la récupération neuromusculaire après un travail de force maximale est plus longue qu'après un travail d'explosivité. En effet, deux jours après l'entraînement de force maximale, les données de force de base n'étaient pas rétablies totalement. C'est pourquoi, nous aurions souhaité laisser trois jours sans musculation (Volpe, 1993) mais cela était compliqué par rapport à la planification des entraînements de rugby. Concernant la durée de récupération entre les sessions de tests (48h entre la session 1 et la session 2 en pré et post tests), nous pensons que cela était suffisant car la charge de travail était relativement faible malgré une très haute intensité.

Notons également que l'activité rugby maintenue normalement durant le protocole, qui reste une activité à forte sollicitation aérobie, aurait pu être comptée dans les sessions aérobies. De ce fait, le travail aérobie réalisé aurait été supérieur au volume aérobie total du protocole. Cependant, les entraînements n'avaient pas la même durée ni la même intensité. En revanche, ils étaient communs donc l'ensemble des participants à l'étude ont reçu la même charge d'entraînement durant le protocole.

Parmi nos vingt sujets ayant passé les pré-tests, seul treize ont passé les posts-tests. Une des raisons majeures de ce constat est que nous avons eu sept blessés au cours du protocole. En effet, le rugby est un sport de contact et malheureusement, même à l'entraînement, il y a des blessés. Pour certains les blessures les handicapaient quelques jours alors que pour d'autres les blessures étaient plus importantes. Dès qu'il ne pouvait pas rattraper les séances, ils sont sortis du protocole afin que tous les sujets aient reçu la même charge d'entraînement. Finalement, ce n'est qu'un faible groupe du sujet qui termine le protocole et cela mériterai sans doute de refaire l'étude sur une population plus importante afin d'obtenir des résultats plus contrastés.

Futures recherches

Il serait intéressant de reproduire l'étude sur une population plus importante de rugbymen. Comparer les résultats en fonction de différents niveaux de pratique permettrait certainement de donner des recommandations pratiques plus affinées. Avec un plus grand nombre de sujets, il serait intéressant de créer

un groupe contrôle afin de réellement observer des interférences. Ensuite, il serait également cohérent de réaliser une étude qui comparerait deux groupes. Un premier qui suivrait un protocole de force maximale avant un travail aérobic couru avec un groupe qui suivrait un programme de force maximale avant un travail aérobic sur ergo-cycle. Sur ergo-cycle, la fatigue serait plus basse et donc les interférences pourraient être moins importantes dans ce groupe. Cependant, les adaptations cardio-respiratoires seraient peut-être différentes.

Applications pratiques

Pour des sportifs assez jeunes (20 ans), ayant une expérience de la musculation d'un à deux ans, nous conseillons de privilégier le travail de force maximale plutôt que le travail de puissance. Le travail de puissance est malgré tout intéressant si l'on souhaite améliorer la force maximale chez ce public en utilisant une charge plus légère (autour de 50% de la 1RM).

VI. Références

- ADAMS** GR, Hather BM, Baldwin KM, Dudley GA. Skeletal muscle myosin heavy chain composition and resistance training. *J Appl Physiol* (1985). 1993 Feb;74(2):911-5.
- ANDERSEN** JL, Klitgaard H, Saltin B. Myosin heavy chain isoforms in single fibres from m. vastus lateralis of sprinters: influence of training. *Acta Physiol Scand*. 1994 Jun;151(2):135-42.
- APRO** W, Wang L, Pontén M, Blomstrand E, Sahlin K. Resistance exercise induced mTORC1 signaling is not impaired by subsequent endurance exercise in human skeletal muscle. *Am J Physiol Endocrinol Metab*. 2013 Jul 1;305(1):E22-32. doi: 10.1152/ajpendo.00091.2013. Epub 2013 Apr 30.
- ASSADI** H, Lepers R. Réponse physiologique et temps d'effort maximal lors d'exercices intermittents courus à la vitesse maximale aérobie. DOI: 10.1051/sm/2012004.
- BAAR** K, Esser K. Phosphorylation of p70(S6k) correlates with increased skeletal muscle mass following resistance exercise. *Am J Physiol*. 1999 Jan;276(1 Pt 1):C120-7.
- BAAR** K. Using molecular biology to maximize concurrent training. *Sports Med*. 2014 Nov;44 Suppl 2:S117-25. doi: 10.1007/s40279-014-0252-0.
- BABAULT** N, Desbrosses K, Fabre MS, Michaut A, Pousson M. Neuromuscular fatigue development during maximal concentric and isometric knee extensions. *J Appl Physiol* (1985). 2006 Mar;100(3):780-5. Epub 2005 Nov 10.
- BALSALOBRE-FERNANDEZ** C, Glaister M, Lockey RA. The validity and reliability of an iPhone app for measuring vertical jump performance. *J Sports Sci*. 2015;33(15):1574-9. doi: 10.1080/02640414.2014.996184.
- BELL** GJ, Petersen SR, Wessel J, Bagnall K, Quinney HA. Physiological adaptations to concurrent endurance training and low velocity resistance training. *Int J Sports Med*. 1991 Aug;12(4):384-90.
- BIOLO** G, Maggi SP, Williams BD, Tipton KD, Wolfe RR. Increased rates of muscle protein turnover and amino acid transport after resistance exercise in humans. *Am J Physiol*. 1995 Mar;268(3 Pt 1):E514-20.
- BLAAUW** B, Schiaffino S, Reggiani C. Mechanisms modulating skeletal muscle phenotype. *Compr Physiol*. 2013 Oct;3(4):1645-87. doi: 10.1002/cphy.c130009.
- BOTTINELLI** R, Reggiani C. Human skeletal muscle fibres: molecular and functional diversity. *Prog Biophys Mol Biol*. 2000;73(2-4):195-262.
- BURKE** R.; Edgerton, V. Reggie. Motor Unit Properties and Selective Involvement In Movement. *Exercise and Sport Sciences Reviews*: January 1975 - Volume 3 - Issue 1 - ppg 31-82.
- CADORE** EL, Izquierdo M, Pinto SS, Alberton CL. Neuromuscular adaptations to concurrent training in the elderly: effects of intrasession exercise sequence. doi: 10.1007/s11357-012-9405-y.
- CHEN** ZP, Stephens TJ, Murthy S, Canny BJ, Hargreaves M, Witters LA, Kemp BE, McConell GK. Effect of exercise intensity on skeletal muscle AMPK signaling in humans. *Diabetes*. 2003 Sep;52(9):2205-12.
- CHOPARD** A, Pons F, Marini JF. Cytoskeletal protein contents before and after hindlimb suspension in a fast and slow rat skeletal muscle. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*. 2001 Feb;280(2):R323-30.
- CHTARA** M, Chaouachi A, Levin GT, Chaouachi M, Chamari K, Amri M, Laursen PB. Effect of concurrent endurance and circuit resistance training sequence on muscular strength and power development. doi: 10.1519/JSC.0b013e31816a4419.
- CHURCHWARD-VENNE** TA, Burd NA, Mitchell CJ, West DW, Philp A, Marcotte GR, Baker SK, Baar K, Phillips SM. Supplementation of a suboptimal protein dose with leucine or essential amino acids: effects on myofibrillar protein synthesis at rest and following resistance exercise in men. *J Physiol*. 2012 Jun 1;590(11):2751-65. doi: 10.1113/jphysiol.2012.228833. Epub 2012 Mar 25.
- CLOSE** R. Dynamic properties of mammalian skeletal muscles. *Physiol Rev*. 1972 Jan;52(1):129-97.
- COSTILL** DL, Daniels J, Evans W, Fink W, Krahenbuhl G, Saltin B. Skeletal muscle enzymes and fiber composition in male and female track athletes. *J Appl Physiol*. 1976 Feb;40(2):149-54.
- CROZIER** SJ, Kimball SR, Emmert SW, Anthony JC, Jefferson LS. Oral leucine administration stimulates protein synthesis in rat skeletal muscle. *J Nutr*. 2005 Mar;135(3):376-82.

- DESCHENES MR, Britt AA, Gomes RR, Booth FW, Gordon SE.** Recovery of neuromuscular junction morphology following 16 days of spaceflight. *Synapse*. 2001 Dec 1;42(3):177-84.
- DOCHERTY D, Sporer B.** A proposed model for examining the interference phenomenon between concurrent aerobic and strength training. *Sports Med*. 2000 Dec;30(6):385-94.
- DOLEZAL BA, Potteiger JA.** Concurrent resistance and endurance training influence basal metabolic rate in nondieting individuals. *J Appl Physiol* (1985). 1998 Aug;85(2):695-700.
- DUDLEY GA, Djamil R.** Incompatibility of endurance- and strength-training modes of exercise. *J Appl Physiol*. 1985 Nov;59(5):1446-51.
- EKLUND D, Pulverenti T, Bankers S, Avela J, Newton R, Schumann M, Häkkinen K.** Neuromuscular adaptations to different modes of combined strength and endurance training. doi: 10.1055/s-0034-1385883.
- ENOKA RM, Stuart DG.** Neurobiology of muscle fatigue. *J Appl Physiol* (1985). 1992 May;72(5):1631-48.
- FLUCK M, Hoppeler H.** Molecular basis of skeletal muscle plasticity--from gene to form and function. *Rev Physiol Biochem Pharmacol*. 2003;146:159-216.
- FRENETTE J, and James G. Tidball.** Mechanical loading regulates expression of talin and its mRNA, which are concentrated at myotendinous junctions. Doi.org/10.1152/ajpcell.1998.275.3.C818
- FURRER R, DE Haan A, Bravenboer N, Kos D, Lips P, Jaspers RT.** Effects of concurrent training on oxidative capacity in rat gastrocnemius muscle. *Med Sci Sports Exerc*. 2013 Sep;45(9):1674-83. doi: 10.1249/MSS.0b013e31828f65f.
- GARCIA-PALLARES J, Izquierdo M.** Strategies to optimize concurrent training of strength and aerobic fitness for rowing and canoeing. *Sports Med*. 2011 Apr 1;41(4):329-43. doi: 10.2165/11539690-000000000-00000.
- GOLDBERG AL.** Protein synthesis during work-induced growth of skeletal muscle. *J Cell Biol*. 1968 Mar;36(3):653-8.
- GOLLNICK PD, Armstrong RB, Saubert CW 4th, Piehl K, Saltin B.** Enzyme activity and fiber composition in skeletal muscle of untrained and trained men. *J Appl Physiol*. 1972 Sep;33(3):312-9.
- GOODMAN CA, Frey JW, Mabrey DM, Jacobs BL, Lincoln HC, You JS, Hornberger TA.** The role of skeletal muscle mTOR in the regulation of mechanical load-induced growth. *J Physiol*. 2011 Nov 15;589(Pt 22):5485-501. doi: 10.1113/jphysiol.2011.218255.
- HAKKINEN K, Alen M, Kraemer WJ, Gorostiaga E, Izquierdo M, Rusko H, Mikkola J, Häkkinen A, Valkeinen H, Kaarakainen E, Romu S, Erola V, Ahtiainen J, Paavolainen L.** Neuromuscular adaptations during concurrent strength and endurance training versus strength training. *Eur J Appl Physiol*. 2003 Mar;89(1):42-52. Epub 2002 Dec 14.
- HARDIE DG, Ross FA, Hawley SA.** AMPK: a nutrient and energy sensor that maintains energy homeostasis. *Nat Rev Mol Cell Biol*. 2012 Mar 22;13(4):251-62. doi: 10.1038/nrm3311.
- HAWLEY JA.** Molecular responses to strength and endurance training: are they incompatible? *Appl Physiol Nutr Metab*. 2009 Jun;34(3):355-61. doi: 10.1139/H09-023.
- HENNEMAN E, Somjen G, Carpentier DO.** Functional significance of cell size in spinal motoneurons. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*. 1975 Mar;38(3):245-54.
- HENNESSY LC, Watson, Anthony W.S.** The Interference Effects of Training for Strength and Endurance Simultaneously. (1994) *The JSCR*: 8(1):12-19.
- HICKSON RC.** Interference of strength development by simultaneously training for strength and endurance. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 1980;45(2-3):255-63.
- HOWALD H, Hoppeler H, Claassen H, Mathieu O, Straub R.** Influences of endurance training on the ultrastructural composition of the different muscle fiber types in humans. *Pflugers Arch*. 1985 Apr;403(4):369-76.
- INGJER F.** Capillary supply and mitochondrial content of different skeletal muscle fiber types in untrained and endurance-trained men. A histochemical and ultrastructural study. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 1979 Feb 15;40(3):197-209.
- INOKI K, Zhu T, Guan KL.** TSC2 mediates cellular energy response to control cell growth and survival. *Cell*. 2003 Nov 26;115(5):577-90.
- IZQUIERDO M, Häkkinen K, Ibáñez J, Kraemer WJ, Gorostiaga EM.** Effects of combined resistance and cardiovascular training on strength, power, muscle cross-sectional area, and endurance markers in middle-aged men. *Eur J Appl Physiol*. 2005 May;94(1-2):70-5.
- JONES TW, Howatson G, Russell M, French DN.** Performance and Endocrine Responses to Differing Ratios of Concurrent Strength and

- Endurance Training. *J Strength Cond Res.* 2016 Mar;30(3):693-702. doi: 10.1519/JSC.0000000000001135.
- KIM E**, Goraksha-Hicks P, Li L, Neufeld TP, Guan KL. Regulation of TORC1 by Rag GTPases in nutrient response. *Nat Cell Biol.* 2008 Aug;10(8):935-45. doi: 10.1038/ncb1753. Epub 2008 Jul 6.
- KLITGAARD H**, Zhou M, Richter EA. Myosin heavy chain composition of single fibres from m. biceps brachii of male body builders. *Acta Physiol Scand.* 1990 Oct;140(2):175-80.
- KRAEMER WJ**, Patton JF, Gordon SE, Harman EA, Deschenes MR, Reynolds K, Newton RU, Triplett NT, Dziados JE. Compatibility of high-intensity strength and endurance training on hormonal and skeletal muscle adaptations. *J Appl Physiol* (1985). 1995 Mar;78(3):976-89.
- KUUSMA-SCHILDT M**, Eklund D, Avela J, Rytönen T, Newton R, Izquierdo M, Häkkinen K. Neuromuscular Adaptations to Combined Strength and Endurance Training: Order and Time-of-Day. *Int J Sports Med.* 2017 Sep;38(9):707-716. doi: 10.1055/s-0043-101376.
- LANE H**. p70s6k function is essential for G1 progression. *Nature* volume 363, pages170–172 (1993).
- LEPERS R**, Millet GY, Maffiuletti NA. Effect of cycling cadence on contractile and neural properties of knee extensors. *Med Sci Sports Exerc.* 2001 Nov;33(11):1882-8.
- LINNAMO V**, Häkkinen K, Komi PV. Neuromuscular fatigue and recovery in maximal compared to explosive strength loading. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1998;77(1-2):176-81.
- MACKENZIE MG**, Hamilton DL, Murray JT, Taylor PM, Baar K. mVps34 is activated following high-resistance contractions. *J Physiol.* 2009 Jan 15;587(1):253-60. doi: 10.1113/jphysiol.2008.159830.
- MAKANAE Y**, Riki Ogasawara, Satoshi Fujita. Skeletal muscle signaling response to concurrent endurance and resistance exercise. Volume 4 (2015) Issue 2 Pages 217-221. <https://doi.org/10.7600/jpfsm.4.217>.
- MATHEWS B**. *Origines and principles of translational control.* 2000 Cold spring harbor laboratory press.
- MCCARTHY JP**, Agre JC, Graf BK, Pozniak MA, Vailas AC. Compatibility of adaptive responses with combining strength and endurance training. *Med Sci Sports Exerc.* 1995 Mar;27(3):429-36.
- MCCARTHY JP**, Pozniak MA, Agre JC. Neuromuscular adaptations to concurrent strength and endurance training. *Med Sci Sports Exerc.* 2002 Mar;34(3):511-9.
- MENDEZ R**, Kollmorgen G, White MF, Rhoads RE. Requirement of protein kinase C zeta for stimulation of protein synthesis by insulin. *Mol Cell Biol.* 1997 Sep;17(9):5184-92.
- MILNER-BROWN HS**, Stein RB, Lee RG. Synchronization of human motor units: possible roles of exercise and supraspinal reflexes. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol.* 1975 Mar;38(3):245-54.
- MUNOZ-MARTINEZ FA**, Rubio-Arias JÁ, Ramos-Campo DJ, Alcaraz PE. Effectiveness of Resistance Circuit-Based Training for Maximum Oxygen Uptake and Upper-Body One-Repetition Maximum Improvements: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Med.* 2017 Dec;47(12):2553-2568. doi: 10.1007/s40279-017-0773-4.
- O'NEIL DS**, Zheng D, Anderson WK, Dohm GL, Houmard JA. Effect of endurance exercise on myosin heavy chain gene regulation in human skeletal muscle. *Am J Physiol.* 1999 Feb;276(2):R414-9. doi: 10.1152/ajpregu.1999.276.2.R414.
- RICOY JR**, Encinas AR, Cabello A, Madero S, Arenas J. Histochemical study of the vastus lateralis muscle fibre types of athletes. *J Physiol Biochem.* 1998 Mar;54(1):41-7.
- ROBINEAU J**, Babault N, Piscione J, Lacombe M, Bigard AX. Specific Training Effects of Concurrent Aerobic and Strength Exercises Depend on Recovery Duration. *J Strength Cond Res.* 2016 Mar;30(3):672-83. doi: 10.1519/JSC.0000000000000798.
- SALE DG**, Jacobs I, MacDougall JD, Garner S. Comparison of two regimens of concurrent strength and endurance training. *Med Sci Sports Exerc.* 1990 Jun;22(3):348-56.
- SALE DG**. Neural adaptation to resistance training. *Med Sci Sports Exerc.* 1988 Oct;20(5 Suppl):S135-45.
- SALTIN B**, Henriksson J, Nygaard E, Andersen P, Jansson E. Fiber types and metabolic potentials of skeletal muscles in sedentary man and endurance runners. *Ann N Y Acad Sci.* 1977;301:3-29.
- SENGUPTA S**, Peterson TR, Sabatini DM. Regulation of the mTOR complex 1 pathway by nutrients, growth factors, and stress. *Mol Cell.* 2010 Oct 22;40(2):310-22. doi: 10.1016/j.molcel.2010.09.026.
- SILLANPAA E**, Häkkinen A, Nyman K, Mattila M, Cheng S, Karavirta L, Laaksonen DE, Huuhka N, Kraemer WJ, Häkkinen K. Body composition and fitness during strength and/or endurance training in older men. *Med Sci Sports Exerc.* 2008 May;40(5):950-8. doi: 10.1249/MSS.0b013e318165c854.
- SILLANPAA E**, Laaksonen DE, Häkkinen A, Karavirta L, Jensen B, Kraemer WJ, Nyman K, Häkkinen K. Body composition, fitness, and

metabolic health during strength and endurance training and their combination in middle-aged and older women. *Eur J Appl Physiol*. 2009 May;106(2):285-96. doi: 10.1007/s00421-009-1013-x. Epub 2009 Mar 6.

SUCHOMEL TJ, Nimphius S, Bellon CR, Stone MH. The Importance of Muscular Strength: Training Considerations. *Sports Med*. 2018 Apr;48(4):765-785. doi: 10.1007/s40279-018-0862-z.

TERZIS G, Georgiadis G, Stratakos G, Vogiatzis I, Kavouras S, Manta P, Mascher H, Blomstrand E. Resistance exercise-induced increase in muscle mass correlates with p70S6 kinase phosphorylation in human subjects. *Eur J Appl Physiol*. 2008 Jan;102(2):145-52. Epub 2007 Sep 14.

THOMSON DM, Gordon SE. Diminished overload-induced hypertrophy in aged fast-twitch skeletal muscle is associated with AMPK hyperphosphorylation. *J Appl Physiol* (1985). 2005 Feb;98(2):557-64. Epub 2004 Oct 1.

TIPTON KD, Ferrando AA, Phillips SM, Doyle D Jr, Wolfe RR. Postexercise net protein synthesis in human muscle from orally administered amino acids. *Am J Physiol*. 1999 Apr;276(4 Pt 1):E628-34.

TOMIYA S, Kikuchi N, Nakazato K. Moderate Intensity Cycling Exercise after Upper Extremity Resistance Training Interferes Response to Muscle Hypertrophy but Not Strength Gains. *J Sports Sci Med*. 2017 Aug 8;16(3):391-395. eCollection 2017 Sep.

TSITKANOU S, Spengos K, Stasinaki AN, Zaras N, Bogdanis G, Papadimas G, Terzis G. Effects of high-intensity interval cycling

performed after resistance training on muscle strength and hypertrophy. *Scand J Med Sci Sports*. 2017 Nov;27(11):1317-1327. doi: 10.1111/sms.12751. Epub 2016 Sep 23.

TYML K, Mathieu-Costello O. Structural and functional changes in the microvasculature of disused skeletal muscle. *Front Biosci*. 2001 Jan 1;6:D45-52.

VOLPE SL.; Walberg-Rankin, Janet; Rodman, Kelsie Webb; Sebolt, Don R. The Effect of Endurance Running on Training Adaptations in Women Participating in a Weight Lifting Program. *The Journal of Strength & Conditioning Research*: May 1993

WANG L, Mascher H, Psilander N, Blomstrand E, Sahlin K. Resistance exercise enhances the molecular signaling of mitochondrial biogenesis induced by endurance exercise in human skeletal muscle. *J Appl Physiol* (1985). 2011 Nov;111(5):1335-44. doi: 10.1152/jappphysiol.00086.2011. Epub 2011 Aug 11.

WIDRICK JJ, Stelzer JE, Shoepke TC, Garner DP. Functional properties of human muscle fibers after short-term resistance exercise training. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*. 2002 Aug;283(2):R408-16.

WILSON JM, Marin PJ, Rhea MR, Wilson SM, Loenneke JP, Anderson JC. Concurrent training: a meta-analysis examining interference of aerobic and resistance exercises. *J Strength Cond Res*. 2012 Aug;26(8):2293-307. doi: 10.1519/JSC.0b013e31823a3e2d.

WINDER WW, Hardie DG. Inactivation of acetyl-CoA carboxylase and activation of AMP-activated protein kinase in muscle during exercise. *Am J Physiol*. 1996 Feb;270(2 Pt 1):E299-304.