



Gestion des interférences liées au développement des qualités énergétiques et neuromusculaires

Julien Robineau

► To cite this version:

Julien Robineau. Gestion des interférences liées au développement des qualités énergétiques et neuromusculaires. Médecine humaine et pathologie. Université de Grenoble, 2013. Français. NNT : 2013GRENS040 . tel-01146042

HAL Id: tel-01146042

<https://theses.hal.science/tel-01146042>

Submitted on 27 Apr 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Mouvement et Comportement pour la Santé et l'Autonomie**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Julien ROBINEAU

Thèse dirigée par **Xavier BIGARD**

Codirigée par **Nicolas BABAULT**

Préparée au sein du Centre de Recherches du Service de Santé des Armées

Dans l'École Doctorale Ingénierie pour la Santé, la Cognition et l'Environnement

Gestion des interférences liées au développement des qualités neuromusculaires et énergétiques

Thèse soutenue publiquement le **20/12/2013**,

Devant le jury composé de :

Professeur, Xavier BIGARD

Directeur de thèse, Agence Française de Lutte contre le Dopage

Docteur, Nicolas BABAULT

Co-directeur de thèse, Centre d'Expertise de la Performance « Gilles Cometti »

Professeur, Stéphane PERREY

Rapporteur, Université Montpellier 1

Professeur, Robin CANDAU

Rapporteur, Université Montpellier 1

Docteur, Christophe HAUSSWIRTH

Examineur, Institut National du Sport, de l'Expertise et de la Performance

Professeur, Paul DELAMARCHE

Examineur, Université Rennes 2

Docteur, Julien PISCIONE

Examineur, Fédération Française de Rugby

*Université Joseph Fourier / Université Pierre Mendès France /
Université Stendhal / Université de Savoie / Grenoble INP*



Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'auront permis de mener à bien ce projet durant ces quatre années ...

Mes directeurs de thèse, Nicolas, Xavier et Julien,

L'ensemble des membres de la DTN et particulièrement Jean-Claude Skrela,

Le président de la FFR, Pierre Camou,

Mon pote, Mathieu,

Les entraineurs,

Tous les salariés de la FFR,

Mes « sujets »,

Mes amis,

Ma famille.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	p 4
CADRE THEORIQUE	p 8
1. Réalité et reproductibilité des effets interférentiels des entraînements combinés	p 9
1.1 Mise en évidence du phénomène d'interférence	p 9
1.2 Effets de l'endurance sur la production de force	p 11
1.3 Effets de l'endurance sur les différents groupes musculaires	p 13
1.4 Effets de l'entraînement de force sur les performances en endurance	p 16
2. Mécanismes explicatifs de l'altération des adaptations neuromusculaires	p 20
2.1 La fatigue	p 20
2.2 Les réponses physiologiques contradictoires	p 24
3. Programmation des entraînements combinés	p 34
3.1 Effets du volume d'entraînement	p 34
3.2 Effets de l'ordre des séances	p 35
3.3 Effets du temps de récupération	p 36
3.4 Effets du type d'entraînement	p 39
4. Problématiques et objectifs	p 43
MATERIEL ET METHODES	p 46
1. Population	p 47
2. Techniques utilisées	p 47
3. Analyse statistiques	p 55
4. Expérimentations	p 57
Etude 1. Effets aigus de différents types d'entraînement aérobique sur la capacité de production de force	p 57
Etude 2. Effets du temps de récupération entre les séances de force et d'endurance sur les adaptations neuromusculaires et oxydatives	p 73
Etude 3. Effet du type d'entraînement d'endurance sur les adaptations neuromusculaires et oxydatives	p 90
CONCLUSION GENERALE, PERSPECTIVES ET APPLICATIONS PRATIQUES	p 107
BIBLIOGRAPHIE	p 115
ANNEXES	p 127

Véritables forçats consentants, formidables décathloniens de l'ovalie les joueuses et joueurs de rugby à 7 enchainent les rencontres comme ils reproduisent sans cesse et sans relâche, les tâches sur le terrain !

Dans un état de vigilance extrême indispensable, parfois rendu plus complexe encore par les brumes envoutantes produites par les effets de l'acide lactique, ils renouvellent les courses haletantes, les variations d'allures brutales, les changements de trajectoires en les agrémentant de corps à corps étouffants et de rebonds au sol écourtés par les exigences d'activité et de réactivité imposées par le jeu.

Le « sept », comme nombre de sports collectifs, sollicite un véritable pot pourri de qualités physiques extrêmes mise en œuvre de façon aléatoire au service du jeu.

Leur entraînement et leur développement dissociés posent clairement la question récurrente et si souvent problématique de la gestion des interférences liées au développement des qualités énergétiques et neuromusculaires qui leur sont dédiées.

Le travail produit par Julien Robineau, outre le fait qu'il offre l'opportunité d'un point sur l'état actuel des recherches dans le domaine, présente l'avantage d'apporter de véritables pistes concrètes d'organisation et d'agencement des séquences d'entraînement utilisable par les hommes de terrain.

Cette production nous rappelle à mon sens une nouvelle fois à quel point la science est un partenaire indispensable des différents accompagnateurs de la performance et à quel point il est nécessaire qu'elle leur soit audible en remettant le jeu et le terrain au centre de sa préoccupation finale comme cela est réalisé à merveille dans cet écrit.

David Courteix, Entraîneur de l'équipe de France féminine de rugby à 7

INTRODUCTION

« La science n'est jamais ni un fruit spontané, ni la création d'une époque ou d'un homme, mais un héritage que nous avons reçu et que nous transmettons »

Maximilien Littré

En août 1995, l'international rugby board (IRB), l'institution suprême du rugby mondial gomme de ses statuts toute référence alors obligatoire à l'amateurisme. Le rugby devient un sport professionnel. Cette mutation provoque alors une modification de la manière de s'entraîner avec notamment une augmentation importante du volume d'entraînement et l'apparition de la préparation physique afin de développer les habiletés spécifiques à ce sport.

En effet, le rugby est un sport collectif, se caractérisant par une répétition d'efforts intenses de courtes durées et alternant des phases de déplacement (courses, sprints, sauts, ...) et de « combat » nécessitant un travail musculaire important (plaquage, ruck, maul, mêlée) (Duthie et coll., 2003). Une équipe est composée de 15 joueurs ayant des postes bien définis. Huit d'entre eux sont des avants, répartis en trois lignes : deux piliers et un talonneur en première ligne, deux deuxième lignes, trois troisième lignes. Les sept autres sont les arrières avec une charnière composée du demi de mêlée et du demi d'ouverture, quatre trois-quarts et un arrière (Duthie et coll., 2003). Le temps de jeu effectif d'un match de rugby à 15 est proche de 40 minutes. Une étude récente (Coughlan et coll., 2011), utilisant l'outil GPS, montrait que les avants parcouraient 6427 m contre 7002 m pour les trois-quarts à l'issue d'un match international. Les différences méthodologiques d'analyse des contraintes physiologiques et métaboliques rendent difficile la comparaison des données issues de plusieurs études (Austin et coll., 2011; Eaton et George, 2006; Roberts et coll., 2008), mais la tendance générale indique que les avants sont plus impliqués dans des activités de haute intensité (9 et 19 min) que les arrières (3 et 7 min). Cette différence est essentiellement liée au temps passé par les avants dans les activités de combat (8 min vs. 2 min pour les trois-quarts) (Duthie et coll., 2005 ; Roberts et coll., 2008). Les trois-quarts sont quant à eux significativement plus impliqués dans les activités de course intense et de sprint que les avants (Eaton et George, 2006).

Les joueurs requièrent donc des qualités neuromusculaires importantes (force, puissance et vitesse) pour être performants au cours des actions de course, de duel et de combat. Ils nécessitent également des qualités aérobies suffisantes afin d'optimiser la restauration des réserves énergétiques (ATP, PCr) entre les efforts de haute intensité mais également de faciliter l'élimination des métabolites (ions H^+ , Pi) induits par ces mêmes efforts. L'entraînement doit alors combiner les deux filières énergétiques afin d'améliorer son efficacité en compétition et de repousser le seuil de fatigue. En effet, récemment, Lacombe et coll., (2013) ont mis en évidence une diminution faible mais significative d'approximativement 3% de l'accélération moyenne au cours de la seconde mi-temps. L'apparition d'un état de fatigue a également été mise en évidence au cours de matches de

rugby à 7 où la distance parcourue par les joueurs à haute intensité ($> 14.1 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$) diminue en seconde mi-temps ($36,7 \pm 10,1$ en 1^{ère} mi-temps vs. $28,1 \pm 7,8 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ en 2^{nde} mi-temps) (Suarez-Arrones et coll., 2013).

Les sollicitations musculaires induites par l'entraînement de ces qualités sont très différentes. L'entraînement des qualités de force impose un faible nombre de contractions à l'origine de tensions musculaires importantes alors que l'entraînement d'endurance consiste à répéter, de manière intermittente ou continue, un nombre important de contractions musculaires à faibles intensités (Nader, 2006). Plusieurs auteurs (Chromiak et Mulvaney, 1990 ; Tanaka et Swensen, 1998) ont mis en avant des adaptations physiologiques spécifiques à chaque modalité d'effort. L'entraînement de force induit notamment une hypertrophie des fibres musculaires et une optimisation de l'activité neuronale (recrutement et fréquence de décharge des unités motrices) (Gabriel et coll., 2006). L'entraînement d'endurance se traduit quant à lui par des modifications aux niveaux cardiorespiratoire (débit cardiaque, capacité érythrocytaire de l'oxygène) (Ellison et coll., 2012) et musculaire (densité mitochondriale et capillaire, activité des enzymes oxydatives) (Coffey & Hawley, 2007). La question du développement concomitant des qualités de force et d'endurance s'est alors posée. Compte tenu des réponses très spécifiques et opposées à ces deux types d'efforts, l'hypothèse a été formulée que la combinaison de ces deux formes d'entraînement puisse induire un « conflit physiologique » au sein de l'organisme. Hickson (1980) fut le premier auteur à s'intéresser aux effets sur les performances de la combinaison des efforts en mesurant les adaptations induites par 10 semaines d'entraînement. Le principal résultat de cette étude mettait en évidence une réduction du gain de force maximale du bas du corps après la période d'entraînement combiné force/endurance par rapport au gain mesuré après une période d'entraînement de force seule. De nombreux auteurs (Hakkinen et coll., 2003; Hennessy et Watson, 1994; Hunter et coll., 1987; Kraemer et coll., 1995; Leveritt et coll., 1999; McCarthy et coll., 1995 et 2002) parlent, depuis, d'effet « interférentiel » de l'entraînement d'endurance sur le développement de la capacité de production de force. A l'inverse, d'une manière générale, les réponses aérobies ne semblent pas être affectées par la combinaison des entraînements. Un entraînement de force adapté pourrait même optimiser la performance d'endurance (Tanaka et Swensen, 1998).

Les mécanismes explicatifs du phénomène interférentiel sont nombreux. Ils peuvent concerner, d'une part, les mécanismes biologiques à l'origine des adaptations physiologiques antagonistes aux deux types de stimuli. D'autre part, l'apparition d'un état de fatigue a été

évoquée. L'altération de la charge de travail, liée à une fatigue aigue, pourrait expliquer à long terme une perturbation des adaptations. Le surmenage, induit par la cumulation des deux formes d'entraînements, pourrait également expliquer le phénomène interférentiel (Leveritt et coll., 1999). L'intervention de ces mécanismes semblerait assez variable selon la configuration des entraînements proposés. L'ordre des séances de force et d'endurance semble influencer les adaptations neuromusculaires à l'issue d'une période d'entraînement combiné (Bell et coll., 1988). Egalement, un temps de récupération de 24h entre celles-ci pourrait optimiser le développement de ces réponses (Sale et coll., 1990). Actuellement, l'entraînement de haut niveau implique la programmation de plusieurs séances d'entraînement au sein d'une même journée. De nouvelles études sont alors nécessaires pour affiner cette durée de récupération, évaluée à 24h, et vérifier la faisabilité d'une programmation biquotidienne. Par ailleurs, une méta-analyse récente identifiait la durée et la fréquence des exercices d'endurance comme des facteurs principaux de l'interférence sur les gains de force et de puissance (Wilson, 2012). L'influence du type d'effort aérobie a également été évaluée dans le cadre des entraînements combinés. Les efforts de répétitions de sprints seraient plus compatibles que l'entraînement d'endurance continu pour le développement des qualités neuromusculaires (Balabinis et coll., 2003; Rhea et coll., 2008). Toutes ces variables restent peu explorées et nécessitent des recherches complémentaires.

Les qualités physiques requises pour être performant au rugby s'avèrent de plus en plus complètes et semblent obligatoirement résulter d'entraînements combinés dont on sait que les réponses neuromusculaires seront pénalisées par les exercices d'endurance. Il s'avère donc primordial de diminuer le plus possible cet effet freinateur sur les adaptations du système neuromusculaire. L'objectif de ce travail de recherche sera alors de tester différentes modalités d'entraînements, spécifiques au rugby, permettant de réduire l'inhibition de l'entraînement en endurance sur l'amélioration des performances de force. Pour cela, nous vérifierons, les effets aigus 1) de l'ordre des séances de force et d'endurance, et les effets chroniques 2) de différents temps de récupération entre les séances ainsi que 3) de différents types d'entraînement d'endurance.

CADRE THEORIQUE

« L'homme ne doit jamais cesser de croire que l'incompréhensible peut se comprendre, sans cela, il renoncerait aux recherches »

Johan Goethe

L'entraînement d'endurance semble interférer sur le développement de la force dans le cadre des entraînements combinés. L'effet inverse, à savoir l'éventuelle influence de l'entraînement de force sur la performance d'endurance, serait quant à lui bénéfique, au moins dans certaines circonstances. Ces différents points seront mentionnés dans une première partie. Les mécanismes responsables de l'inhibition sur le développement de la force sont multiples et concerneraient aussi bien le phénomène de fatigue aigue ou chronique que les réponses biologiques cellulaires à l'origine des adaptations physiologiques antagonistes. Nous les détaillerons davantage au sein d'une deuxième partie. Différents moyens de régulation de l'effet dit « interférentiel », tels que l'ordre des séances, les temps de récupération et les types d'entraînement, ont été proposés et testés. Une troisième partie les résumera alors et nous permettra de justifier le choix des procédures expérimentales mises en place.

Par soucis de lisibilité, nous qualifierons tout au long du manuscrit, les groupes d'entraînement de force, aérobie et combiné, respectivement par les abréviations FOR, AER et COMB, respectivement.

1. Réalité et reproductibilité des effets interférentiels des entraînements combinés

1.1 Mise en évidence du phénomène d'interférence

Alors qu'il réalisait son post-doctorat à l'Université Washington de Saint Louis, le docteur Robert Hickson constatait que la course à pied qu'il pratiquait régulièrement avec le docteur John Holloszy, semblait lui faire perdre de la masse musculaire. A partir de ce constat, il décida de mettre en place une expérimentation sur les effets combinés de l'endurance et de la musculation. Il publia un premier article en 1980 et démontra ce que les athlètes et les joueurs avaient remarqué pendant des années : l'entraînement pour développer la force est affecté par sa combinaison avec un entraînement d'endurance.

Dans cette étude, les entraînements de force (FOR), orientés sur le développement de la force maximale du bas du corps (80% de 1 répétition maximale, RM), et aérobie (AER), alternant un travail intermittent long sur vélo (6×5 min à VO_{2max}) et continu en course à pied,

reposaient respectivement sur cinq et six séances par semaine. Le troisième groupe, combiné (COMB), cumulait les charges d'entraînement de force et d'endurance pour un total donc de 11 séquences par semaine. Les gains de force maximale, mesurés en $\frac{1}{2}$ squat, étaient similaires durant la première partie du protocole (5-6 semaines) pour FOR et COMB. Hickson observait ensuite des différences de réponses entre les deux groupes durant les trois dernières semaines d'entraînement avec une augmentation constante de la force maximale pour FOR et une régression pour COMB (figure 1). Dans cette même étude, la consommation maximale d'oxygène (VO_{2max}) mesurée sur vélo et tapis roulant augmentait de manière significative (20-25%) pour les groupes AER et COMB. Evidemment, aucun gain significatif de VO_{2max} n'était observé pour FOR. Ces résultats suggèrent fortement que la combinaison des entraînements force/endurance au sein d'une même programmation induit un phénomène d'interférence sur les adaptations neuromusculaires et non sur la puissance aérobie (VO_{2max}). L'entraînement de force ne semble donc pas interférer sur le développement du potentiel aérobie.

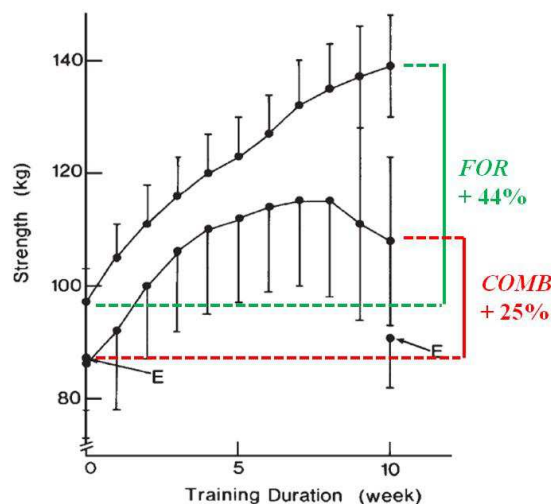


Figure 1. Interférence de l'entraînement d'endurance sur le développement de la force durant une période d'entraînement combinée.

E=endurance. Figure de Hickson (1980) tirée de la revue de Nader (2006).

1.2 Effets de l'endurance sur la production de force

Depuis les travaux de Hickson (1980), de nombreuses études se sont succédées et ont mis en évidence l'interférence de l'endurance sur le développement de la force (Bell et coll., 2000; Craig et coll., 1991; Dudley & Djamil, 1985 ; Hennessy et Watson, 1994 ; Kraemer et coll., 1995 ; Lee et coll., 1990). Ce phénomène a été constaté et vérifié sur plusieurs variables dépendantes, représentatives des qualités de développement de la force; soit dans des conditions isotoniques au moyen d'un 1RM, au cours de mouvements pluri-articulaires (presse, $\frac{1}{2}$ squat) (Craig et coll., 1991; Hennessy & Watson, 1994; Kraemer et coll., 1995; Lee et coll., 1990), soit dans des conditions isocinétiques (Dudley & Djamil, 1985; Glowacki et coll., 2004) au cours de mouvement mono-articulaire. Ces résultats nous montrent donc que le phénomène d'interférence serait indépendant des variables mesurées (tableau 1).

Une récente méta-analyse (Wilson, 2012), sur la base de toutes les études validées publiées à ce jour, a permis d'identifier plus précisément les effets des entraînements combinés sur différents paramètres de la production de force. D'après celle-ci, les gains de masse musculaire et de production de force à vitesse lente semblent similaires, que les sujets aient été entraînés en force, ou aient suivi un entraînement combiné. La masse musculaire d'un individu étant étroitement liée à la force en mode isométrique (Maughan et coll., 1982), cela justifierait qu'aucune étude n'ait montré, à notre connaissance, une interférence sur le développement de la force maximale isométrique (McCarthy et coll., 1995, 2002). L'effet interférentiel n'est donc pas observé systématiquement au sein de chaque étude (tableau 2). La production de force à vitesse élevée serait quant à elle davantage sensible à la combinaison des entraînements (Wilson, 2012). Pour preuve, le moment musculaire des extenseurs du genou, développé à de hautes vitesses de contraction ($>100^{\circ}\cdot s^{-1}$), semblerait altéré à la suite d'une période d'entraînement combiné malgré un entraînement en force à vitesse rapide ($240^{\circ}\cdot s^{-1}$) (Dudley et Djamil, 1985). Ces données ont été confirmées par une altération du couple des fléchisseurs et extenseurs de la jambe à une vitesse de $180^{\circ}\cdot s^{-1}$ suite à 12 semaines d'entraînements (Glowacki et coll., 2004). Dans cette dernière étude, les gains de force à vitesse lente, mesurés sur un mouvement du bas du corps (presse), étaient quant à eux identiques suite à FOR et COMB. L'amélioration de la production de force dépend en partie de la levée d'un mécanisme inhibiteur de protection, agissant principalement à des vitesses de contraction lentes chez des sujets peu entraînés (Caiozzo & Perrine, 1981; Babault et coll., 2001). Ce mécanisme empêcherait le développement de forces excessives (Gandevia et coll., 1995), et permettrait d'éviter des lésions de la structure musculaire (Stauber, 1989). Il pourrait

également restreindre le recrutement des unités motrices endommagées ou vulnérables. Les récepteurs articulaires, les organes tendineux de Golgi, les terminaisons nerveuses libres du groupe III et IV ou les récepteurs cutanés seraient à l'origine de ce mécanisme protecteur (Sale 1988). Une période d'entraînement de la force permet de réduire ou d'annihiler les effets du mécanisme régulateur de tension (Amiridis et coll. 1996). Cela pourrait alors expliquer les moindres interférences sur le développement de la force maximale (vitesse lente) suite aux périodes d'entraînements combinés.

Hakkinen et coll., (2003) ont mis en évidence une interférence sur le développement du temps de montée en force (rate of force development, RFD) suite à COMB. Ces auteurs expliqueraient ce phénomène par une perturbation de l'activation neuronale des unités motrices musculaires, identifiée par une diminution de l'activité électromyographique (EMG) du muscle *vastus lateralis* (VL), durant les premières 500 ms de la contraction musculaire (tableau 1).

Les précédentes interférences sur les paramètres de production de force à vitesse rapide et d'explosivité, mises en évidence dans des conditions mono-articulaires, s'accompagnent également par une altération de la performance mesurée lors de mouvements globaux. En effet, les gains de détente verticale et de vitesse sur 20 m sembleraient également perturbés à l'issue d'une période d'entraînement combiné de 8 semaines et une fréquence d'entraînement de 5 séances/semaine (Hennessy et Watson, 1994). Un résultat identique sur la détente verticale a été proposé par Hunter et coll., (1987) mais cette fois-ci à l'issue de 12 semaines d'entraînement et une fréquence de séances légèrement plus faible (4/semaine) (tableau 1).

Les précédentes études, concluant sur un effet interférentiel des entraînements combinés sur le développement de la production de force à vitesse rapide, l'explosivité et la puissance se distinguent entre elles par le volume et le contenu des entraînements. Il paraît alors difficile d'expliquer cet effet tant les procédures expérimentales sont différentes d'une étude à l'autre. Toutes les études traitant de la problématique des entraînements combinés ne mettent pas forcément en évidence le phénomène interférentiel sur le développement des qualités neuromusculaires. Cela s'expliquerait en partie par des différences au niveau des procédures expérimentales (tableau 2).

1.3 Effets de l'endurance sur les différents groupes musculaires

Certaines disciplines sportives, en plus des qualités aérobies, requièrent des qualités de force et de puissance de l'ensemble de la musculature, des membres supérieurs, inférieurs, mais aussi du tronc et des lombes (sport de combat, rugby, handball...). Quelques études (Craig et coll., 1991 ; Izquierdo et coll., 2005 ; Kraemer et coll., 1995 ; Lee et coll., 1990) se sont alors interrogées sur la compatibilité des entraînements d'endurance, sollicitant principalement les muscles du bas du corps, avec les entraînements de musculation dont l'objectif sera d'optimiser la force maximale des membres inférieurs et supérieurs. Les principaux résultats nous confirment une perturbation des gains de 1RM à la presse (sollicitant les muscles des membres inférieurs) suite à des périodes d'entraînements de 10 semaines (Craig et coll., 1991; Lee et coll., 1990). En revanche, le développement de la force maximale (1RM) des membres supérieurs, mesurée au cours d'un mouvement de développé-couché (DC), ne semble pas altéré par la réalisation d'exercices d'endurance (Craig et coll., 1991 ; Lee et coll., 1990). Ce résultat semble assez logique dans la mesure où les muscles des membres inférieurs, principalement sollicités par les exercices d'endurance, pourraient ne pas tolérer le volume d'entraînement optimal à appliquer au cours des exercices de musculation, et par conséquent, voir leurs réponses adaptatives moins complètes que lors d'un entraînement en musculation seul (cf 2.1). L'interférence se porterait alors sur les groupes musculaires sollicités prioritairement au cours des deux types d'efforts. Cependant, un résultat contradictoire a été mis en avant à la suite d'un programme d'entraînement de 16 semaines, auprès certes d'une population d'une tranche d'âge différente (40 à 46 ans) de celles de jeunes sportifs le plus souvent étudiés dans ce contexte. Dans cette étude, l'interférence semblerait se porter sur le développement de la puissance musculaire du haut du corps, mesurée sur un mouvement de DC, malgré l'application d'un entraînement d'endurance sur vélo.

Les études citées précédemment, mettant en avant l'effet interférentiel de l'entraînement d'endurance sur le développement de la force, sont regroupées dans le tableau 1.

Tableau 1. Interférences sur le développement des différents paramètres de la production de force

	Procédures expérimentales	Gains de performance et adaptations
Bell et coll., (1997)	Durée	16 sem
	Groupes expérimentaux	FOR et COMB
	FOR	3 séances/sem, isoinertiel, Fmax et hyp mixte
	AER	3 séances/sem, CONT et INT long en rameur
Bell et coll., (2000)	COMB	6 séances/sem, jours différents
	Durée	12 sem
	Groupes expérimentaux	FOR et COMB
	FOR	3 séances/sem, isoinertiel, Fmax et hyp mixte
Craig et coll., (1991)	AER	3 séances/sem, 2 séances CONT et 1 séance INT
	COMB	6 séances/sem (jours différents)
	Durée	10 sem
	Groupes expérimentaux	FOR, AER et COMB
Dudley & Djamil (1985)	FOR	3 séances/sem, isoinertiel, Fmax et hyp mixte
	AER	3 séances/sem, CONT en CAP
	COMB	6 séances/sem (mêmes jours), AER puis FOR (R:0h)
	Durée	7 sem
Gergley et coll., (2009)	Groupes expérimentaux	FOR, AER et COMB
	FOR	2 séances/sem, isoinertiel, hyp bas
	AER	2 séances/sem, CONT marche ou vélo
	COMB marche	4 séances/sem (jours différents)
Hakkinen et coll., (2003)	COMB vélo	4 séances/sem (jours différents)
	Durée	21 sem
	Groupes expérimentaux	FOR et COMB
	FOR	2 séances/sem, isoinertiel, Fmax, Fexplo et hyp mixte
Hennessy & Watson (1994)	AER	2 séances/sem, CONT, vélo et CAP
	COMB	4 séances/sem (jours différents)
	Durée	8 sem
	Groupes expérimentaux	FOR, AER et COMB
Hickson (1980)	FOR	3 séances/sem, isoinertiel, Fmax et hyp mixte
	AER	4 séances/sem, CONT et fartlek en CAP
	COMB	7 séances/sem (mêmes jours et jours différents)
	Durée	10 sem
Hunter et coll., (1987)	Groupes expérimentaux	FOR, AER et COMB
	FOR	4 séances/sem, isoinertiel, hyp mixte
	AER	4 séances/sem, CONT en CAP
	COMB	8 séances/sem (mêmes jours et jours différents)
Izquierdo et coll., (2005)	Durée	16 sem
	Groupes expérimentaux	FOR, AER et COMB
	FOR	2 séances/sem, isoinertiel, Fmax et Fexplo mixte
	AER	2 séances/sem, CONT et INT court sur vélo
Kraemer et coll., (1995)	COMB	2 séances/sem, 1 de chaque qualité (jours différents)
	Durée	12 semaines
	Groupes expérimentaux	FOR, AER et COMB
	FOR	4 séances/sem, isoinertiel, Fmax et hyp mixte
Lee et coll., (1990)	AER	4 séances/sem, INT et CONT en CAP
	COMB	8 séances/sem (mêmes jours); AER puis FOR (R: 6h)
	Durée	10 sem
	Groupes expérimentaux	FOR, AER et COMB
Putman et coll., (2004)	FOR	3 séances/sem, isoinertiel, Fmax et hyp mixte
	AER	3 séances/sem, CONT et INT long, vélo
	COMB	6 séances/sem (jours différents)
	Durée	12 sem

AER: aérobic, FOR: force, COMB: combiné, sem: semaine, Fmax: force maximale, hyp: hypertrophie, MM: moment musculaire, Ø: diamètre, m: masse, SV: seuil ventilatoire, SDH: succinate dehydrogenase, T/C: testostérone:cortisol, INT: intermittent, CONT: continu, CAP: course à pied. VO_{2max} : consommation maximale d'oxygène. La population concernée par ces études était peu entraînée.

Tableau 2. Absence d'interférence sur le développement des différents paramètres de la production de force

		Procédures expérimentales	Gains de performance et adaptations
Abernethy & Quigley (1993)	Durée	7 sem	
	Groupes expérimentaux	FOR, AER et COMB	MM : FOR = AER = COMB
	FOR	3 séances/sem, isocinétisme haut, vitesse rapide	VO _{2max} : AER = COMB
	AER	3 séances/sem, INT long sur ergocycle à bras	
Bell et coll. (1991)	COMB	6 séances/sem, jours différents	
	Durée	12 sem	
	Groupes expérimentaux	FOR ET COMB	MM : FOR = COMB
	FOR	3 séances/sem	Ø quadriceps : FOR = COMB
Kraemer et coll., (2004)	AER	3 séances/sem	
	COMB	6 séances/sem, jours différents	
	Durée	12 sem	
	Groupes expérimentaux	FOR, AER et COMB	End musculaire haut : FOR = COMB
McCarthy et coll., (1995)	FOR	4 séances/sem, isoinertielle, F max et hyp mixte	Puissance bas : FOR = COMB
	AER	4 séances/sem, CONT et INT court en CAP	Perf en CAP (avec et sans lesté) : AER = COMB
	COMB	8 séances/sem, mêmes jours, AER puis FOR (R: 6h)	
	Durée	10 sem	
McCarthy et coll., (2002)	Groupes expérimentaux	FOR, AER et COMB	1RM bas et FMI : FOR = COMB
	FOR	3 séances/sem, isoinertielle, Fmax et hyp mixte	Puissance bas : FOR = COMB
	AER	3 séances/sem, CONT en vélo	M maigre : FOR = COMB
	COMB	6 séances/sem, mêmes jours, ordre alterné, R-20 min	VO _{2pic} : AER = COMB
Shaw et coll., (2009)	Durée	10 sem	
	Groupes expérimentaux	FOR, AER et COMB	FMI : FOR = COMB
	FOR	3 séances/sem, isoinertielle, Fmax mixte	Ø cuisse et fibres II : FOR = COMB
	AER	3 séances/sem, CONT en vélo	
	COMB	6 séances/sem, mêmes jours, ordre alterné, R-20 min	
	Durée	16 sem	
	Groupes expérimentaux	FOR ET COMB	1RM bas et haut : FOR = COMB
	FOR	3 séances/sem, isoinertielle, hyp mixte	
	AER	3 séances/sem, CONT en CAP, vélo, rameur et stepper	
	COMB	6 séances/sem, FOR puis AER (R: 0h)	

AER: aérobic, FOR: force, COMB: combiné, sem: semaine, Fmax: force maximale, hyp: hypertrophie, MM: moment musculaire, Ø: diamètre, m: masse, end musculaire: endurance musculaire, INT: intermittent, CONT: continu, CAP: course à pied. VO_{2max}: consommation maximale d'oxygène. La population concernée par ces études était peu entraînée.

1.4 Effets de l'entraînement de force sur les performances en endurance

Les entraînements combinés ont rarement été associés à des perturbations du développement du potentiel aérobie. A notre connaissance, seules trois études (Dolezal et Potteiger, 1998; Glowacki et coll., 2004; Nelson et coll., 2000) ont montré un effet négatif de COMB sur les gains de VO_{2max} à l'issue de la période d'entraînement chez des sujets peu entraînés. Les auteurs ont interprété ces résultats par une dilution du volume mitochondrial, liée à l'hypertrophie musculaire induite par l'entraînement de force, ainsi que par une plus faible activité des enzymes oxydatives telles que la citrate synthase (Glowacki et coll., 2004; Nelson et coll., 1990). L'hétérogénéité des groupes, avec des valeurs initiales élevées de VO_{2max} pour COMB, pourraient également justifier les plus faibles gains de ce paramètre (Glowacki et coll., 2004) (tableau 3). Malgré les résultats de ces trois précédentes études, la tendance générale de la littérature ne permet pas de confirmer un effet interférentiel reproductible sur le développement du potentiel oxydatif dans le cadre des entraînements combinés (Abernethy et Quigley, 1993; Bell et coll., 2000; Craig et coll., 1991; Dudley et Djamil, 1985; Hickson, 1980; Hennessy & Watson, 1994; Hunter et coll., 1987; Kraemer et coll., 1995; McCarthy et coll., 1995). Plusieurs auteurs se sont d'ailleurs questionnés sur l'optimisation de la performance d'endurance à travers l'association avec un programme adapté en force (Tanaka & Swensen, 1998).

Tableau 3. Interférences sur le développement des qualités énergétiques et neuromusculaires

	Procédures expérimentales	Gains de performance et adaptations
Dolezal & Potteiger (1998)	Durée	10 sem
	Groupes expérimentaux	FOR, AER et COMB
	FOR	3 séances/sem, isoinertielle, Fmax et hyp mixte
	AER	3 séances/sem, CONT en CAP
	COMB	6 séances/sem, mêmes jours, FOR+AER, R: 0h
Glowacki et coll., (2004)	Durée	12 sem
	Groupes expérimentaux	FOR, AER et COMB
	FOR	2 ou 3 séances/sem, isoinertielle, hyp, mixte
	AER	2 ou 3 séances/sem, CONT en CAP
	COMB	5 séances/sem, jours différents
Nelson et coll., (1990)	Durée	20 sem
	Groupes expérimentaux	FOR, AER et COMB
	FOR	4 séances/sem, isocinétisme, vitesse lente, bas
	AER	4 séances/sem, CONT en vélo
	COMB	8 séances/sem, mêmes jours, FOR+AER, R: 10 min

AER: aérobie, FOR: force, COMB: combiné, sem: semaine, Fmax: force maximale, hyp: hypertrophie, MM: moment musculaire, m: masse, PMA: puissance maximale aérobie, CONT: continu, CAP: course à pied. VO_{2max} : consommation maximale d'oxygène.

La population concernée par ces études était peu entraînée.

La performance au cours d'une discipline de longue durée semble dépendre à la fois du potentiel aérobie (transport et utilisation de l'oxygène) et anaérobie (glycolyse, stock et utilisation de la PCr, pouvoir tampon) mais aussi des qualités neuromusculaires (contrôle nerveux, raideur et élasticité musculaire) optimisant la puissance musculaire et l'économie de course (Noakes, 1988). Plusieurs études (Bastiaans et coll. 2001; Bishop et coll., 1999; Millet et coll., 2002; Paavolainen et coll., 1999; Paton & Hopkins, 2005; Saunders et coll., 2006; Spurr et coll., 2003) se sont alors intéressées à mesurer les effets d'un travail de force et d'explosivité sur la performance d'endurance (Yamamoto et coll., 2008-2010). La plupart d'entre elles consistaient à ajouter des entraînements de force à la charge de travail d'endurance existante. Spurr et coll., (2003) ont indiqué un gain de performance de 3,1%, sur une distance de course de 3 km, associé à une amélioration de l'économie de course de 4%, à la suite de 6 semaines d'entraînement combinant aérobie et force explosive (vitesse et pliométrie). D'autres travaux ont indiqué des gains d'économie de course suite à des périodes d'entraînements d'endurance associées à un travail de force explosive (Saunders et coll., 2006) ou de force maximale (Millet et coll., 2002). Ces auteurs ne s'étaient pas intéressés à l'impact de ces gains sur la performance de course mais constataient tout de même un maintien des capacités oxydatives (cinétique de VO_2 , seuil ventilatoire, ...). Par contre, aucune amélioration de la performance en cyclisme n'avait été observée lorsque les entraînements proposés consistaient en un travail d'endurance de force (Bishop et coll., 1999). Ces quelques études semblent donc suggérer que l'entraînement de force maximale et/ou de force explosive est plus efficace pour optimiser les qualités neuromusculaires responsables de l'amélioration de la puissance et de l'économie de course que le développement de l'endurance de force (Rønnestad & Mujika, 2013; Yamamoto et coll., 2008-2010).

L'ajout de séances de force aux entraînements d'endurance pourrait, à terme, induire un état de surmenage chez le sportif. Afin d'optimiser la durée des entraînements et d'améliorer leur tolérance, plusieurs auteurs (Bastiaans et coll., 2001; Hickson et coll., 1988; Mikkola et coll., 2007; Paavolainen et coll., 1999; Paton & Hopkins, 2005) se sont intéressés à vérifier les conséquences de la substitution d'une partie de la charge de travail aérobie par un entraînement de force. Les principaux résultats traduisaient un gain de la performance d'endurance, en course à pied (Paavolainen et coll., 1999) ou en cyclisme (Bastiaans et coll., 2001; Hickson et coll., 1988, Paton & Hopkins, 2005). Malgré une réduction de la charge de travail aérobie de 32% au profit d'un entraînement de force explosive (pliométrie), Paavolainen et coll., (1999) ont observé des gains de performance de 2,7% sur une distance de course de 5 km. Ceux-ci étaient associés à une amélioration de l'économie de course et de la

puissance anaérobie suite à 9 semaines d'entraînement combiné. Cette étude concluait donc à des gains de la performance spécifique (en endurance), probablement grâce à une optimisation des qualités neuromusculaires. Une étude similaire a vérifié les effets d'une suppléance de 19% du volume d'entraînement d'endurance par de la force (Mikkola et coll., 2007). Aucune amélioration de la vitesse maximale aérobie (VMA) n'a été mesurée à l'issue des 8 semaines d'entraînement et ce malgré un gain de la puissance anaérobie (Mikkola et coll., 2007). Un faible volume de force ne semble donc pas suffisant pour optimiser la performance en course à pied. Notons qu'aucun changement des valeurs de VO_{2max} ou d'autres variables physiologiques représentatives des qualités aérobies n'était constaté à la fin de ces expérimentations.

La performance en cyclisme chez des sujets entraînés, mesurée au cours d'une épreuve de courte distance ou un temps limite, semblerait également optimisée lorsque l'entraînement de force remplace une partie de l'entraînement aérobie (Bastiaans et coll. 2001; Paton & Hopkins, 2005). Le remplacement de 37% du volume d'entraînement d'endurance par une charge de travail de force explosive améliorerait de 7% la puissance musculaire maximale des membres inférieurs. Celle-ci préviendrait alors la diminution de performance au cours d'un test de courte durée à l'inverse d'un entraînement d'endurance seul (Bastiaans et coll., 2011). Egalement, le remplacement d'une partie de l'entraînement de cyclisme par des séances de force explosive permettrait une amélioration de la performance sur des courtes distances de course (1 et 4 km) (Paton & Hopkins, 2005). Ces gains de performance pourraient s'expliquer par des adaptations nerveuses, telles que l'augmentation du recrutement spatial et temporel des unités motrices. Finalement, ces travaux concluaient à des gains de la performance aérobie grâce notamment à une optimisation des caractéristiques neuromusculaires.

Les effets de l'entraînement de force ont également été mesurés dans des disciplines aérobies où le facteur technique est déterminant (Tanaka et Swensen, 1998). La force et la puissance maximale du haut du corps sembleraient être positivement corrélées à la vitesse de nage sur des courtes ($r=0,87$) et longues distances ($r=0,63$) (Costill et coll., 1980; Hawley et Williams, 1991). Ainsi, l'entraînement de musculation, à travers sa capacité à améliorer la force et la puissance musculaire, devrait optimiser la performance spécifique en natation. L'ensemble des études réalisées sur cette thématique ne confirment pas cette hypothèse (Tanaka et coll., 1993). Malgré des gains d'approximativement 30% de la force du haut du corps induits par l'entraînement combiné, la performance au cours d'une épreuve de sprint chez des jeunes nageurs n'était pas améliorée (Tanaka et coll., 1993). Les mouvements des bras en natation étant très spécifiques et techniques, on a formulé l'hypothèse que les gains de

force n'avaient pas obligatoirement de conséquences sur la performance spécifique. En revanche, un entraînement associant à la natation des exercices de force spécifique, réalisés dans et hors de l'eau, améliorerait davantage la performance par rapport à un entraînement de natation seul ou combiné avec un travail de musculation « classique » (Toussaint et Vervoorn, 1990). Cela pourrait s'expliquer par une production de force supérieure et par conséquent une plus grande distance parcourue à chaque mouvement de bras (Bulgakova et coll., 1990). Des résultats similaires ont été proposés chez des skieurs de fond. Trois séances de force par semaine, réalisées au moyen d'une poulie spécifique, induiraient des adaptations nerveuses se traduisant par une amélioration du temps de montée en force. Celles-ci optimiseraient l'économie de course et améliorerait donc la performance spécifique mesurée à l'issue d'un temps limite (6,49 min vs. 10,18min) (Hoff et coll., 2002). L'entraînement de force spécifique, dont l'objectif est d'optimiser le geste technique via différentes adaptations neuromusculaires, semble donc de grande importance pour améliorer la performance d'endurance.

L'entraînement de force, orienté sur le développement de l'explosivité et de la puissance, semble intéressant pour le sportif entraîné en endurance (Paavolainen et coll., 1999 ; Spurr et coll., 2003). Les auteurs insistent cependant sur le contrôle du volume d'entraînement de manière à ne pas encourir le risque de surmenage ou de surentraînement (Bastiaans et coll. 2001; Paton & Hopkins, 2005). Des entraînements de force spécifiques à la discipline seraient plus efficaces pour améliorer la performance qu'un entraînement de musculation classique (Tanaka et Swensen, 1998).

Cette première partie du cadre théorique nous aura permis de mettre partiellement en évidence l'incompatibilité des entraînements de force et d'endurance. L'entraînement aérobie semble freiner les adaptations neuromusculaires et par conséquent les gains de force. L'interférence semble prioritairement intervenir sur les paramètres de production de force à vitesse rapide, d'explosivité et de puissance. Egalement, elle concernerait principalement les groupes musculaires sollicités au cours des deux types d'entraînements. A l'inverse, l'entraînement de force ne semble pas altérer la puissance et la capacité aérobie du sportif. Il semble même bénéfique pour la performance d'endurance lorsqu'un faible volume d'entraînement se substitue ou s'ajoute au volume de travail aérobie.

2. Mécanismes explicatifs de l'altération des adaptations neuromusculaires

Plusieurs mécanismes ont été mis en avant pour expliquer la réduction des adaptations de force dans le cadre des entraînements combinés (Dudley & Fleck, 1987). Les hypothèses de fatigue et de réponses physiologiques contradictoires, aiguës et chroniques, ont été proposées et seront détaillées au sein de cette deuxième partie (Craig et coll., 1991).

2.1 La fatigue

▪ La fatigue aiguë

L'hypothèse aiguë sous entend que la fatigue induite par un effort trop important et répété compromettrait la quantité de travail d'un effort suivant et le développement de ses réponses adaptatives spécifiques.

Dans le contexte d'un entraînement combiné, la séance d'endurance réalisée en premier, altérerait la capacité à développer des tensions musculaires maximales lors de la séance de force, réalisée ensuite (Craig et coll., 1991). Cette baisse de la charge de travail musculaire freinerait alors les réponses adaptatives physiologiques, dont le développement de la force (Atha, 1981). Nous traiterons, ci-dessous, à titre d'exemple, de quelques mécanismes physiologiques à l'origine de cet état de fatigue physiologique (Leveritt et coll., 1999).

L'altération significative de la force maximale isométrique des muscles extenseurs du genou a été mise en évidence, 6 heures après une séance d'endurance sur ergocycle, d'intensité modérée à intense (80 à 120% de la VO_{2max}) (Bentley et coll., 2000). Cette altération était accompagnée d'une diminution du niveau d'activation maximale volontaire et de l'activité EMG, suggérant alors l'apparition d'une fatigue d'origine centrale. Une diminution de la force évoquée par un train de stimulation (100Hz) était également mesurée et impliquait alors des facteurs périphériques, et notamment l'altération du couplage excitation-contraction, dans l'explication de cette fatigue aiguë (Duchateau & Hainaut, 1985).

Une séance d'endurance prolongée induit une réduction significative des niveaux de glycogène musculaire (Gollnick et coll., 1974). L'importance du glucose a clairement été établie au cours des exercices aérobies (Costill et coll., 1980), mais également au cours des exercices de force (Tesch et coll., 1986). En effet, les performances musculaires sont améliorées par l'apport de glucides, dès lors que les réserves musculaires en glycogène ont été

altérées. Il semblerait alors plausible que la réduction de la concentration en glycogène musculaire, induit par l'effort d'endurance préalable, perturbe la production optimale de force, surtout si l'exercice d'endurance est intense et s'est prolongé au-delà de 45 min. Plusieurs études ont confirmé ces propos en mettant en avant une réduction de la force maximale isométrique (Hepburn et coll., 1982) et isoinertielle (Leveritt & Abernethy, 1999) suite à un programme de restriction en glucides. Des faibles concentrations de glycogène musculaire accentuent sans aucun doute la fatigue induite par l'exercice (Young & Davies, 1984). La déplétion en glycogène musculaire modifie le transfert du calcium, réduisant ainsi l'optimisation de la concentration musculaire. Dans certaines conditions de programmation de l'entraînement (durée de l'exercice aérobie, absence de prise alimentaire et de récupération, etc), l'exercice aérobie peut être à l'origine, au moins partiellement, d'une fatigue aigue d'origine métabolique par défaut de disponibilité de substrats énergétiques rapidement utilisables.

D'autres mécanismes périphériques, tels que l'accumulation de métabolites issus de la contraction musculaire (Phosphate inorganique, Pi; ions H^+ ; ammonium) peuvent expliquer cette fatigue aigue (MacLaren et coll., 1989). Dans le muscle en contraction, les expérimentations animales montrent que les concentrations de Pi augmentent proportionnellement à la diminution des concentrations de phosphocréatine. Cette corrélation négative semble être liée à l'apparition progressive de la fatigue périphérique (Baker et coll., 1994; Dawson et coll., 1978; Weiner et coll., 1990; Wilkie, 1986). La relation entre le degré de fatigue et la production de Pi est vérifiée par des expérimentations sur des fibres glycinées (sans sarcolemme) isolées et plongées dans des concentrations croissantes en Pi qui inhibent par conséquent la contraction (Cooke & Pate, 1989). Les raisons pour lesquelles le Pi intervient dans le mécanisme de fatigue demeurent inconnues. Westerblad et coll. (1998) stipulent l'intervention directe des ions Pi au niveau des ponts « actine-myosine ». Toutefois, cette hypothèse ne repose sur aucun argument démontré au niveau moléculaire. Par utilisation des techniques de biopsies chez l'homme, les relations entre l'accumulation du lactate intracellulaire et la fatigue périphérique ont été maintes fois observées (Karlsson et coll., 1975). Plusieurs revues y sont d'ailleurs consacrées (Fitts, 1994; Fitts, 1996). Bien qu'il existe une relation entre l'augmentation de la concentration intramusculaire de lactate et la diminution des performances lors d'exercices intensifs, il est généralement admis que les ions lactates ne sont pas directement impliqués dans l'apparition de la fatigue périphérique (Fitts, 1994). Ce sont les ions H^+ libérés par la glycolyse et la glycogénolyse qui sont directement impliqués dans les processus de fatigue musculaire. Les exercices de fatigue menés jusqu'à

épuisement induisent une augmentation de la concentration d'ions H^+ et donc une diminution du pH musculaire. L'association entre l'acidose musculaire et l'apparition de la fatigue a été observée chez l'homme (Sahlin et coll., 1983). Cette relation est démontrée dès 1977 par Jones et coll., qui établissent qu'une acidose métabolique, due à l'ingestion de chlorure d'ammonium, est associée à une diminution de la performance lors d'exercices d'intensité élevée sur ergocycle. Ces protons peuvent agir à divers niveaux du cycle de la contraction musculaire (transfert calcique, ponts « actine-myosine », fonctionnement enzymatique).

Plusieurs auteurs se sont intéressés aux dommages musculaires induits par des exercices de musculation et ont reporté des diminutions de production de force après des exercices musculaires à forte composante excentrique (Clarkson & Tremblay, 1988 ; Newham et coll., 1987). Une séance d'endurance, sous forme de course à pied, implique une sollicitation excentrique importante, pouvant induire des microtraumatismes et des douleurs musculaires supérieurs à ceux perçus suite à des contractions concentriques (Gergley, 2009 ; ACSM, 2000). L'état de fatigue qui est alors de nature post-traumatique pourrait alors directement influencer la performance de force lorsque celle-ci intervient après l'entraînement d'endurance. Ces propos sont confirmés par Wilson et coll. (2012) concluant que l'entraînement en course à pied aurait des effets inhibiteurs plus marqués sur le développement de la force et de la masse musculaire que l'entraînement en cyclisme. En effet, l'effort de pédalage est principalement associé à des contractions concentriques, moins traumatisantes pour le muscle.

Une étude récente s'est intéressée à mesurer l'effet de la fatigue induite par des exercices de force maximale et d'endurance de force sur différents facteurs associés à la performance d'endurance continue et intermittente (De Souza et coll., 2011). Les résultats n'ont montré aucune altération de la fréquence cardiaque, de la concentration de lactate sanguin et de la VO_2 mesurée à différents instants de la course. Une séance de force, localisée aux membres inférieurs, ne semble donc pas perturber la performance aérobie suivante (De Souza et coll., 2011). Une conclusion différente a été proposée par Drummond et coll., (2005), mettant en avant une augmentation de la VO_2 à l'effort et de la perception de la difficulté de l'exercice. Selon les auteurs, leurs résultats s'expliqueraient par la pratique d'exercice de musculation sollicitant des groupes musculaires étendus, ce qui induit une hausse significative de la dépense énergétique de repos. Cela aurait une incidence directe sur l'augmentation de la VO_2 à l'effort.

L'interférence sur le développement de la force peut aussi s'expliquer par la fatigue aigue induite par l'exercice aérobie préalable. Celle-ci pourrait dépendre de facteurs centraux, périphériques et métaboliques. La fatigue est largement dépendante du type d'effort réalisé et peut donc présenter des effets variables sur l'effort subséquent. L'accumulation de fatigue aigue peut, à terme, conduire le sportif dans un état de surmenage. Voyons maintenant quelle peut être la part de ce mécanisme dans l'apparition du phénomène d'interférence.

▪ La fatigue chronique : le surmenage

La plupart des études portant sur le thème des entraînements combinés incluaient au minimum trois groupes expérimentaux (FOR, AER et COMB). La charge d'entraînement de COMB était alors conséquente puisqu'elle additionnait celles de FOR et AER. Les participants réalisaient donc deux fois plus d'entraînements que les autres (Leveritt et coll., 1999). Cette configuration pourrait alors induire un état de surmenage interférant sur les performances physiques réalisées à la fin du programme d'entraînement. Ce concept est tout de même contesté car plusieurs études nous montrent que les altérations sur la performance de force peuvent également être observées à l'issue d'une procédure expérimentale proposant une très faible charge d'entraînement. Prenons alors l'exemple des travaux de Dudley & Djamil (1985) dans lesquels FOR se résumait à trois séances de deux séries de 30 s d'extension du genou en isocinétisme, et AER, à trois séances de 5×5 min de pédalage entre 40 et 100% de la VO_{2max} . Dans l'étude d'Izquierdo et coll., (2005), le phénomène d'interférence a été confirmé à l'issue d'une période d'entraînement combiné dont le volume ne dépassait pas 2 entraînements par semaine (1 de force et 1 d'endurance). A l'inverse, d'autres études n'indiquent aucune interférence sur les performances de force et d'endurance malgré un volume de travail important, pouvant induire un état de surmenage. Par exemple, Kraemer et coll., (2004) ne constataient aucune altération des performances de force et d'endurance suite à 12 semaines d'entraînement combiné à raison de 8 séances/sem.

L'hypothèse du surmenage peut être alors être discutée. Ces résultats nous suggèrent donc qu'il n'est sans doute pas le seul mécanisme responsable du phénomène d'interférence (Deakin, 2004). Celui-ci pourrait également s'expliquer par des réponses physiologiques conflictuelles.

2.2 Les réponses physiologiques contradictoires

▪ Les adaptations moléculaires antagonistes

Nos propos, tout au long du prochain paragraphe, seront illustrés par la figure 2.

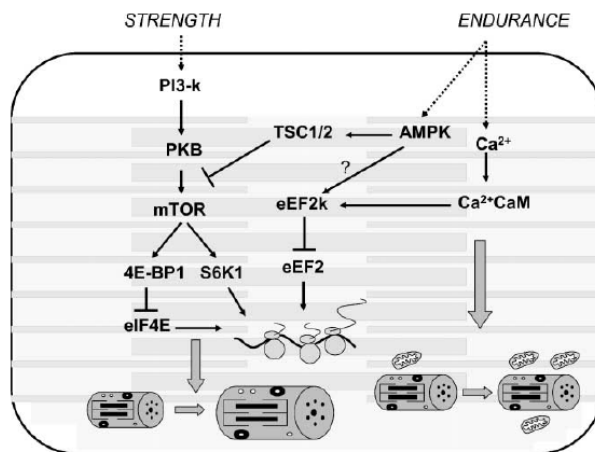


Figure 2. Modélisation des voies de signalisation moléculaires activées par les entraînements de force et d'endurance.

Tirée de la revue de Nader (2006)

Réponses cellulaires à l'exercice de musculation

Au sein du muscle, les réponses moléculaires à l'activité contractile sont spécifiques au type d'entraînement réalisé. Un exercice de force stimulera, entre autre, l'activation de voies de signalisation associées à la croissance musculaire (Nader, 2006). Plusieurs expérimentations, menées chez l'homme et la souris, démontrent que le travail musculaire intense induit un certain nombre de signaux cellulaires, dont des signaux de nature mécanique qui vont se traduire par l'activation d'une cascade d'enzymes (des kinases), qui à terme vont augmenter les synthèses protéiques musculaires. Ces kinases sont regroupées au sein d'une voie de signalisation et chaque kinase en activera une autre, ce qui constituera donc une cascade d'activation. La première de ces kinases activées par les signaux mécaniques (mais aussi hormonaux comme l'insuline, ou médiés par les facteurs de croissance comme IGF-1) est la phosphatidylinositol 3-kinase (PI3k). Nous pouvons également citer Akt (ou protéine kinase B) (Nader & Esser, 2001) et mammalian target of Rapamycin (mTOR) (Bolster et coll., 2003) parmi les autres kinases, cibles de PI3K. Les effecteurs les plus importants de cette voie

PI3K-Akt-mTOR sont des éléments qui vont constituer des ribosomes sur lesquels se feront les synthèses protéiques (protéine S6), lier les messagers génétiques (ARNm) aux ribosomes, et vont constituer le complexe d'initiation de la traduction des ARNm en protéines. Plusieurs travaux ont confirmé le rôle fondamental de $p70^{S6K}$ pour la croissance musculaire, notamment pour assurer la synthèse des ribosomes indispensables à la traduction des ARNm en protéines de contraction (Coffey and Hawley, 2007). Baar et Esser (1999), chez un modèle animal, établissaient une forte corrélation entre l'augmentation de l'activité de $p70^{S6K}$ et l'hypertrophie musculaire à la fin de 6 semaines d'entraînement de force simulé par des stimulations électriques de haute fréquence. Plus récemment, il a été montré, chez l'homme, que l'augmentation de la phosphorylation de $p70^{S6K}$ à la suite d'une séance de force, était corrélée significativement au pourcentage d'augmentation de la masse musculaire, de la surface moyenne de section (CSA) des fibres de type IIa et de différentes mesures de force maximale après 14 semaines d'entraînement de musculation (Terzis et coll., 2008).

Réponses cellulaires à l'exercice d'endurance

L'activité musculaire sous-maximale et répétée comme observée au cours d'un entraînement d'endurance induit des réponses adaptatives très différentes des entraînements en force. L'augmentation de la densité mitochondriale, qui est l'une des caractéristiques de l'entraînement en endurance, se traduit par l'augmentation des capacités du muscle à utiliser l'oxygène. L'augmentation des mitochondries dans le muscle est principalement associée à l'activation d'un complexe enzymatique très important, l'AMP-activated protein kinase (AMPK), qui représente un véritable capteur de l'état énergétique intracellulaire (Nader, 2006). L'activité de ce complexe enzymatique est très importante lors des changements de l'état énergétique de la cellule musculaire se traduisant par une augmentation du ratio AMP/ATP (Winder, 2001). Une activité contractile prolongée, telle qu'induite pendant des efforts d'endurance, se caractérise aussi par une augmentation de la concentration de calcium (Ca^{2+}) et permettrait également d'activer deux autres kinases, la calmodulin-dependent protein kinase (CaMK) et la kinase LKB1. Ces deux kinases (LKB1 et CaMKK) vont elles mêmes activer l'AMPK, dès lors que celle-ci sera sensibilisée par le remplacement d'une molécule d'ATP par une molécule d'AMP. L'AMPK induira ensuite la production d'un facteur de transcription essentiel (peroxisome proliferator-activated receptor-gamma coactivator-1-alpha, PGC-1 α) pour le développement des mitochondries (Little et coll., 2010). Un simple exercice prolongé d'endurance induirait chez l'homme une augmentation rapide de l'expression de PGC-1 α dans le muscle (Mathai et coll., 2008). Le facteur de transcription

PGC-1 α est directement transcrit par l'interaction de l'AMPK sur des sites spécifiques de reconnaissance situés sur la zone promotrice du gène, entre les 473^{ème} et 823^{ème} paires de bases (Irrcher et coll., 2008). D'autres facteurs sont connus pour moduler la transcription du gène PGC-1 α , dont la MAPkinase p38, mais l'activité de l'AMPK semble être de première importance pour le contrôle de l'expression de PGC-1 α (Lira et coll., 2010).

Interactions cellulaires au cours de l'exercice combiné

Les différentes voies de signalisation moléculaires, activées par les entraînements de force et d'endurance, peuvent agir négativement (Nader, 2006). Des résultats très importants, obtenus au cours de ces dernières années, ont permis de montrer que des voies de signalisation différentes peuvent interagir, se potentialiser ou s'inhiber. Par exemple, l'activation de l'AMPK exerce un contrôle négatif sur la synthèse protéique en inhibant l'activité de la kinase mTOR via l'activation du complexe tuberous sclerosis (TSC). L'augmentation non-physiologique de l'activité de l'AMPK, par l'ajout d'AICAR, est associée à une inhibition de l'activité de la voie de signalisation Akt-mTOR et à une diminution de 45% de la synthèse protéique (Bolster et coll., 2003). Un autre mécanisme potentiel de l'inhibition de la synthèse protéique pourrait concerner les flux de calcium, résultant d'une activité contractile prolongée. L'inhibition s'appliquerait cette fois-ci par l'intermédiaire de l'activation de la CaMK et de la phosphorylation d'eEF2, et donc de la baisse de son activité physiologique. L'AMPK peut elle aussi inhiber la synthèse protéique en activant directement la kinase eEF2K. Récemment, une étude s'est intéressée aux adaptations moléculaires à la suite d'une période d'entraînement combiné chez l'homme (De Souza et coll., 2013) (figure 3). Les résultats suggéraient des différences de réponses moléculaires à l'issue des 8 semaines d'entraînement avec des augmentations de la phosphorylation d'Akt pour le groupe force seul, et d'AMPK, pour le groupe endurance seul. Le groupe d'entraînement combiné était, quant à lui, marqué par une augmentation de la concentration p70^{S6K}. Malgré ces différences d'adaptation, aucune interférence n'a été observée sur le développement de la force maximale et de l'hypertrophie musculaire pour COMB (De Souza et coll., 2013) par rapport à FOR. Il est à noter que dans ce protocole expérimental, l'entraînement en FOR était de faible intensité, identique à la composante force de l'entraînement COMB, ce qui explique très probablement l'absence d'interférence. A notre connaissance, seule la précédente étude s'est intéressée conjointement aux adaptations moléculaires et de performances physiques suite à des entraînements de type FOR, AER et COMB. Aucun lien n'a été identifié entre ces deux types de réponses. Très récemment, de nouveaux inhibiteurs de la signalisation Akt-mTOR,

susceptibles d'expliquer l'effet interférent de l'endurance sur le développement de la masse musculaire, ont été identifiés (Chaillou et coll., 2013).

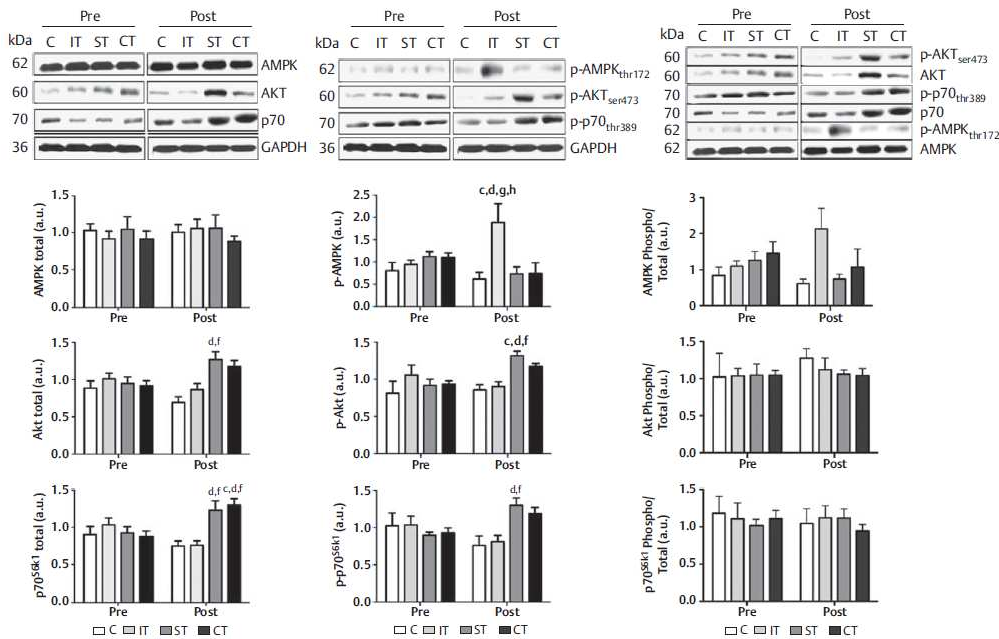


Figure 3. Expression des protéines AMPK, Akt et p70 S6K1 pour FOR, AER et COMB.
Tirée de l'article de De Souza (2013).

Quelques travaux se sont également centrés sur l'effet des interactions des différentes voies de signalisation sur la biogénèse mitochondriale (Cunningham et coll., 2007 ; Wang et coll., 2011). Les principaux résultats nous montrent qu'un entraînement d'endurance, directement suivi par un entraînement de force, stimulerait davantage la biogénèse mitochondriale en augmentant l'expression d'un facteur de transcription important, PGC-1 α notamment, en comparaison à AER. Le groupe expérimental COMB induirait également une activation conséquente de la voie Akt-mTOR, alors que celui d'endurance n'avait aucune influence sur cette voie de signalisation. L'optimisation de la stimulation de la biogénèse mitochondriale, suite à l'effort combiné, peut être liée à l'activation de mTOR, qui en plus de stimuler la synthèse protéique, augmenterait également l'expression des gènes mitochondriaux (Cunningham et coll., 2007). L'application d'une séance de force, peu de temps après un entraînement aérobie, optimiserait alors les adaptations aérobies. Il semblerait

pertinent de poursuivre cette analyse en s'intéressant aux adaptations moléculaires et à la performance physique associée suite à une période d'entraînement.

▪ Les adaptations physiologiques antagonistes

L'entraînement de chaque qualité physique (force ou aérobie) induit des adaptations spécifiques. Celles-ci sont bien connues et sont en partie présentées ci-dessous.

Les adaptations physiologiques liées à l'entraînement de force

L'entraînement de force peut induire des adaptations nerveuses allant du cortex moteur au niveau de la jonction neuromusculaire. L'amélioration de la commande nerveuse se traduirait par une augmentation du recrutement spatial et temporel des unités motrices. L'entraînement de force semblerait également réduire l'activité des mécanismes inhibiteurs (i.e., organes tendineux de Golgi). L'ensemble de ces adaptations nerveuses interviendrait préalablement aux changements structuraux du muscle squelettique (Ratamess, 2008).

L'amélioration de l'activation des unités motrices débute au niveau du cortex moteur. L'activité de ce dernier augmente conjointement avec le niveau de force développé (Dettmers et coll., 1996). Les adaptations nerveuses liées à l'entraînement de force peuvent également se traduire par une amélioration de la commande descendante vers les motoneurones, le long de la moelle épinière.

L'unité motrice correspond à l'unité fonctionnelle du système neuromusculaire (Sale, 1986). Elle se compose d'un motoneurone α et des fibres musculaires qu'il innerve. Le mécanisme expliquant partiellement le principe d'ordre de recrutement est le principe de taille. Les unités motrices de type lent, disposant de fibres musculaires de faibles diamètres, sont recrutées en premier. Si l'intensité de l'exercice augmente, les unités motrices de type II seront progressivement sollicitées (Henneman et coll., 1965). Une amélioration du recrutement spatial et temporel des unités motrices et de la synchronisation de celle-ci, à l'issue d'un entraînement de musculation, permet d'optimiser les gains de force et de puissance musculaire. La structure de la jonction neuromusculaire, correspondant à l'interface entre le nerf et le muscle squelettique, semblerait modifiée par un entraînement de force. L'augmentation de la surface de cette interface améliorerait par conséquent la transmission du signal nerveux (Deschenes et coll., 2000).

Les adaptations du muscle squelettique à l'entraînement de force consistent en une augmentation de la taille des fibres musculaires, une transition de la typologie des types de fibres ainsi qu'une adaptation du métabolisme énergétique et structurale (architecture, activité enzymatique, concentration de substrats) (Ratamess, 2008).

Plusieurs auteurs se sont intéressés à étudier les adaptations physiologiques résultant de l'entraînement de force (Costill et coll., 1979). Ce type d'entraînement a pour principal objectif d'augmenter la masse musculaire et d'améliorer les performances du muscle; le contrôle de la masse musculaire repose sur le contrôle respectif des synthèses et dégradations protéiques. A l'entraînement de force, ce sont surtout les modulations des synthèses protéiques qui ont été étudiées. On a montré que ces entraînements induisent une augmentation des synthèses myofibrillaires, via l'activation de la voie PI3K-Akt-mTOR, qui à terme résulte en une croissance du diamètre des fibres musculaires lentes de type I et rapides de type II (MacDougall, 1986). Cette croissance des protéines myofibrillaires, principalement contractiles a pour conséquence de diminuer la densité mitochondriale (Fleck & Kraemer, 1988). Les réponses hormonales à différentes formes d'entraînement ont largement été étudiées dans la littérature (Gotshalk et coll., 1997). La testostérone, souvent utilisée comme marqueur des réponses anaboliques, et le cortisol (ainsi que leurs dérivés), représentatif des influences cataboliques ont été classiquement utilisés comme marqueurs de l'anabolisme et du catabolisme musculaire (Leveritt et coll., 1999). La majeure partie des entraînements de force induirait une augmentation du ratio testostérone : cortisol, et stimulerait donc l'hypertrophie musculaire (Kraemer et coll., 1993).

Les fibres musculaires sont caractérisées selon plusieurs critères, dont leurs propriétés de contraction, et se positionnent sur un continuum qui va des fibres lentes aux fibres les plus rapides. Chez l'homme, le continuum est le suivant: I, Ic, IIc, IIac, IIa, IIax et IIx, selon le niveau d'expression des isoformes de chaînes de myosine (i.e., MHCI, IIa et IIx) (Staron, 1997). Les proportions des fibres I et II peuvent être modulées par l'entraînement en force. Le pourcentage de fibre de type IIa augmenterait au détriment du pourcentage de fibre de type IIx (Adams et coll., 1993; Staron et coll., 1994). L'équipement des fibres musculaires en isoformes de MHC est affecté par l'entraînement, ce qui fait que les fibres de type IIx se transforment progressivement en fibres de type IIa.

L'entraînement de force induit une augmentation de la densité en myofibrilles (MacDougall et coll., 1982), de la densité du reticulum sarcoplasmique et des tubules transverses ainsi que de l'activité de la myosine ATPase (Green et coll., 1999). Egalement, il

pourrait induire une augmentation de l'angle de pennation (Aagaard et coll., 2001) et de la longueur des faisceaux musculaires (Kearns et coll., 2000).

Le tableau 4 présente l'ensemble des adaptations physiologiques spécifiques à l'entraînement de force.

Les adaptations physiologiques liées à l'entraînement d'endurance

L'entraînement aérobic induit des adaptations des systèmes cardiovasculaire, respiratoire, neuromusculaire et endocrinien (tableau 4).

L'entraînement d'endurance résulte de plusieurs changements de la fonction cardiovasculaire, incluant une augmentation du débit cardiaque maximal, du volume d'éjection systolique ainsi que d'une réduction de la fréquence cardiaque de repos et à l'effort sous-maximal. L'amélioration de la capillarisation optimiserait quant à elle la diffusion de l'oxygène et des substrats énergétiques aux muscles (Baechle & Earle, 2008).

La composante musculaire d'un entraînement aérobic implique un nombre important de contractions sous-maximales. Le recrutement préférentiel des fibres de type I durant une activité d'endurance pourrait alors se traduire par une hypertrophie musculaire de celles-ci, même de faible niveau. D'autres équipes, plus nombreuses, ont montré que l'entraînement aérobic ne semblait induire aucun changement voire une diminution de la taille de l'ensemble des fibres musculaires (Putman et coll., 1995). En effet, l'entraînement d'endurance induirait un environnement catabolique, (i.e. une diminution du ratio testostérone : cortisol), inhibant le développement de la masse musculaire et de la force (Leveritt et coll., 1999). Également, l'effort aérobic pourrait induire préférentiellement une transformation des fibres de type II vers des fibres de type I (Green et coll., 1984; Simoneau et coll., 1985).

La réponse adaptative à l'entraînement d'endurance la plus importante est une augmentation de la capacité oxydative de la musculature entraînée. Celle-ci se traduit par une augmentation de la taille et du nombre de mitochondrie ainsi que de la teneur en myoglobine du muscle (Fox et coll., 1993). La myoglobine est une protéine qui transporte l'oxygène au sein de la cellule. Les mitochondries sont les organelles responsables de la production d'ATP via l'oxydation du glycogène. La capacité du muscle à extraire et utiliser l'oxygène est alors dépendante de la densité mitochondriale et de la concentration en myoglobine. Cette capacité est également liée à l'équipement des mitochondries en enzymes oxydatives, à la fonction des mitochondries (Zoll et coll., 2003) et à l'augmentation des stocks de glycogène (Gollnick, 1982) et de triglycérides (Morgan et coll., 1971). L'ensemble de ces adaptations permet au muscle de maintenir une charge de travail et de résister à la fatigue.

L'entraînement de force peut présenter des adaptations physiologiques spécifiques pouvant perturber le bon fonctionnement du système oxydatif, et inversement. Un programme d'entraînement de musculation induit une transition des fibres musculaires vers des fibres rapides de type II, caractérisées par une fatigabilité importante et un rendement énergétique inférieur (Woledge, 1998), réduisant ainsi la performance d'endurance. Celle-ci pourrait également être altérée par les gains de masse musculaire dans le sens où la pompe cardiaque ne serait plus assez puissante pour irriguer tous les muscles. Le phénomène d'hypertrophie musculaire pourrait également perturber la diffusion de l'oxygène en limitant la zone d'échange entre le sang et les fibres musculaires mais également en augmentant la distance que doit parcourir l'oxygène pour aller du sang aux mitochondries (Nelson et coll., 1990).

Tableau 4. Adaptations physiologiques induites par les entraînements de force et aérobie.
Adapté de Baechle & Earle, 2008.

Variable	Adaptations liées à l'entraînement ...	
	de force	d'endurance
Performance		
Fmax	↑	=
Endurance musculaire	↑ pour P élevées	↑ pour P faibles
PMA	=	↑
Explosivité	↑	↓ ou =
Détente verticale	↑	=
P anaérobie	↑	=
Vitesse maximale	↑	=
Fibres musculaires		
Taille	↑	↑ ou =
Densité capillaire	↓ ou =	↑
Densité mitochondriale	↓	↑
Volume myofibrillaire	↑	=
Densité cytoplasmique	↑	=
Activité enzymatique		
Creatine phosphokinase	↑	↑
Myokinase	↑	↑
Phosphofructokinase	↑	Variable
Lactate dehydrogenase	=	Variable
Sodium-potassium ATPase	↑	↑ ou =
Stock des substrats		
ATP	↑	↑
Creatine phosphate	↑	↑
Glycogène	↑	↑
Triglycérides	~ ↑	↑
Tissue		
Force des ligaments	↑ ou =	↑
Force des tendons	↑ ou =	↑
Teneur en collagène	↑ ou =	Variable
Densité osseuse	↑ ou =	↑ ou =
Composition corporelle		
Masse grasse	↓	↓
Masse maigre	↑	=

Fmax: force maximale, PMA: Puissance maximale aérobie, P: puissance, ATP: adénosine triphosphate.

Les adaptations physiologiques liées aux entraînements combinés

L'hypothèse des adaptations physiologiques contradictoires a été supportée par Craig et coll. (1991) suggérant que le muscle squelettique ne peut pas s'adapter simultanément aux stimuli physiologiques cellulaires induits par FOR et AER. Cependant, peu d'études se sont intéressées à mesurer ces réponses métaboliques ou morphologiques à l'issue de COMB (Bishop et coll., 1999; Nelson et coll., 1990).

L'entraînement combiné perturberait l'hypertrophie musculaire normalement associée à FOR. Parmi les études qui se sont intéressées aux réponses hormonales induites par *les entraînements combinés* (Bell et coll., 2000 ; Craig et coll., 1991), l'une d'entre elles (Kraemer et coll., 1995) montrait une augmentation significative de la concentration de cortisol suite à COMB, par rapport à FOR, à l'issue d'une période de 12 semaines d'entraînement. La concentration de testostérone restant constante pour les deux groupes (i.e. FOR et COMB), les auteurs observent une diminution du ratio testostérone : cortisol en faveur du catabolisme pour COMB. La taille des fibres I, IIa et IIc augmentait à la fin de FOR alors que seule une hypertrophie des fibres IIa était observée suite à COMB (Kraemer et coll., 1995). Ces divergences se traduisaient alors, dans ce dernier groupe, par des gains de force des membres inférieurs réduits par rapport à FOR (Kraemer et coll., 1995). Deux autres études ont mis en évidence une altération de l'hypertrophie des fibres musculaire de type I suite à COMB (Bell et coll., 2000; Putman et coll., 2004).

Aucune différence de modification de typologie des fibres musculaires n'a été observée entre FOR et COMB, à l'issue de 12 semaines d'entraînements proposées par Kraemer et coll., (1995) (cf. ci-dessus). L'augmentation du pourcentage de fibre de type IIa et IIb était alors identique entre les deux groupes. L'interférence agissant sur le développement de la force semblerait s'expliquer principalement par l'altération de l'hypertrophie musculaire suite à COMB.

L'entraînement combiné pourrait altérer le recrutement des unités motrices associé à des contractions maximales volontaires (Chromiak and Mulvaney, 1990). Comme nous l'avons évoqué précédemment dans la partie 1.2, l'intervention des facteurs nerveux comme mécanismes explicatifs du phénomène d'interférence est renforcée par les travaux d'Hakkinen et coll. (2003). Ces auteurs montraient, à l'issue de COMB, une réduction de l'activité EMG durant les 500 premières ms d'une contraction maximale volontaire associée à une diminution du temps de montée en force. L'interférence agissant sur le paramètre d'explosivité pourrait

donc s'expliquer par une altération de l'activation nerveuse des muscles concernés (Hakkinen et coll., 2003). Celle-ci constitue une hypothèse supplémentaire pour expliquer la perturbation des différents paramètres de production de force suite à COMB.

Les mécanismes susceptibles d'expliquer le phénomène d'interférence sur le développement de la force sont multiples. Ils sembleraient néanmoins s'articuler autour de deux grands axes :

- La fatigue

La fatigue aigue semblerait diminuer la quantité de travail réalisée lors de la séance subséquente. Cela pourrait se traduire, à terme, par une altération des adaptations physiologiques. L'accumulation des séances pourrait également induire un état de surmenage chez le sportif et par conséquent perturber le développement des qualités physiques.

- Les réponses physiologiques et biologiques antagonistes

Celles-ci peuvent intervenir aux niveaux moléculaires et cellulaires. Les voies de signalisation activées par les deux formes d'entraînement ne sont pas indépendantes l'une de l'autre. L'activation de l'AMPK freinerait les synthèses protéiques en inhibant l'activité de mTOR. Les interactions moléculaires et cellulaires négatives interviendraient sur les systèmes neuromusculaire, hormonal, métabolique ou encore cardiovasculaire. Les contradictions physiologiques intervenant au niveau cellulaire peuvent être intimement liées aux antagonismes moléculaires.

3. Programmation des entraînements combinés

La survenue possible de la fatigue et d'adaptations physiologiques antagonistes semblerait responsable du phénomène d'interférence sur le développement de la force. Certains auteurs ont réfléchi à la mise en place de différentes programmations d'entraînement combiné afin de lutter contre ces mécanismes (Chtara et coll., 2008 ; Collins & Snow, 1993 ; Gravelle & Blessing, 2000 ; Sale et coll., 1990 ; Sporer & Wenger, 2003). Plusieurs variables telles que le volume d'entraînement, l'ordre des séances, le temps de récupération entre les séances et le type d'entraînement ont été analysées.

3.1 Effets du volume d'entraînement

Le volume d'entraînement est dépendant de la durée de la procédure expérimentale, du nombre et de la durée des séances. Il semblerait, entre autres, influencer le phénomène d'interférence. En effet, nous avons expliqué précédemment qu'un volume d'entraînement trop conséquent pouvait induire un état de surmenage chez les sportifs et par conséquent diminuer leurs performances physiques (Leveritt et coll., 1999).

Le volume d'entraînement de force semble déterminant pour les adaptations neuromusculaires dans le cadre des entraînements combinés. La réalisation de série de musculation longue (« complète »), jusqu'à épuisement, sur le haut et sur le bas du corps, chez des joueurs de pelote basque, induirait des gains de force et de puissance musculaire inférieurs, en comparaison à un groupe d'entraînement réalisant des séries plus courtes (« incomplètes ») (Izquierdo et coll., 2006). Une procédure expérimentale similaire, toujours dans le cadre des entraînements combinés, a été proposée à une population de sportifs entraînés en aviron. Celle-ci montrait également qu'un entraînement de force avec un volume d'entraînement modéré, était davantage favorable au développement des différents paramètres musculaires et de la performance spécifique en aviron (Izquierdo et coll., 2006).

Le nombre d'entraînements d'endurance par semaine ainsi que leurs durées (Wilson et coll., 2012) sembleraient être négativement corrélés aux gains de puissance musculaire ($r = -0.75$) chez des sujets modérément entraînés. Selon les conclusions de cette méta-analyse, il serait alors préférable de proposer des programmations avec des durées de séance courtes (< 30 min) et une fréquence réduite des séances d'entraînement d'endurance réduites (< 3/semaine) (Wilson et coll., 2012). Le ratio nombre de séances d'entraînement d'endurance :

nombre de séances d'entraînement de force paraît également déterminant pour les adaptations neuromusculaires (Jones et coll., 2013). D'après cette étude, un ratio d'1/3 induirait des meilleurs gains de force et de circonférence de la cuisse, à l'issue d'un programme de 6 semaines, en comparaison à un ratio de 1. Les gains d'endurance musculaire, mesurée lors d'un temps limite sur ergomètre isocinétique, étaient plus importants pour les deux groupes d'entraînement combiné par rapport au groupe force. Les adaptations oxydatives seraient alors similaires que l'on réalise 1 ou 3 séances d'endurance en complément de 3 séances de force par semaine (Jones et coll., 2013). L'entraînement aérobie proposé au cours de cette étude consistait en un travail d'endurance locale. Il serait alors intéressant de vérifier les effets d'entraînement d'endurance globale, type course ou vélo, sur les adaptations métaboliques (VO_{2max}) à la suite d'entraînement présentant des ratios différents.

Enfin, la durée de la procédure expérimentale semble prépondérante dans l'explication du phénomène d'interférence sur le développement de la force. Celle-ci interviendrait, dans certains cas, à partir de la 8^{ème} semaine d'entraînement (Hickson et coll., 1980; Izquierdo et coll., 2005). La majorité des études mettant en avant ce phénomène présentait des durées d'entraînement supérieures à 10 semaines (Bell et coll., 2000; Craig et coll., 1991; Hickson et coll., 1980; Hunter et coll., 1987; Izquierdo et coll., 2005; Kraemer et coll., 1995; Lee et coll., 1990). Des altérations de différents paramètres de la capacité de production de force ont également été obtenues suite à des périodes d'entraînement réduites (8 semaines). En revanche, ces procédures expérimentales étaient caractérisées par un nombre important de séances d'entraînement par semaine (5 à 8 séances) (Dudley & Djamil, 1985 ; Hennessy et Watson).

3.2 Effets de l'ordre des séances

L'analyse des effets de l'ordre des séances de force et d'endurance a fait l'objet de plusieurs travaux (Coffey et coll., 2009; Gravelle & Blessing, 2000) (tableau 5). Certains d'entre eux se sont intéressés aux réponses moléculaires induites par les deux formes d'entraînements appliquées consécutivement, mais avec des ordres variables (FOR/AER vs. AER/FOR). Les entraînements proposaient un travail de force maximale du bas du corps (8× 5 rep à 80% du 1RM) et d'endurance continue de 30 min sur ergocycle (70% VO_{2pic}). Des biopsies musculaires et des prélèvements sanguins étaient réalisés avant, pendant et après chaque type d'entraînement (Coffey et coll., 2009). Les données recueillies montraient des différences de réponses selon l'ordre des entraînements. L'effort d'endurance, réalisé avant la force, aurait

tendance à diminuer la réponse anabolique (Coffey et coll., 2009). A l'inverse, lorsque l'effort aérobie est réalisé en second, le processus inflammatoire et la dégradation protéique sembleraient exacerbés. Cette analyse aigue des réponses moléculaires ne laisse donc pas apparaître clairement d'ordre préférentiel (FOR/AER vs. AER/FOR) en vue de l'optimisation de la synthèse protéique et du développement de la masse musculaire. La persistance d'une fatigue aigue après la première séance, induisant notamment la réduction de la quantité de travail au cours de la séance de musculation, lorsque celle-ci est réalisée en seconde, justifierait d'appliquer l'ordre force/endurance, afin d'éviter toute interférence sur le développement de la force.

Les travaux, portant sur les adaptations chroniques à l'entraînement des configurations FOR/AER et AER/FOR, apportent des conclusions plus ambiguës (Bell et coll., 1988; Chtara et coll., 2008; Collins & Snow, 1993; Gravelle & Blessing, 2000). Seule une étude a démontré des gains de force des membres inférieurs plus importants suite à une période d'entraînement plaçant FOR avant AER (Bell et coll., 1988). Trois autres travaux concluaient, quant à eux, que l'ordre des séances ne perturbait pas les réponses de développement de force à l'issue des périodes d'entraînement combiné. Les résultats de ces études sont néanmoins discutables en raison du contenu des procédures expérimentales. L'une d'entre elles (Chtara et coll., 2008) propose un entraînement de « force » sous forme de circuit training 30/30 s ou 40/20 s avec une sollicitation aérobie importante. Il n'est donc pas pertinent, dans ce cas, de parler d'entraînement combiné FOR/AER. Enfin, les participantes aux deux autres études (Collins & Snow, 1993, Gravelle & Blessing, 2000) étaient peu entraînées, ce qui pourrait expliquer l'absence d'interférence sur le développement de force (Baker, 2001; Ronnestad et coll., 2011). En effet, les sportifs débutants sembleraient plus sensibles à la moindre charge d'entraînement de musculation, qu'elle soit associée ou non à un entraînement d'endurance.

La survenue plus probable d'un état de fatigue ainsi que la nature des réponses moléculaires aigues nous inciteraient à entraîner la force avant l'endurance. Les résultats concernant le développement des qualités de force suite à différentes programmations modulant l'ordre des séances (FOR/AER ou AER/FOR) ne sont pas univoques. Le temps de récupération entre les séances pourrait alors constituer une autre variable permettant de diminuer l'interférence (Sale et coll., 1990).

3.3 Effets du temps de récupération

Nous avons constaté que le risque de fatigue aigue avait une incidence sur la production de force lorsque la séance d'endurance était réalisée en premier. Les évènements centraux et périphériques impliqués dans la production de force semblaient encore altérés 6 h après la fin de l'exercice d'endurance (Bentley et coll., 2000). Le volume de travail du bas du corps était également diminué après 8 h de récupération (Sporer et Wenger, 2003). Cette réduction du volume de travail, pourrait se traduire, à la fin d'une période d'entraînement, par une altération des gains de force. A notre connaissance, une seule étude s'est intéressée à comparer les effets de différents temps de récupération sur les adaptations chroniques des entraînements combinés (Sale et coll., 1990) (tableau 5). Il a été montré qu'un délai de 24h entre les séances de force et d'endurance induisait de meilleures réponses sur le développement musculaire, qu'un programme d'entraînement sans temps de récupération (0h). Les effets aigus d'exercices spécifiques de FOR ou COMB sur la signalisation intracellulaire dans le muscle squelettique (Fernandez-Gonzalo et coll., 2013), ainsi que les effets de 5 semaines d'entraînement (Lundberg et coll., 2012) ont eux aussi été étudiés. Leurs résultats ont permis de suggérer qu'un délai de 6h entre les deux exercices de la séance COMB permettrait d'observer une évolution de la signalisation intracellulaire impliquée dans le contrôle de la masse musculaire, plus favorable qu'après un exercice de FOR seul (Lundberg et coll., 2012). La mise en œuvre d'un programme d'entraînement confirmait ce qui était suggéré par les exercices aigus, et se traduisait par une augmentation légèrement plus marquée de la masse musculaire après COMB comparativement à FOR (Fernandez-Gonzalo et coll., 2013). Un tel protocole expérimental amène cependant à poser quelques questions sur la signification des résultats obtenus. La durée de l'entraînement était en effet assez courte pour une expérimentation menée chez l'homme (5 semaines). De plus, les deux types d'entraînement étaient appliqués sur chaque participant de manière unilatérale; une jambe réalisait les exercices de FOR, l'autre les exercices de COMB). L'effet controlatéral, par des influences systémiques (hormonales ou autres), pourrait alors induire des adaptations similaires pour les deux membres (Leveritt et coll., 1999). Par ailleurs, cette étude ne proposait qu'un seul groupe combiné et ne permettait donc pas de comparer les effets de différents temps de récupération.

L'effet du temps de récupération sur les adaptations morphologiques et neuromusculaires mérite encore d'être exploré. Il n'existe pas de consensus sur les effets potentiellement négatifs de l'enchaînement d'exercices de force et d'endurance (COMB) sur

Cadre Théorique

le développement de la masse musculaire. De plus, il semblerait que celui-ci soit influencé par les différentes procédures expérimentales proposées (Bentley et coll., 2000; Sporer et Wenger, 2003). Plusieurs auteurs se sont alors intéressés à mesurer l'effet du type d'entraînement, de force et d'endurance, sur le phénomène d'interférence (Docherty & Sporer, 2000; Silva et coll., 2012; Souza et coll., 2007; Sporer & Wenger, 2003).

Tableau 5. Influence de la programmation des entraînements sur le phénomène interférentiel

		Procédures expérimentales	Gains de performance et adaptations
Bell et coll. (1988)	Durée	5 semaines	MM bas : FOR/AER > AER/FOR VO _{2max} : FOR/AER = AER/FOR
	Groupes expérimentaux	COMB AER/FOR et COMB FOR/AER	
	FOR	4 séances/sem	
	AER	5 séances/sem	
	COMB AER-FOR COMB FOR-AER	9 séances/sem, mêmes jours, ordre des séances alterné	
Chtara et coll., (2005)	Durée	12 sem	VO _{2max} VMA et perf au 4km : VMA : AER/FOR > FOR/AER
	Groupes expérimentaux	FOR, AER, COMB AER/FOR et COMB FOR/AER	
	FOR	2 séances/sem, circuit training mixte	
	AER	2 séances/sem, INT court en CAP	
	COMB AER-FOR COMB FOR-AER	4 séances/sem, mêmes jours, R: 15 min	
Chtara et coll., (2008)	Durée	12 sem	1RM, puissance et end musculaire bas : FOR > FOR/AER et AER/FOR
	Groupes expérimentaux	FOR, AER, COMB AER/FOR et COMB FOR/AER	
	FOR	2 séances/sem, circuit training mixte	
	AER	2 séances/sem, INT court en CAP	
	COMB AER-FOR COMB FOR-AER	4 séances/sem, mêmes journées, R: 15 min	
Collins & Snow (1993)	Durée	7 sem	1RM bas et haut : FOR/AER = AER/FOR VO _{2max} : FOR/AER = AER/FOR
	Groupes expérimentaux	COMB AER/FOR et COMB FOR/AER	
	FOR	NR, Fmax et hyp	
	AER	NR, CONT en CAP	
	COMB AER-FOR COMB FOR-AER	NR	
Davis et coll., (2008,a et b)	Durée	11 sem	1RM et endurance musculaire bas : COMB intégré > COMB série Adaptations cardiovasculaires et respiratoires : COMB intégré > COMB série
	Groupes expérimentaux	COMB série et COMB intégré	
	FOR	3 séances/sem, hyp mixte	
	AER	3 séances/sem, CONT	
	COMB série COMB intégré	6 séances/sem, toujours FOR/AER 3 séances/sem, alternance de FOR et AER	
Gravelle & Blessing (2000)	Durée	7 sem	1RM bas : FOR/AER = AER/FOR VO _{2max} : FOR/AER > AER/FOR
	Groupes expérimentaux	FOR, COMB AER/FOR et COMB FOR/AER	
	FOR	3 séances/sem, hyp bas	
	AER	3 séances/sem, CONT, rameur	
	COMB AER-FOR COMB FOR-AER	6 séances/sem, mêmes journées, R: 0h	
Izquierdo et coll., (2009)	Durée	8 sem	1RM et puissance haut : COMB 2 > COMB 1 et 3
	Groupes expérimentaux	COMB 1, 2 et 3	
	FOR	2 séances/sem, Fmax et hyp haut	
	AER	2 séances/sem, CONT, rameur	
	COMB 1 COMB 2 COMB 3	4 séances/sem, 4 ex de FOR jusqu'à échec 4 séances/sem, 4 ex de FOR sans échec 4 séances/sem, 2 ex de FOR sans échec	
Jones et coll., (2013)	Durée	6 sem	CMV : FOR et COMB 1 > COMB 2 Ø cuisse : FOR > COMB 1 et 2
	Groupes expérimentaux	FOR, COMB 1 et 2	
	FOR	3 séances/sem, isocinétisme, Fmax bas	
	AER	1 ou 3 séances/sem, endurance musculaire, bas	
	COMB 1 COMB 2	FOR/AER (R:0h), 3 de séance de force et 1 d'endurance FOR/AER (R:0h), 3 de séance de force et d'endurance	
Rhea et coll., (2008)	Durée	18 semaines	Puissance bas : COMB 1
	Groupes expérimentaux	COMB 1 et 2	
	FOR	2 à 3 séances/sem, Fmax, Fexplo et hyp mixte	
	AER	3 à 4 séances/sem, RS vs. CONT vélo ou CAP	
	COMB 1 COMB 2	5 à 7 séances/sem, FOR avec RS 5 à 7 séances/sem, FOR avec CONT en vélo ou CAP	
Sale et coll., (1990)	Durée	2x 10 sem, R: 3 sem entre les deux blocs	1RM bas : COMB 24h > COMB 0h Endurance musculaire : COMB 0h = COMB 24h Ø cuisse et fibre VL : COMB 0h = COMB 24h VO _{2max} : COMB 0h = COMB 24h Activité CS : COMB 0h > COMB 24h
	Groupes expérimentaux	COMB AER/FOR et COMB FOR/AER	
	FOR	2 séances/sem, end musculaire, bas	
	AER	2 séances/sem, INT long, vélo	
	COMB 1 COMB 2	4 séances/sem, ordre alterné, R: 0h entre les séances 4 séances/sem, ordre alterné, R: 24h entre les séances	
Silva et coll., (2012)	Durée	11 sem	1RM bas et haut, CMV (iso et anisométrie) : FOR = COMB 1, 2 et 3
	Groupes expérimentaux	FOR et COMB 1, 2 et 3	
	FOR	2 séances/sem, Fmax, hyp et end musculaire mixte	
	AER	2 séances/sem, cf ci-dessous	
	COMB 1 COMB 2 COMB 3	4 séances/sem, AER/FOR (R:0h), CONT CAP 4 séances/sem, AER/FOR (R:0h), INT CAP 4 séances/sem, AER/FOR (R:0h), CONT vélo	

AER: aérobic, FOR: force, COMB: combiné, sem: semaine, Fmax: force maximale, hyp: hypertrophie, CMV: contraction maximale volontaire, MM: moment musculaire, VL: vastus lateralis, m: masse, VMA: vitesse maximale aérobic, CONT: continu, CAP: course à pied, CS: citrate synthase, VO_{2max}: consommation maximale d'oxygène, NR: non renseigné. La population concernée par ces études était peu entraînée.

3.4 Effets du type d'entraînement

▪ Les types d'entraînements de force et d'endurance

L'effet du type d'entraînement semble déterminant dans le phénomène d'interférence comme le montre le modèle proposé par Docherty & Sporer (2000) (figure 4). Selon eux, le risque d'interférences physiologiques serait plus important lorsque les entraînements combinerait un travail musculaire à visée « hypertrophique » (> 10 RM) à un travail intermittent de haute intensité (95 à 100% de la VMA). En effet, tous deux présenteraient des adaptations localisées au niveau périphérique supposées contradictoires. Ce modèle signifie en d'autres termes que tout entraînement combiné proposant un entraînement de force maximale (adaptations nerveuses) ou aérobie continu à intensité modérée (adaptations cardiovasculaires) n'induirait aucune interférence sur le développement de la force.

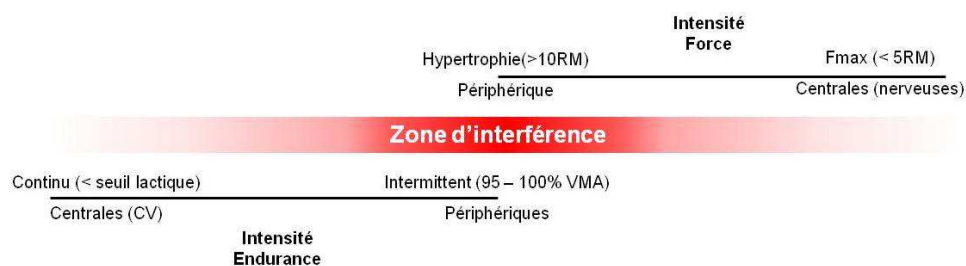


Figure 4. Représentation de la zone d'interférence (adapté du continuum de Docherty & Sporer, 2000).

CV: cardiovasculaire, Fmax: force maximale, VMA: vitesse maximale aérobie, RM: répétition maximale.

Le modèle proposé ci-dessus a été validé par plusieurs études traitant des effets des entraînements combinés (Gravelle & Blessing, 2000; McCarthy et coll., 1995; Nelson et coll., 1990). En effet, aucune altération des gains de force n'a été observée lorsque les entraînements de musculation à dominante force maximale (McCarthy et coll., 1995; Nelson et coll., 1990) et hypertrophie (Gravelle & Blessing, 2000) étaient associés à des entraînements aérobie continus à intensité modérée (approximativement 70% de la VO_{2max}). Les adaptations cardiovasculaires et les réponses musculaires spécifiques de ce dernier ne semblent pas interférer avec les adaptations périphériques et centrales des entraînements de musculation. Les altérations des gains de force mesurées par Kraemer et coll., (1995) à l'issue de COMB sont quant à elles justifiées, à la vue de ce modèle, car la procédure expérimentale

était constituée d'entraînement à visée hypertrophique et, entre autres, d'entraînement intermittent à haute intensité. Les résultats de cette dernière étude peuvent toutefois être discutés car l'entraînement aérobie était également constitué d'un entraînement continu à intensité modéré.

L'efficacité de ce modèle est toutefois à nuancer par quelques études (Bell et coll., 1997; Hickson et coll., 1980; Silva et coll., 2012). Une étude récente (Silva et coll., 2012) a comparé les effets de deux types de séances aérobies (continu vs. intermittent), associées à un entraînement hypertrophique (>10 RM), sur les gains de force maximale. Les résultats indiquaient des adaptations musculaires similaires entre les deux groupes d'entraînements combinés. Selon le modèle évoqué, la combinaison du travail intermittent avec le travail hypertrophique aurait pourtant du témoigner d'une plus grande interférence sur le développement de la force. Les travaux de Bell et coll., (1997) n'identifiaient aucune interférence sur le développement de force alors que l'entraînement combinait en partie un travail hypertrophique à un travail intermittent de haute intensité. A l'inverse, les travaux d'Hickson (1980), malgré l'utilisation d'un entraînement de force maximale ($> 80\%$ 1RM) mettaient en exergue des altérations de gain de force à l'issue de la période d'entraînement combiné. Ce dernier résultat traduirait alors l'intervention de mécanismes autres que musculaires dans l'explication du phénomène interférentiel.

Les procédures expérimentales présentées précédemment se sont intéressées aux effets des entraînements aérobies continus et intermittents longs. Ces derniers proposent des durées d'effort supérieures à 60 s. Les mêmes entraînements, d'une durée inférieure à 60 s, sont quant à eux appelés « intermittents courts ». Egalement, il existe d'autres types d'entraînements intermittents à haute intensité, sous la forme de répétitions de sprints, présentant des différences de sollicitations physiologiques (métaboliques et neuromusculaires) (Buchheit et Laursen, 2013). Les effets de ces derniers sur les adaptations neuromusculaires, dans le cadre d'un entraînement combiné, restent néanmoins à évaluer.

▪ La spécificité des entraînements de répétition de sprints

Nous pouvons distinguer deux formes d'entraînements de répétition de sprints : la répétition de sprints courts (RST; durée de 3 à 7 s avec des récupérations inférieures à 60 s) et la répétition de sprints longs (SIT; 30 s d'effort maximal avec des récupérations entre 2 et 4 min). La compatibilité de l'exercice RST avec les séances de force a récemment été

testée en mesurant les réponses moléculaires à l'entraînement (Coffey et coll., 2009b). L'effort consistait à réaliser 10 efforts maximaux de 6 s sur ergocycle avec un départ toutes les minutes. Le principal résultat de l'étude mettait en évidence une plus grande interférence sur les marqueurs des adaptations induites par l'entraînement de force, en comparaison à celle observée suite à un effort d'endurance continu à intensité modérée (30 min à 70% VO_{2pic}) (Coffey et coll., 2009a). En effet, les auteurs constataient une altération plus marquée du contrôle de la synthèse protéique et une concentration élevée des marqueurs de l'inflammation et de la protéolyse musculaire. L'analyse des réponses aigues nous montre donc une incompatibilité entre les exercices RST et les exercices de force sur le développement de la masse musculaire.

L'analyse de ces réponses à ces deux formes d'entraînement laisse apparaître un tout autre résultat. L'entraînement RST semblerait plus efficace qu'un entraînement aérobie continu (20 à 60 min) pour le développement de la puissance musculaire du bas du corps mesuré au cours d'un test de détente verticale (Rhea et coll., 2008). La procédure expérimentale ne proposait pas de groupe d'entraînement de force seul. On ne peut donc pas discuter d'un éventuel effet d'interférence. Aucune mesure des capacités oxydatives des sportifs n'avait été effectuée dans cette étude. Il nous est donc impossible de mesurer l'efficacité des deux types d'entraînement d'endurance.

Balabinis et coll., (2003) ont testé les effets d'une forme de répétition de sprints sur le développement de la force mais il semblerait que l'entraînement proposé soit un mixte entre plusieurs types d'efforts (RST, SIT, ...). En effet, les séances consistaient en une répétition de sprints de 30 à 400 m avec des périodes de récupération courtes (30s à 1min45s) (Balabinis et coll., 2003). La combinaison d'un entraînement de force avec ce type d'effort intermittent ne montrait aucune interférence sur les gains de force et de puissance musculaire et augmentait significativement la VO_{2max} chez des jeunes joueurs de basketball.

L'entraînement de répétition de sprints, malgré des réponses moléculaires parfois contradictoires avec celles induites par l'entraînement de force (Coffey et coll., 2009), paraît plus compatible que l'entraînement d'endurance en continu, pour le développement des qualités neuromusculaires. Cependant, les procédures expérimentales proposées jusqu'à présent n'ont pas permis de comparer les effets d'un entraînement combinant un travail de force et RST avec ceux induits par un entraînement de force seul.

Les entraînements de répétition de sprints longs (SIT) sont régulièrement utilisés à l'entraînement afin de développer le potentiel oxydatif des sportifs (figure 5). Des adaptations métaboliques similaires à celles induites par une période d'entraînement aérobie continue (40-

60 min à 65% VO_{2pic}) (Burgomaster et coll., 2008) ont été obtenues à l'issue d'une même période de SIT (6× 30 s, R: 4,5 min) et ce, malgré un volume de travail considérablement réduit au cours de ce dernier. Les effets de ce type de séances sur les adaptations neuromusculaires, dans le cadre d'un entraînement combiné, sont toutefois méconnus.

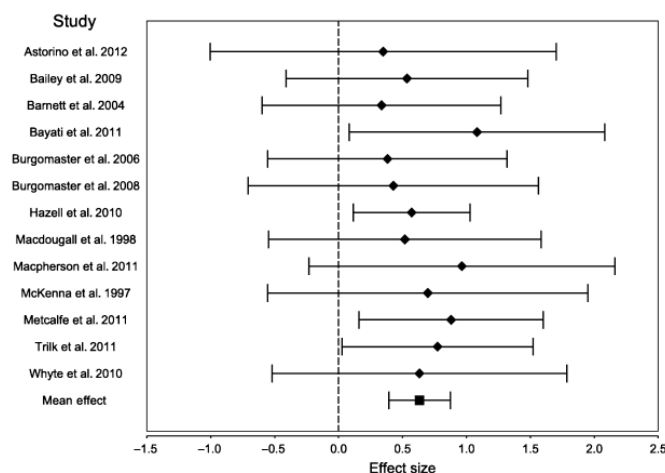


Figure 5. Représentation des gains de VO_{2max} suite à différentes périodes d'entraînement de répétition de sprints longs. Tiré de Sloth et coll., (2013).

Plusieurs variables de la programmation de l'entraînement peuvent être modulées afin de réduire l'effet interférentiel de l'entraînement d'endurance sur le développement de la force.

- Un volume de travail élevé, tant au niveau de l'entraînement d'endurance que de l'entraînement de force, semblerait perturber les adaptations neuromusculaires.
- L'ordre des séances aurait également son importance. La configuration AER/FOR altérerait davantage les réponses musculaires que l'inverse.
- Un temps de récupération important (24h) entre les deux types de séances aurait tendance à diminuer l'interférence. Néanmoins, l'effet d'un délai plus court (type entraînement biquotidien) reste inexploré. Des travaux complémentaires sembleraient pertinents afin d'analyser les effets de durées intermédiaires.
- L'influence du type d'entraînement de force et d'endurance reste discutée. Les sports collectifs sont confrontés à l'émergence de méthodes aérobies basées sur la répétition d'efforts intenses type sprints. Leurs effets, dans le cadre des entraînements combinés, mériteraient alors d'être analysés.

4. Problématiques et objectifs

La préparation physique du joueur de rugby impose la sollicitation de qualités physiques contradictoires, à savoir des qualités de force/vitesse/puissance et d'endurance. La combinaison des entraînements de musculation et d'endurance, au sein d'une même programmation, induirait une interférence sur le développement de différents paramètres liés à la force tels que la force maximale mais plus particulièrement la production de force à vitesse élevée, l'explosivité et la puissance. Cette interférence semblerait dépendante de la configuration des entraînements, c'est-à-dire du volume de travail, de l'ordre des séances, du temps de récupération entre les efforts ou encore des types d'entraînements.

L'objectif général de ce travail de recherche sera alors d'étudier les effets de différentes configurations d'entraînement permettant de limiter l'intervention du phénomène d'interférence sur le développement de la force.

L'ordre des séances de musculation et d'endurance pourrait influencer les adaptations neuromusculaires à l'issue d'une période d'entraînement combiné. Selon Bell et coll., (1988), les gains de force des membres inférieurs seraient plus importants avec une configuration d'entraînement plaçant FOR avant AER. Cependant, l'analyse aigue des réponses moléculaires suite aux configurations d'entraînement FOR/AER et AER/FOR ne laisse apparaître aucun ordre préférentiel en vue de l'optimisation du développement de la masse musculaire (Coffey et coll., 2009). Les réponses moléculaires contradictoires ne sembleraient donc pas être un mécanisme explicatif des moindres gains de force obtenus pour AER/FOR (Bell et coll., 1988). Une explication à ce résultat pourrait concerner le mécanisme de fatigue aigue induisant une réduction de la charge de travail lors de la séance de force, lorsque celle-ci est précédée par un effort d'endurance (AER/FOR). Plusieurs auteurs ont étudié l'effet de la fatigue aigue induite par un entraînement aérobique sur la capacité de production de force (Sporer et Wenger, 2003; Bentley et coll., 2000). Ils mentionnaient alors une altération de la performance neuromusculaire, pouvant aller jusqu'à 6 et 8 h respectivement, après des efforts d'endurance continus et intermittents longs. Il est pertinent de mesurer la période optimale de récupération des qualités neuromusculaires car il semblerait que la fatigue ne soit pas un stimulus nécessaire au développement de la force (Folland et coll., 2002; Pincivero et coll., 1997).

Les effets aigus des entraînements aérobies de haute intensité communément utilisés en sport collectif, type intermittent court ou répétition de sprints, sur la production de force n'ont à ma connaissance, pas été étudiés. Il nous semble pertinent de se questionner quant à l'impact d'une séance aérobie sur la performance neuromusculaire subséquente car les préparateurs physiques, pour des raisons de chronobiologie, ont tendance à placer les séances qualitatives de force, puissance ou vitesse dans l'après-midi. La performance neuromusculaire serait en effet supérieure à celle mesurée en matinée (West et coll., 2013). Il est donc habituel, en sport collectif, dans le cadre d'une programmation biquotidienne, d'adopter une configuration d'entraînement plaçant l'endurance avant la force.

Une première étude a donc été mise en place afin de vérifier l'impact de ces entraînements de haute intensité: 1. Répétitions de sprints longs (RS) et 2. Intermittent court (INT), avec différents temps de récupération (0h, 6h et 24h), sur la performance de force subséquente. Au même titre que pour les entraînements continus et intermittents longs, nous faisons l'hypothèse que le retour aux valeurs initiales des performances de force sera effectif au bout de 24h et ce, malgré des contraintes mécaniques plus importantes induites par l'entraînement de sprint long, et donc l'intervention plus grande d'une fatigue périphérique.

Actuellement, l'entraînement de haut niveau implique la programmation de plusieurs séances d'entraînement au sein d'une même journée. La modulation du temps de récupération entre les séances semblerait influencer les adaptations neuromusculaires des entraînements combinés (Sale et coll., 1990). Un délai de 24h entre les séances de force et d'endurance permettrait d'obtenir de meilleures réponses sur le développement musculaire, qu'un programme d'entraînement sans temps de récupération (0h). Il semblerait alors pertinent de mesurer l'effet d'une programmation biquotidienne, fréquemment utilisée dans le sport de haut-niveau, sur le développement de la force en proposant donc une durée de 6h de récupération entre les séances.

L'objectif de notre deuxième étude était donc d'investiguer l'influence de plusieurs délais entre les exercices de force et d'endurance, sur les réponses physiques et physiologiques, à l'issue de 7 semaines d'entraînement. Pour cela, nous avons testé trois programmes d'entraînement, avec des durées de 0h, 6h et 24h de récupération entre les séances. Nous avons formulé l'hypothèse qu'une durée de récupération minimale de 6h serait suffisante pour obtenir des gains de force supérieurs à ceux mesurés à l'issue de la configuration sans temps de récupération (0h).

L'une des méthodes d'entraînement régulièrement utilisée en sport collectif concerne l'entraînement intermittent de haute intensité. Si les effets de l'intermittent long, dans le cadre des entraînements combinés, ont largement été étudiés, nous remarquons qu'aucune étude n'a mesuré l'influence des entraînements intermittents courts et répétition de sprints longs sur l'éventuelle interférence portant sur les gains de force. Ces entraînements d'endurance présentent des adaptations physiologiques différentes (métaboliques et neuromusculaires) par rapport à celles induites par le travail continu et intermittent long (Buchheit & Laursen, 2013) et pourraient donc influencer les réponses neuromusculaires à l'issue des périodes d'entraînement combiné.

L'objectif de notre troisième étude sera alors de mesurer l'impact de deux types d'entraînement d'endurance (1. Répétition de sprints longs, 2. Intermittent court à haute intensité) sur la performance neuromusculaire et oxydative, à l'issue de 8 semaines d'entraînement combiné. D'après les résultats de quelques travaux (Rhea et coll., 2008; Balabinis et coll., 2003), nous faisons l'hypothèse que les adaptations neuromusculaires et oxydatives induites par l'entraînement combinant force et répétition de sprints seront plus importantes que celles induites par l'association force et intermittent court et permettront ainsi de réduire l'effet interférentiel.

MATERIEL ET METHODES

« Il ne suffit pas de faire lire mais de faire penser »

Charles Montesquieu

1. Population

Les participants à ces études sont des joueurs de rugby amateurs en bonne santé, de sexe masculin, pratiquant régulièrement une activité physique (~ 8 heures par semaine). Ils étaient informés des objectifs poursuivis ainsi que de la procédure expérimentale. Tous ont donné leur consentement oral et écrit. Les caractéristiques des sujets sont présentées, pour chaque étude, dans le tableau 6.

Tableau 6. Caractéristiques des sujets.

		N	Age (années)	Taille (cm)	Poids (kg)
Etude 1		7	30,3 ± 4,8	177,0 ± 8,2	82,9 ± 14,2
Etude 2	CONT	10	25,2 ± 3,5	182,5 ± 4,6	88,3 ± 8,9
	C-0h	15	24,3 ± 3,8	172,4 ± 4,7	85,7 ± 11,5
	C-6h	11	28,0 ± 4,5	180,9 ± 6,3	90,4 ± 9,1
	C-24h	12	24,8 ± 3,9	176,6 ± 6,8	83,5 ± 14,9
	STR	10	25,2 ± 4,4	180,7 ± 7,4	90,8 ± 14,5
Etude 3	C-RS	10	26,4 ± 3,0	179,7 ± 8,0	89,3 ± 10,3
	C-INT	9	25,0 ± 3,7	180,1 ± 7,7	86,2 ± 10,5
	FOR	11	27,5 ± 2,5	177,3 ± 5,6	89,4 ± 14,2

N: nombre des sujets; CONT: contrôle; C-0h, C-6h et C-24h: aucune, 6h et 24h de récupération entre séances; FOR: Force; C-RS: combiné force/répétition de sprints longs, C-INT: combiné force/intermittent court.

2. Techniques utilisées

La plupart des techniques, de terrain ou de laboratoire, utilisées au cours de ce travail de thèse sont communes aux différentes études. Nous les avons alors détaillées au sein de cette partie (tableau 7).

Tests de terrain

Ces tests de terrain étaient réalisés dans le but de mesurer les performances relatives aux qualités de force et d'endurance.

▪ 1RM

Le 1RM de chaque exercice était évalué au début et à la fin de chaque programme d'entraînement. Egalement, il était régulièrement mesuré afin de réguler l'intensité des

efforts. Les participants réalisaient deux séries d'échauffement avec des charges légères sur chaque exercice. Ensuite, ils débutaient le test en réalisant une série d'une seule répétition et augmentaient progressivement la charge à soulever. Le temps de récupération entre chaque essai était de 3 min. Le test s'arrêtait lorsque le sujet n'arrivait pas à soulever une fois une charge déterminée. Le 1RM correspondait ainsi à la charge maximale ne pouvant être déplacée qu'une seule fois. Nous utilisons une précision de 2,5 kg pour les mouvements du haut du corps (développé-couché, DC et tirage-couché, TC), 5 kg pour le ½ squat et la chaise à quadriceps puis 25 kg pour la presse et le soulevé de terre.

- *Puissance musculaire*

La puissance musculaire du haut du corps, au cours d'un mouvement de DC, a été mesurée au moyen d'un transducteur linéaire (GymAware, Kinetic performance technology, Australie). La mesure du déplacement de la charge en fonction du temps est possible grâce à une corde fixée à la barre. La vitesse de déplacement de la charge, multipliée par la masse de cette dernière nous donne alors la puissance produite au cours du mouvement. Les sujets avaient pour consigne de marquer un temps d'arrêt de deux secondes, la barre reposant sur les pectoraux, avant de pousser le plus rapidement possible. La charge utilisée correspondait à 50% du 1RM. Les participants réalisaient à chaque session de test, deux séries de trois répétitions, entrecoupées de durées de récupération complètes (2 min). La puissance moyenne était mesurée pour chaque répétition. La meilleure valeur, pour chaque session, était retenue dans l'analyse.

- *Contremouvement jump (CMJ)*

La hauteur de saut au cours d'un CMJ, mesuré par le système Optojump (Microgate, Bolzano, Italie), est un indice de puissance maximale des membres inférieurs. L'exécution de ce saut impose au participant d'enchaîner une phase de flexion des genoux, à un angle individuel proche de 90°, avec une phase d'extension au sein d'un même mouvement. Les mains sont posées sur les hanches pour limiter le rôle des membres supérieurs. Les participants réalisaient 3 essais, séparés entre eux par une récupération de 90 s, et seule la meilleure performance était retenue dans les analyses. Une variante du test CMJ consistait à enchaîner 3 sauts (CMJ 3 sauts) en respectant les consignes citées préalablement. Les participants ne

réalisaient alors que deux essais, séparés entre eux par une récupération de 2 min, et la meilleure moyenne des trois sauts était retenue.

▪ Répétition de sprints

Ce test consistait à enchaîner douze sprints de 20 m en navette, sur terrain synthétique, avec une phase de récupération active de 10 m, en aller-retour, entre chacun d'entre eux (figure 6). La vitesse de récupération active était libre mais devait permettre au sujet d'arriver au moins deux secondes avant le prochain effort. Le départ pour chaque sprint était donné toutes les 15 s. La position initiale était à l'arrêt avec le pied avant placé 50 cm avant la ligne de départ. Les temps de chaque sprint étaient mesurés au moyen de cellules photoélectriques Smartspeed (Fusion sport, Australie), placées à hauteur de bassin.

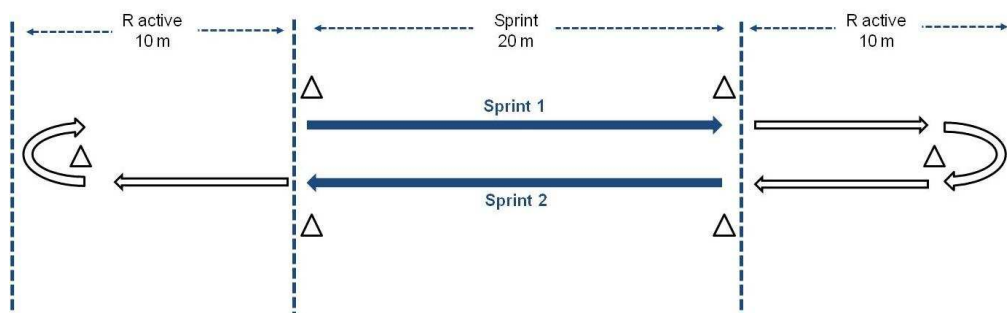


Figure 6. Test de répétition de sprints (12× 20m, départ toutes les 15s, R active: 2× 10m)
R active : récupération active.

▪ Vitesse maximale aérobie (VMA)

Le test, réalisé sur piste, commençait à une vitesse de $8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ pendant 2 min puis celle-ci s'incrémentait ensuite de $0,5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ à la fin de chaque palier de 1 min. La VMA correspondait à la dernière vitesse maintenue pendant un palier entier. La fréquence cardiaque maximale était mesurée grâce à un cardio fréquencemètre (Polar Electro Oy, Kempele, Finlande).

Estimation de la surface de section anatomique (CSA)

La CSA estimée nécessite la mesure de la circonférence du bras et de la cuisse mais aussi de la masse grasse du biceps et du quadriceps. Ces mesures ont été réalisées avant et après chaque période d'entraînement. Le sujet était allongé avec les bras placés le long du corps, les

paumes de main orientées vers les cuisses. Les mesures étaient réalisées 10 cm au dessus de l'olécrane et 20 cm au dessus de la partie supérieure de la rotule. Trois essais étaient effectués à chaque session pour les mesures de masse grasse bicipitale et du droit fémoral. La moyenne était retenue pour l'analyse. La formule consistant à estimer la CSA est la suivante :

$$CSA = (4,68 \times \text{circonférence}) - (0,64 \times \text{pli cutané}) - 22,69 \text{ (Housh et coll., 1995).}$$

Mesure des propriétés neuromusculaires

▪ *Moment musculaire*

Les mesures de moment musculaire des muscles extenseurs du genou droit ont été appliquées sur un ergomètre isocinétique validé de type Contrex (Medimex, Suisse) (Maffiuletti et coll., 2007). L'ergomètre isocinétique permet de recueillir le signal mécanique lors de mouvements mono-articulaires selon un seul degré de liberté. Le moment résultant de l'action simultanée des muscles agonistes et antagonistes, développé pour différentes longueurs musculaires lors d'actions isométriques ou pour différentes vitesses angulaires lors d'actions isocinétiques dynamiques, peut ainsi être mesuré. Ce signal est ensuite enregistré de façon instantanée afin d'être analysé par l'intermédiaire du logiciel Biopac (MP 150, Biopac system, Santa Barbara, Etats-unis). Les sujets sont assis sur l'ergomètre, avec une flexion de 95° au niveau de la hanche, et immobilisés à l'aide de ceintures positionnées au niveau du tronc et du bassin. L'axe de rotation du dynamomètre est aligné avec l'axe de rotation du genou droit (condyle fémoral externe). La jambe est fixée au bras de levier juste au-dessus de l'articulation de la cheville et les bras sont positionnés de chaque côté du siège. Le mouvement d'extension de la jambe s'appliquait sur une amplitude angulaire de 90° (de 100° à 10° ; 0° correspondant à l'extension complète de la jambe). Durant les contractions concentriques ($60^\circ \cdot s^{-1}$ and $180^\circ \cdot s^{-1}$), le moment musculaire maximal était calculé, respectivement, sur des périodes de 165 et 55 ms, correspondant à une amplitude angulaire de 5° de part et d'autre de l'angle de 75°. Durant les contractions isométriques, d'une durée de 5 s à un angle de 75°, celui-ci était enregistré sur une période de 500 ms. Pour toutes les mesures de moment maximal, le poids de la jambe en condition de repos était mesuré puis soustrait à la valeur enregistré. Les sujets étaient encouragés par les investigateurs durant toutes les contractions.

▪ *Activité EMG*

L'activité EMG, concomitante à la production de force, était mesurée et enregistrée grâce à trois paires d'électrodes de surface au chlorure d'argent, positionnées sur le ventre des trois

muscles superficiels du quadriceps (*vastus lateralis*, *vastus medialis* et *rectus femoris*). La distance inter-électrode, centre à centre, était de 2 cm. L'électrode de référence était placée sur la rotule du genou droit. La surface de la peau était préparée (rasage, ponçage, dégraissage) afin de réduire la résistance inter-électrode ($<2000 \Omega$). Les signaux EMG étaient amplifiés avec une bande passante de 1 Hz à 500 Hz (taux de rejet en mode commun = 90 dB ; impédance d'entrée = $100 \text{ M}\Omega$; gain = 1000) et enregistrés avec une fréquence d'échantillonnage de 2000 Hz avec le Biopac. L'activité EMG était quantifiée par l'amplitude de la *root mean square* (RMS). Durant les contractions isométriques, l'amplitude de la RMS était calculée sur la période de 500 ms correspondante à la mesure du moment musculaire maximal. Durant les contractions concentriques ($60^\circ \cdot \text{s}^{-1}$ and $180^\circ \cdot \text{s}^{-1}$), celles-ci étaient calculées sur des périodes identiques à celles de la mesure du moment musculaire. La moyenne de la RMS des trois muscles (*vastus lateralis*, *vastus medialis* et *rectus femoris*) était retenue pour l'analyse (Babault et coll., 2003).

▪ Procédure de neurostimulation

La technique de neurostimulation était utilisée pour déterminer les propriétés mécaniques des muscles extenseurs du genou et le niveau d'activation volontaire au moyen de la technique de twitch interpolation (Merton, 1954) (Etude 1). La cathode (diamètre d' $\sim 10 \text{ mm}$) du stimulateur (Digitimer DS7, Hertfordshire, UK) était appliquée sur le nerf au niveau du triangle fémoral, à l'endroit où la réponse musculaire du quadriceps était la plus élevée. L'anode (électrode adhésive de $10 \times 5 \text{ cm}$) était positionnée à mi-distance entre la partie supérieure du grand trochanter et bord inférieur de la crête iliaque. L'intensité optimale de stimulation était déterminée en appliquant des simples secousses (1ms, 400V) avec une intensité croissante jusqu'à obtenir la réponse maximale évoquée en condition isométrique (75°). Cette stimulation permet une excitation maximale et synchrone de l'ensemble des unités motrices des muscles concernés. La réponse mécanique résultante (secousse) correspond à la sommation des réponses mécaniques unitaires de ces mêmes unités motrices. La réponse nerveuse (onde M) associée à la stimulation était mesurée et enregistrée grâce aux paires d'électrodes de surface placées sur les trois muscles superficiels (*vastus lateralis*, *vastus medialis* et *rectus femoris*) (figure 7).

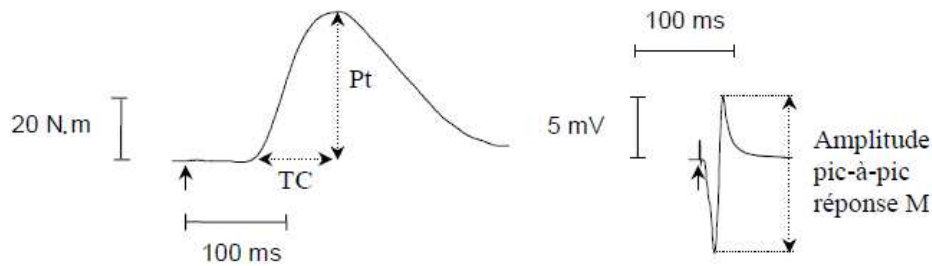


Figure 7. Réponses mécaniques et électrophysiologiques mesurées après stimulation du nerf fémoral sur les muscles extenseurs de la jambe au repos.

Les doubles flèches représentent le moment maximal, P_t (mesuré au sein de notre étude) ; le temps de contraction, TC et l'amplitude pic-à-pic de la réponse M . Les flèches simples représentent l'instant où est délivrée la stimulation. (Tiré de la thèse de Babault, 2002)

Des stimulations supra-maximales (intensité optimale + 10%) étaient ensuite délivrées par paires (doublet), avec un intervalle entre les stimulations de 10 ms, avant, pendant (~ 4 s après le début de la contraction) et 5 s après chaque CMV (doublet potentialisé) (figure 8). Les réponses musculaires évoquées par les stimulations étaient utilisées pour déterminer les propriétés contractiles du muscle et les niveaux d'activation volontaire en utilisant la formule :

Niveau d'activation (%) = $[1 - (A \times (M_{\text{stim}}/CMV_{\text{iso}})) / B] \times 100$, avec A = amplitude du doublet surimposé, B = amplitude du doublet potentialisé et M_{stim} = moment volontaire lorsque le doublet est surimposé (Strojnik & Komi, 1998).

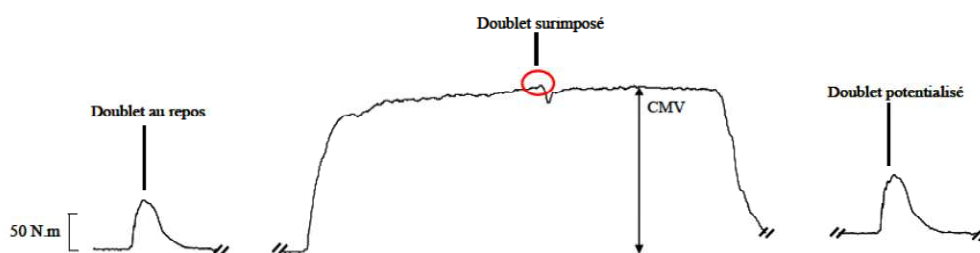


Figure 8. Tracé caractéristique d'une contraction maximale volontaire des muscles extenseurs du genou précédée d'un doublet au repos et suivie d'un doublet potentialisé, (Tiré de Place, 2006).

Mesure du pic de consommation d'oxygène (VO_{2pic})

La mesure du VO_{2pic} a été obtenue au cours de tests d'efforts maximaux jusqu'à épuisement (figure 9). Ceux-ci étaient réalisés une semaine avant et après chaque période d'entraînement sur un tapis roulant mécanique (Medical developpement S2500, Andrezieux Boutheon, France) avec un enregistrement électrocardiogramme simultané (Asept, Medi-Globe corporation, Rosenheim, Allemagne). Les tests utilisés se distinguent entre les études 2 et 3. Dans le premier cas, la vitesse initiale du test était de $5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ et augmentait d' $1 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ chaque minute. Dans le second, le test débutait à $8 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ et s'incrémentait de $0,5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ toutes les minutes.

La VO_2 était mesurée continuellement par un analyseur cycle à cycle (Jaeger, Oxycon pro, Wuerzburg, Germany) validé par Carter & Jeukendrup (2002). Ce système est constitué de différents capteurs permettant la mesure de la ventilation minute expirée (VE) et les concentrations d' O_2 et de CO_2 dans l'air expiré. Les analyseurs d' O_2 et CO_2 étaient également calibrés avant chaque expérimentation en fonction des concentrations d' O_2 et de CO_2 de l'air ambiant (respectivement 20,93 % et 0,003 %) et celles des bouteilles de gaz étalon (respectivement 15 et 5 %). Dans nos études, la calibration globale du système (gaz de l'air ambiant, gaz de référence, délai et volume) a systématiquement été effectuée et cela pour chaque sujet. La turbine du débit mètre et le tube capillaire ont été changés pour chaque test. La température ambiante et le taux d'hygrométrie ont systématiquement été renseignés pour chaque test. La mesure de VO_{2pic} était déterminée comme étant la plus haute valeur mesurée sur une période de 30 s et était retenue pour l'analyse.

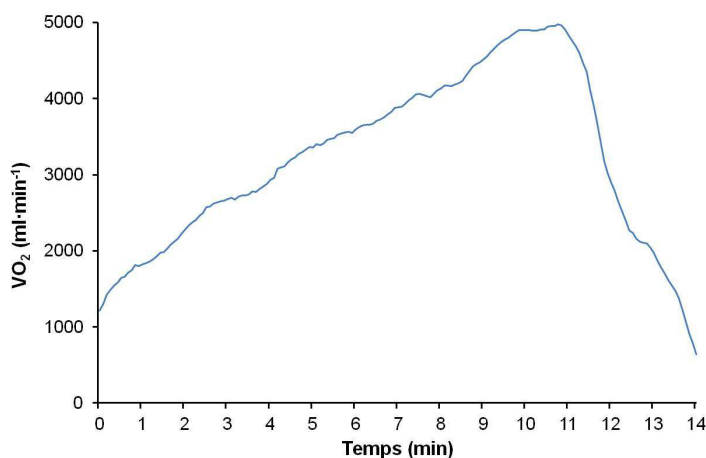


Figure 9. Enregistrement d'une cinétique de VO_2 au cours d'un test d'effort maximal. VO_2 : consommation maximale d'oxygène.

Tableau 7. Récapitulatif des techniques utilisées au cours de trois études expérimentales.

	Etude		
	1	2	3
1RM			
DC (kg)	×	×	×
TC (kg)		×	×
1/2 squat (kg)		×	×
Presse (kg)		×	
Soulevé de terre (kg)			×
Puissance			
CMJ (cm)		×	×
CMJ 3 sauts (cm)	×		
Puissance DC (W)	×		
Moment musculaire (N·m)			
CMV _{iso}	×	×	×
CMV ₆₀	×	×	×
CMV ₁₈₀	×	×	×
CMV_{fat}			
20 CMV _{iso} (5"/10")		×	
Nbre rep à 80% CMV			×
Recueil EMG	×		×
Neurostimulation	×	×	
CSA_{estimée} (cm²)			×
Répétition de sprint			×
VMA (km·h⁻¹)	×	×	×
VO_{2pic} (ml·min⁻¹)		×	×

DC: développé-couché; TC: tirage-couché; CMJ: contremouvement jump; CMV_{60, 180 et iso}: contractions maximales volontaires à 60°·s⁻¹, 180°·s⁻¹ et isométriques; EMG: électromyographie; CSA: cross sectional area; VMA: vitesse maximale aérobie; VO_{2pic}: consommation maximale d'oxygène. CSA: cross sectional area.

3. Analyse statistique

La méthode statistique utilisée est commune aux trois projets expérimentaux. Les données de performance ont été analysées en utilisant une approche qualitative basée sur le calcul de la taille de l'effet. Cette méthode a été récemment recommandée pour le contexte des études de médecine du sport et des sciences de l'exercice (Hopkins et coll., 2009). Nous avons fait le choix d'utiliser cette méthode d'analyse car les approches statistiques traditionnelles n'indiquent pas la taille d'un effet ou sa distribution, alors que cela est généralement plus pertinent lorsqu'il s'agit *in fine* d'aboutir à des résultats permettant la formulation de recommandations cliniques. Par ailleurs, les données de performance ont été log-transformées avant l'analyse pour réduire les biais résultant de la non-uniformité des valeurs. L'amplitude des variations des performances par rapport au groupe contrôle (CONT) (étude 1), des changements de performance au sein de chaque groupe (étude 2 et 3) ou les différences de variations inter-groupes (études 2 et 3), ont été exprimées à partir des différences moyennes standardisées (*d* de Cohen), calculées en utilisant les écarts-types communs via une feuille de calcul statistique (Hopkins, 2006). La taille de l'effet a été interprétée à l'aide des seuils suivants 0,3 - 0,9 - 1,6 - 2,5 - 4,0 qui caractérisaient respectivement des différences *triviales*, *petites*, *moyennes*, *grandes*, *très grandes* et *extrêmement grandes* (Hopkins, 2009). De plus, nous avons calculé les probabilités d'observer des variations positives, négatives ou triviales à l'intérieur des groupes et entre ceux-ci à partir de l'intervalle de confiance (IC) à 90% autour de l'effet mesuré. Le seuil à partir duquel les variations n'étaient plus considérées comme triviales était établi par $0,3 \times \text{coefficient de variation (CV, \%)}$, en cohérence avec les seuils susmentionnés. Le CV de chaque paramètre était calculé à partir des mesures réalisées sur le groupe contrôle (CONT) lors de chaque étude mise en place. En effet, la variabilité des paramètres considérés mesurés sur CONT lors de cette phase était représentative de leur variabilité de base, en dehors de toute intervention expérimentale. Dans le cas des études où nous n'avions pas de groupe CONT (étude 1), le seuil à partir duquel les variations n'étaient plus considérées comme triviales était établi à 0,2. Le CV du paramètre était considéré lors des mesures en pré, avant toute intervention expérimentale, comme proposé par Hopkins (2009). Les chances d'observer un effet positif/négatif ou trivial étaient alors interprétées à partir des seuils suivants: <1%, *quasi certainement pas*; 1-5%, *très peu probable*; 5-25%, *improbable*; 25-75%, *possible*; 75-95%, *probable*; 95-99%, *très probable*, > 99%, *presque certain*. Si les chances qu'une variation positive ou négative soit observée étaient conjointement supérieures à

5%, l'effet de la stratégie d'entraînement sur la performance était considéré comme *peu clair*. Dans le cas contraire, le résultat était interprété à partir des critères précités (Hopkins et coll., 2009).

4. Expérimentations

Etude 1. Effets aigus de différents types d'entraînement aérobic sur la capacité de production de force.

Introduction

Quelques auteurs se sont questionnés quant à l'effet de la fatigue sur le développement des qualités neuromusculaires (Folland et coll., 2002; Pincivero et coll., 1997). Selon eux, celle-ci ne serait pas un stimulus nécessaire pour permettre des adaptations optimales et par conséquent des gains importants de force maximale (Folland et coll., 2002). Au contraire, il semblerait qu'une programmation d'entraînement, caractérisée par des durées de récupération réduites entre les exercices de force, induise des plus faibles adaptations neuromusculaires que celles mesurées suite à une programmation caractérisées par des durées de récupération complètes (Pincivero et coll., 1997). Finalement, il serait donc plus pertinent de s'entraîner en « état de fraîcheur » au sein de la séance de musculation. Au sein d'une programmation combinée, la fatigue peut elle aussi être induite par un effort préalable d'endurance. La mesure de la période de récupération nécessaire après ces types d'entraînement d'endurance est importante car nous supposons que la fatigue induite par ces efforts serait, à terme, un frein aux adaptations neuromusculaires.

Plusieurs études se sont intéressées à mesurer les effets aigus d'entraînements d'endurance, continus et intermittents longs (De Souza et coll., 2007; Sporer & Wenger, 2003; Bentley et coll., 2000), le plus souvent réalisés sur ergocycle, sur la capacité de production de force subséquente. Les principaux résultats montraient une fatigue aigue et donc une altération de cette production de force jusqu'à 6 à 8h après l'effort endurant (Sporer & Wenger, 2003; Bentley et coll., 2000) et une récupération complète 24h après la fin de l'exercice d'endurance (Sporer & Wenger, 2003). Seule la production de force des membres inférieurs semblerait altérée après un entraînement aérobic principalement centré sur le bas du corps (Reed et coll., 2013). Les techniques d'entraînement d'endurance à haute intensité, et notamment RS et INT, sont communément utilisées en sport collectif afin de développer la puissance oxydative du sportif. A notre connaissance, les effets de ces types d'entraînements sur la capacité de production de force restent méconnus. De plus, aucune étude ne semble s'être intéressée à mesurer les effets d'entraînements d'endurance, qu'ils soient à faible ou haute intensité, sur les paramètres de puissance et de production de force à vitesse rapide. L'objectif de cette première

étude était alors de mesurer les effets des deux types d'entraînement RS et INT, suite à différents temps de récupération (0h, 6h et 24h), sur plusieurs paramètres de la production de force. Nous faisons l'hypothèse que les performances de force seront identiques à leurs valeurs initiales au bout de 24h de récupération et ce, malgré des contraintes mécaniques plus importantes induites par l'entraînement de sprint long, et donc l'intervention potentielle d'une fatigue périphérique.

Méthode

L'expérimentation durait 8 semaines dont une dédiée à la mise en place de deux sessions de familiarisation aux évaluations proposées au sein de cette étude (ergomètre isocinétique, neurostimulation, CMJ 3 sauts et DC). Une troisième session, au sein de cette semaine de familiarisation était destinée à l'évaluation du 1RM au DC ainsi qu'à un test VMA.

La procédure était composée de 7 conditions expérimentales. Les participants réalisaient, de manière aléatoire, une des conditions suivantes par semaine :

- FOR, condition dans laquelle juste les mesures de force étaient réalisées, sans effort d'endurance au préalable. Il s'agit en fait de notre groupe contrôle.

- RS – R0h – FOR (RS 0h)
- RS – R6h – FOR (RS 6h)
- RS – R24h – FOR (RS 24h)
- INT – R0h – FOR (INT 0h)
- INT – R6h – FOR (INT 6h)
- INT – R24h – FOR (INT 24h)

Les sujets ne devaient réaliser aucune activité physique durant la période séparant les efforts d'endurance et de force.

Les entraînements d'endurance étaient planifiés de telle manière à ce que les mesures de force soient toujours faites aux mêmes horaires (17-19h). Les participants avaient pour consigne de ne pas réaliser d'effort fatigants 48h avant le début de chaque condition ainsi que de ne pas modifier leurs habitudes alimentaires durant toute la durée du protocole.

Présentation des entraînements d'endurance

Après un échauffement spécifique à un travail de vitesse, l'entraînement RS était composé de 6 sprints de 30 sec avec 4 min de récupération entre chaque sprint. L'échauffement de la séance INT consistait en un footing à intensité progressive de 6 min. Il se ponctuait par deux

accélération progressives de 30 s, entrecoupées de 30 s de récupération. L'entraînement INT était constitué de 2 blocs de 10 min alternant 30 s de course à VMA et 30 s de récupération active à 50% de VMA. Les sujets avaient 3 min de récupération entre la fin de l'échauffement et le début de la première répétition pour RS et INT. Les entraînements étaient réalisés sur piste. Les distances de sprint étaient contrôlées et mesurées suite à chaque effort. Les participants étaient équipés d'un cardio-fréquencemètre au cours d'INT afin de vérifier la sollicitation cardiaque induite par l'effort.

Mesures des différents paramètres de la production de force

La session d'évaluation de force (FOR) débutait par la mesure de la détente verticale au cours d'un test CMJ 3 sauts. Elle se poursuivait par la mesure de la puissance moyenne obtenue au cours d'un mouvement de DC à 50% du 1RM. Le nombre de répétition maximale à 70% du 1RM était également mesuré au cours de ce même mouvement. Ces tests de terrain étaient précédés par des échauffements standardisés.

La session se concluait par l'évaluation des moments musculaires sur ergomètre isocinétique associée aux mesures des propriétés mécaniques et nerveuses des muscles extenseurs et fléchisseurs du genou. Après avoir installé le sujet, six stimulations supra-maximales (intensité optimale + 10%), dont trois simples et trois doubles étaient délivrées. Ensuite, les sujets réalisaient un échauffement standardisé ainsi que deux CMV_{iso} . Enfin, ils exécutaient deux séries de 10 contractions maximales aux vitesses de $60^{\circ}\cdot s^{-1}$ (CMV_{60}) et $180^{\circ}\cdot s^{-1}$ (CMV_{180}), séparées par 3 min de récupération. La valeur maximale obtenue lors de la CMV_{iso} ainsi les valeurs de force correspondantes à un angle de 75° lors de CMV_{60} et CMV_{180} étaient retenues pour l'analyse. Le moment musculaire maximal et moyen ainsi que l'indice de fatigue [$CMV_{fat}(\%) = 1 - (CMV_{moy} / CMV_{max}) \times 100$] étaient déterminés suite aux deux séries de 10 CMV à 60 et $180^{\circ}\cdot s^{-1}$. Le signal EMG était enregistré au cours de chacune des CMV.

Résultats

Nous ne mentionnerons, au sein de la partie résultat, que les différences *possibles, probables, très probables et presque certaines* entre les mesures obtenues suite aux configurations combinées (RS 0h, RS 6h, RS 24h, INT 0h, INT 6h et INT 24h) et celles obtenues suite à FOR. Les variations de performance mentionnées dans le texte sont exprimées par rapport aux valeurs de FOR. Une partie des tableaux et les figures présentés ci-dessous, expriment les différences moyennes standardisées des différents paramètres entre les configurations combinées et FOR.

Tests de terrain

La performance obtenue au cours du test CMJ 3 sauts était supérieure lorsqu'elle était réalisée 6h après l'effort intermittent (INT 6h) (ES, *petite*, cela signifie que la différence entre les valeurs était *petite*). Les valeurs de puissance moyenne mesurées au cours d'un mouvement de DC étaient inférieures lorsqu'elles étaient réalisées immédiatement après l'effort intermittent (INT 0h) (*petite*) et de répétition de sprints (RS 0h) (*petite*). Le nombre maximal de répétitions réalisées à 70% du 1RM en DC était inférieur pour RS 0h et RS 6h puis INT 0h et INT 6h (*petites*) (tableau 8 et figure 10).

Tableau 8. Données brutes des mesures de terrain (moyenne $\pm$ écart type)

	CMJ 3 sauts (cm)	Pmoy DC (W)	Nbre rep DC
FOR	30,0 $\pm$ 6,1	401 $\pm$ 63	14,4 $\pm$ 2,4
RS 0h	29,7 $\pm$ 5,1	371 $\pm$ 42	12,1 $\pm$ 2,9
RS 6h	30,0 $\pm$ 5,6	388 $\pm$ 65	13,6 $\pm$ 2,1
RS 24h	29,5 $\pm$ 5,5	389 $\pm$ 39	14,7 $\pm$ 1,6
INT 0h	29,3 $\pm$ 5,3	365 $\pm$ 43	12,3 $\pm$ 2,1
INT 6h	31,4 $\pm$ 6,2	386 $\pm$ 39	12,9 $\pm$ 2,2
INT 24h	30,5 $\pm$ 4,7	385 $\pm$ 64	14,1 $\pm$ 1,7

FOR: force. RS 0h, RS 6h et RS 24h : aucune, 6h et 24h de récupération entre la séance de répétition de sprints et les mesures de force. INT 0h, INT 6h et INT 24h : aucune, 6h et 24h de récupération entre la séance d'intermittent court et les mesures de force. CMJ: contremouvement jump, Pmoy: puissance moyenne, DC: développé-couché.

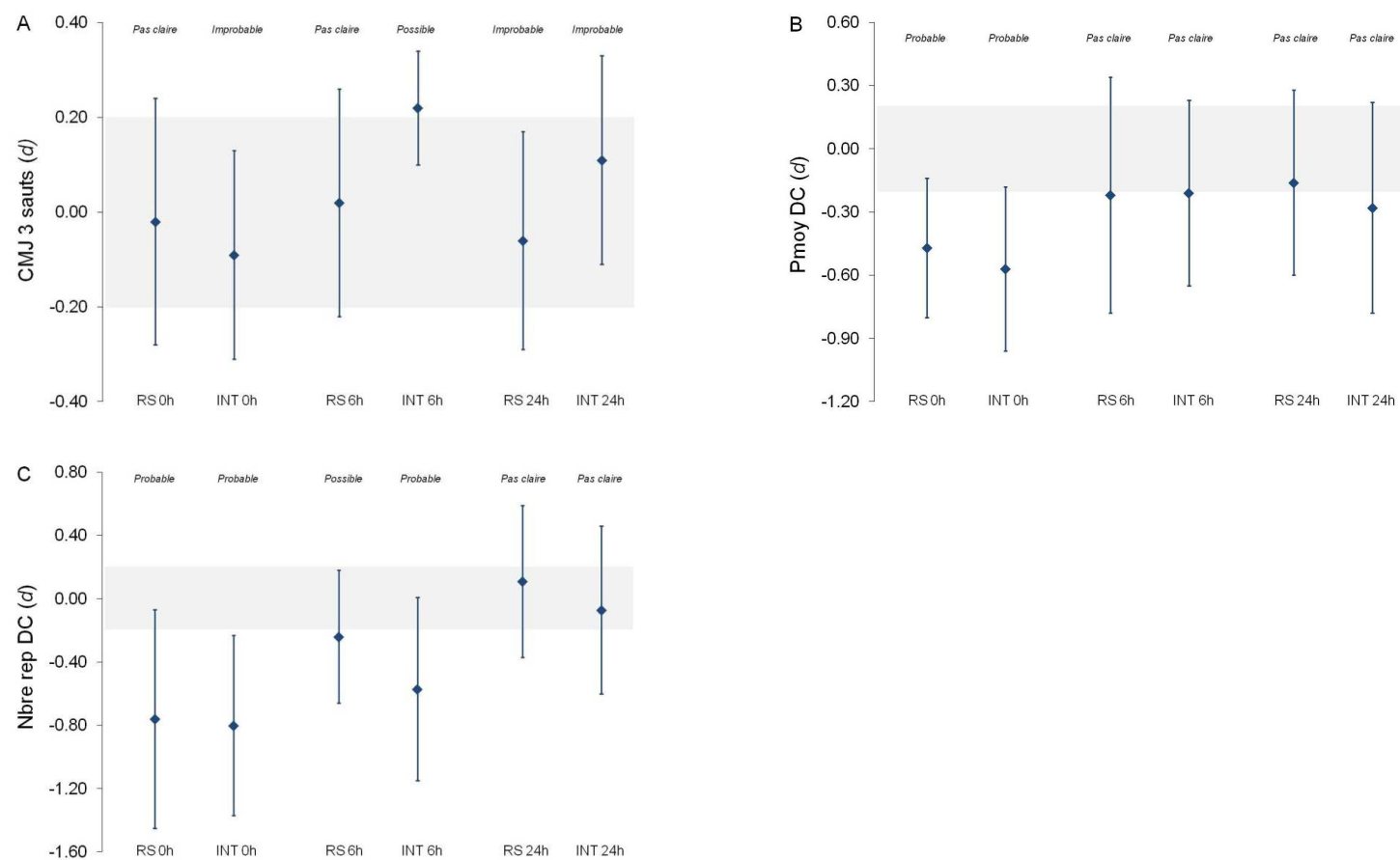


Figure 10. Différences moyennes standardisées (d) par rapport aux performances obtenues lors de FOR.

Les intervalles de confiance sont représentés par les barres verticales de part et d'autre des moyennes. La zone grisée représente le seuil de 0,2 caractérisant un effet trivial. RS 0h, RS 6h et RS 24h : aucune, 6h et 24h de récupération entre la séance de répétition de sprints et les mesures de force. INT 0h, INT 6h et INT 24h : aucune, 6h et 24h de récupération entre la séance d'intermittent court et les mesures de force. CMJ: contremouvement jump, DC: développé-couché, Pmoy: puissance moyenne. Les qualificatifs pas claire, improbable, possible et probable définissent les chances d'observer un effet positif ou négatif.

Moment musculaire

Les données sont représentées au sein du tableau 9 puis figure 11, 12 et 13.

Les performances de $CMV_{60 \text{ moy}}$ étaient inférieures pour INT 0h et INT 6h (*triviales*) et RS 24h (*triviale*). Les performances de $CMV_{60 \text{ max}}$ étaient inférieures pour les groupes INT 0h, INT 24h et RS 24h (*triviales*). Les valeurs de $CMV_{60 \text{ IF}}$ étaient supérieures pour les conditions RS 0h (*moyenne*) et INT 24h (*petite*). Lorsque l'on affirme que « les valeurs de $CMV_{60 \text{ IF}}$ étaient ... supérieures pour ... », cela signifie que l'indice de fatigue, ou la fatigabilité, mesurée au cours de la série de 10 contractions, s'améliorait. La diminution de performance au sein de la série était donc moindre. Autrement dit, la baisse de performance était plus petite pour RS 0h et INT 24h lors d'une série de 10 CMV à $60^\circ \cdot s^{-1}$.

Les valeurs de $CMV_{180 \text{ moy}}$ étaient inférieures pour INT 0h (*petite*) et supérieures pour RS 6h, RS 24h et INT 6h (*petites*). Les valeurs de $CMV_{180 \text{ max}}$ étaient inférieures pour INT 0h (*petite*) et supérieures pour RS 6h et RS 24h (*petites*). Les valeurs de $CMV_{180 \text{ IF}}$ étaient supérieures pour INT 6h, RS 6h et RS 24h (*triviales*). Autrement dit, la baisse de performance était plus faible pour INT 6h (*petite*), RS 6h et RS 24h (*triviales*).

Les performances de $CMV_{Q \text{ iso}}$ étaient inférieures pour INT 0h et RS 0h (*petites*). Celles de $CMV_{IJ \text{ iso}}$ étaient inférieures pour RS 0h et RS 24h (*petites*).

Tableau 9. Données brutes des performances réalisées sur ergomètre (moyenne $\pm$ écart type)

	$CMV_{60 \text{ moy}}$ (N·m)	$CMV_{60 \text{ max}}$ (N·m)	$CMV_{60 \text{ IF}}$ (%)	$CMV_{180 \text{ moy}}$ (N·m)	$CMV_{180 \text{ max}}$ (N·m)	$CMV_{180 \text{ IF}}$ (%)	$CMV_{Q \text{ iso}}$ (N·m)	$CMV_{IJ \text{ iso}}$ (N·m)
FOR	177,1 $\pm$ 38,8	205,2 $\pm$ 45,7	13,6 $\pm$ 2,4	143,2 $\pm$ 32,3	161,4 $\pm$ 39,1	10,9 $\pm$ 3,5	286,4 $\pm$ 78,1	96,8 $\pm$ 21,8
RS 0h	178,5 $\pm$ 46,9	199,3 $\pm$ 51,6	10,4 $\pm$ 1,7	146,5 $\pm$ 34,4	160,5 $\pm$ 36,2	8,8 $\pm$ 3,3	277,1 $\pm$ 78,1	90,0 $\pm$ 19,1
RS 6h	183,1 $\pm$ 45,5	211,7 $\pm$ 53,1	13,5 $\pm$ 2,9	149,8 $\pm$ 33,3	166,5 $\pm$ 38,7	9,9 $\pm$ 2,8	283,2 $\pm$ 78,0	98,1 $\pm$ 24,1
RS 24h	171,5 $\pm$ 45,4	197,3 $\pm$ 47,3	13,6 $\pm$ 5,7	147,3 $\pm$ 32,8	163,5 $\pm$ 37,4	9,8 $\pm$ 3,0	276 $\pm$ 70,1	90,0 $\pm$ 17,0
INT 0h	168,5 $\pm$ 35,1	192,2 $\pm$ 38,0	12,6 $\pm$ 3,7	139,6 $\pm$ 33,2	154,9 $\pm$ 34,3	9,7 $\pm$ 2,9	262,2 $\pm$ 67,6	86,4 $\pm$ 17,0
INT 6h	174,2 $\pm$ 39,8	203,0 $\pm$ 41,9	14,4 $\pm$ 5,6	147,9 $\pm$ 29,7	163,3 $\pm$ 33,7	9,3 $\pm$ 4,3	282,2 $\pm$ 67,2	92,8 $\pm$ 14,5
INT 24h	177,2 $\pm$ 45,8	200,2 $\pm$ 49,7	11,6 $\pm$ 3,2	139,4 $\pm$ 36,9	156,8 $\pm$ 40,6	11,1 $\pm$ 3,0	278,5 $\pm$ 79,9	92,9 $\pm$ 15,2

FOR: force. RS 0h, RS 6h et RS 24h : aucune, 6h et 24h de récupération entre la séance de répétition de sprints et les mesures de force. INT 0h, INT 6h et INT 24h : aucune, 6h et 24h de récupération entre la séance d'intermittent court et les mesures de force. CMV_{moy} : moyenne des 10 contractions maximales volontaires, CMV_{max} : meilleure valeur des 10 contractions maximales volontaires, CMV_{IF} : indice de fatigue à l'issue des 10 contractions maximales volontaires. $CMV_{IJ \text{ iso}}$: contraction maximale volontaire isométrique des ischio-jambiers, $CMV_{Q \text{ iso}}$: contraction maximale volontaire isométrique du quadriceps.

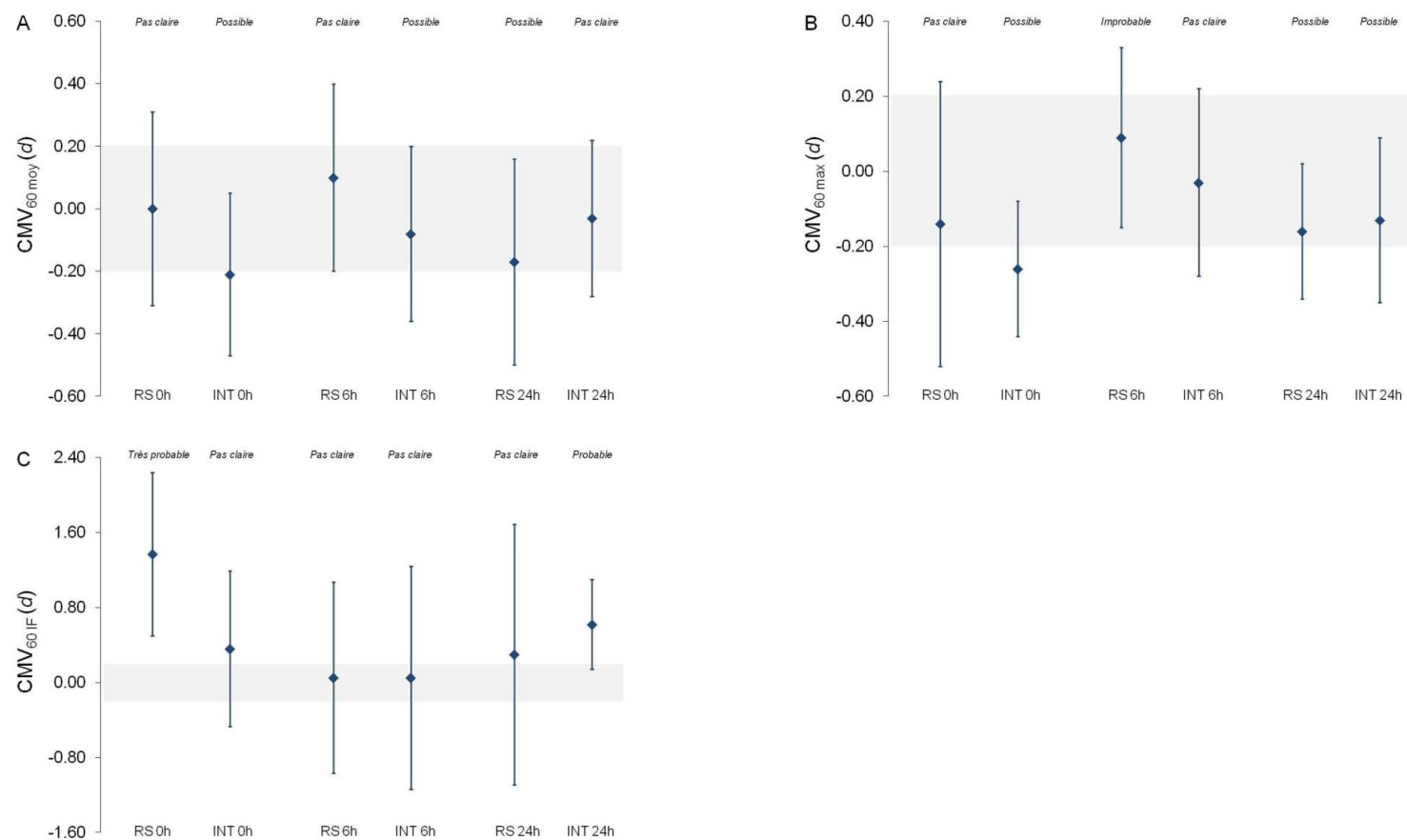


Figure 11. Différences moyennes standardisées (d) par rapport aux performances obtenues lors de FOR.

Les intervalles de confiance sont représentés par les barres verticales de part et d'autre des moyennes. La zone grisée représente le seuil de 0,2 caractérisant un effet trivial. RS 0h, RS 6h et RS 24h : aucune, 6h et 24h de récupération entre la séance de répétition de sprints et les mesures de force. INT 0h, INT 6h et INT 24h : aucune, 6h et 24h de récupération entre la séance d'intermittent court et les mesures de force. CMV_{moy} : moyenne des 10 contractions maximales volontaires, CMV_{max} : meilleure valeur des 10 contractions maximales volontaires, CMV_{IF} : indice de fatigue à l'issue des 10 contractions maximales volontaires. Les qualificatifs pas claire, improbable, possible, probable et très probable définissent les chances d'observer un effet positif ou négatif.

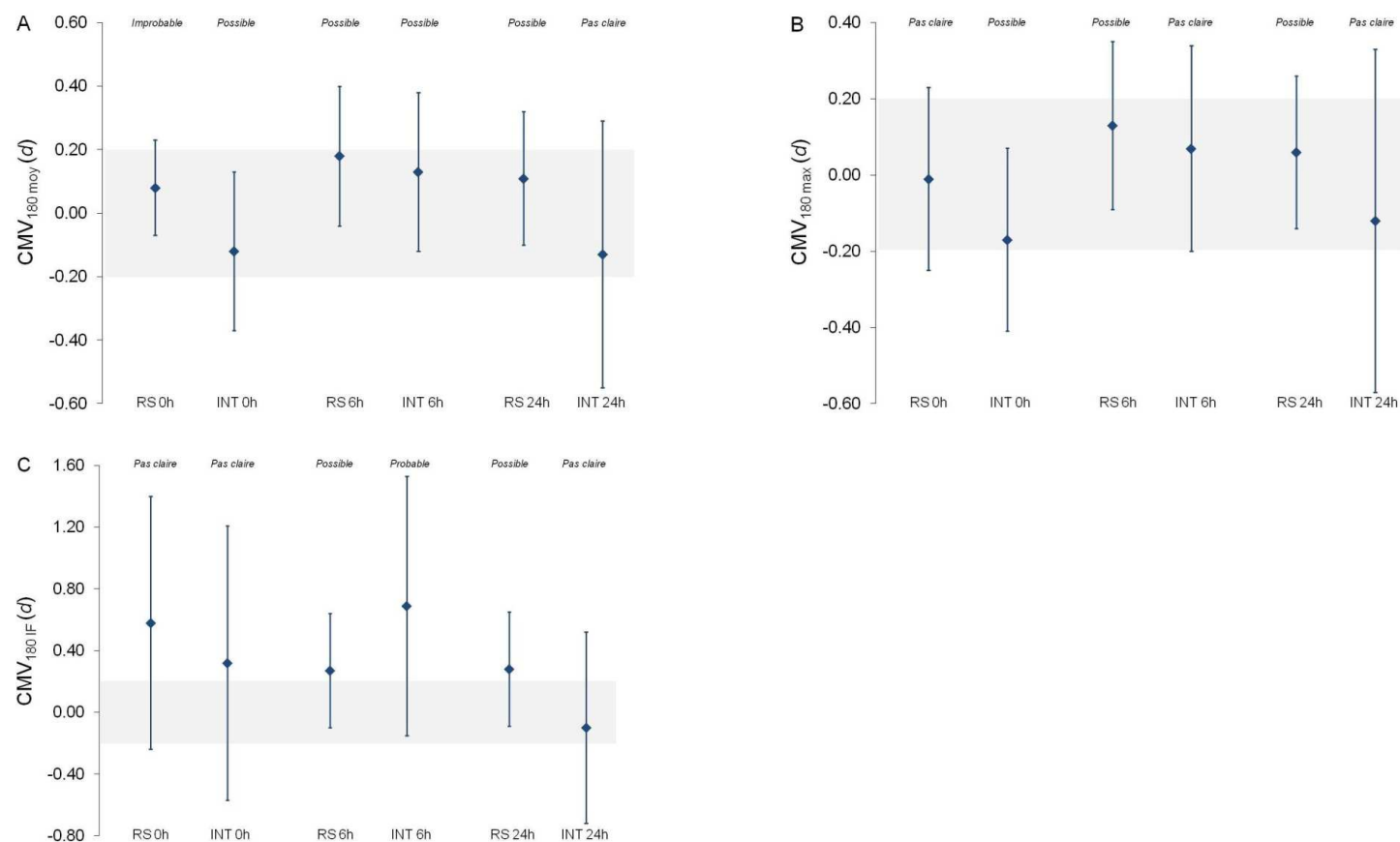


Figure 12. Différences moyennes standardisées (d) par rapport aux performances obtenues lors de FOR.

Les intervalles de confiance sont représentés par les barres verticales de part et d'autre des moyennes. La zone grisée représente le seuil de 0,2 caractérisant un effet trivial. RS 0h, RS 6h et RS 24h : aucune, 6h et 24h de récupération entre la séance de répétition de sprints et les mesures de force. INT 0h, INT 6h et INT 24h : aucune, 6h et 24h de récupération entre la séance d'intermittent court et les mesures de force. CMV_{moy} : moyenne des 10 contractions maximales volontaires, CMV_{max} : meilleure valeur des 10 contractions maximales volontaires, CMV_{IF} : indice de fatigue à l'issue des 10 contractions maximales volontaires. Les qualificatifs pas claire, improbable, possible et probable définissent les chances d'observer un effet positif ou négatif.

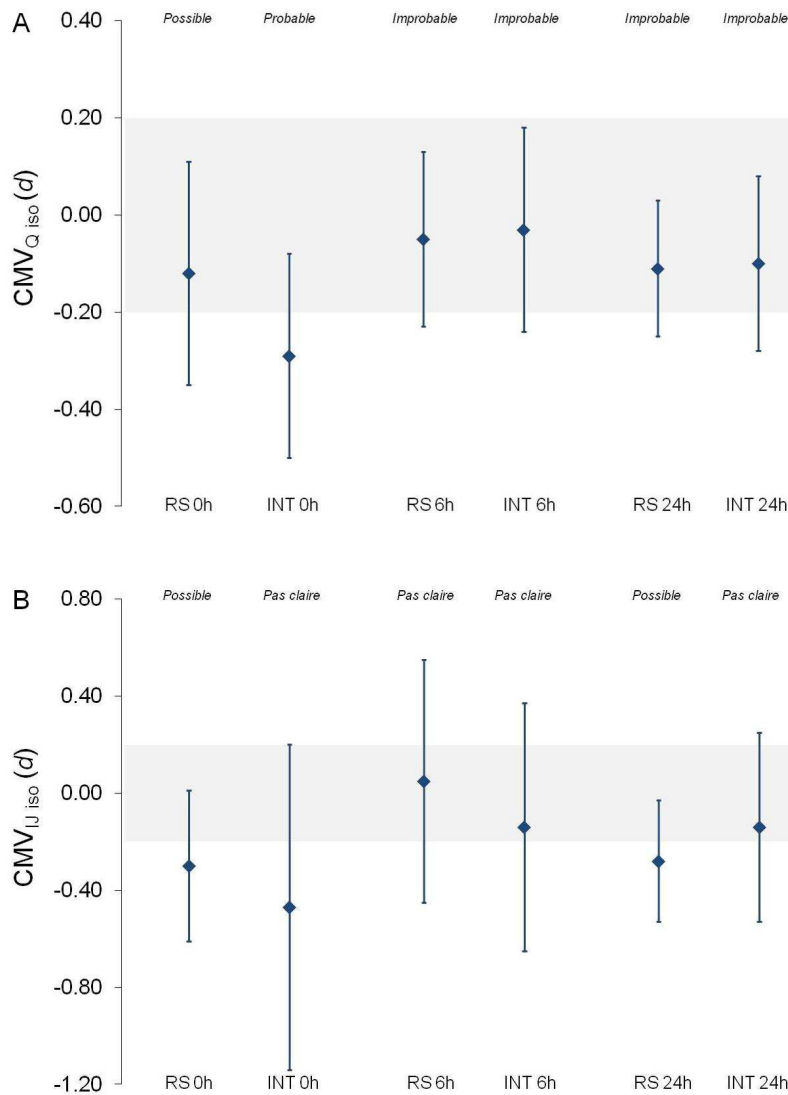


Figure 13. Différences moyennes standardisées (d) par rapport aux performances obtenues lors de FOR.

Les intervalles de confiance sont représentés par les barres verticales de part et d'autre des moyennes. La zone grisée représente le seuil de 0,2 caractérisant un effet trivial. RS 0h, RS 6h et RS 24h : aucune, 6h et 24h de récupération entre la séance de répétition de sprints et les mesures de force. INT 0h, INT 6h et INT 24h : aucune, 6h et 24h de récupération entre la séance d'intermittent court et les mesures de force. $CMV_{IJ_{150}}$: contraction maximale volontaire isométrique des ischio-jambiers, $CMV_{Q_{150}}$: contraction maximale volontaire isométrique du quadriceps. Les qualificatifs pas claire, improbable, possible et probable définissent les chances d'observer un effet positif ou négatif.

Propriétés neuromusculaires

Les données des propriétés neuromusculaires sont représentées dans le tableau 10.

Les valeurs de $RMS_{60\text{ moy}}$ étaient inférieures pour INT 0h, RS 0h et RS 24h (*petites*) (*petite*) puis pour RS 6h (*triviale*). Les valeurs de $RMS_{60\text{ max}}$ étaient inférieures pour INT 0h (*petite*) et INT 24h (*triviale*). Les valeurs de $RMS_{60\text{ max}}$ étaient inférieures pour RS 0h, RS 6h et RS 24h (*petites*).

Les valeurs de $RMS_{180\text{ moy}}$ étaient inférieures pour INT 0h et INT 24h (*petites*). Les valeurs de $RMS_{180\text{ moy}}$ étaient inférieures pour RS 0h, RS 6h et 24h (*petites*). Les valeurs de $RMS_{180\text{ max}}$ étaient inférieures pour RS 0h (*triviale*), INT 0h, INT 6h et INT 24h (*petites*).

Les valeurs de $RMS_{Q\text{ iso}}$ étaient inférieures pour INT 0h et INT 24h (*petites*). Les valeurs de $RMS_{Q\text{ iso}}$ étaient inférieures pour RS 0h, RS 6h et RS 24h (*petites*).

Les valeurs de secousse musculaire étaient inférieures pour INT 0h (*petite*), INT 6h et RS 0h (*triviales*).

Tableau 10. Données brutes et différences moyennes standardisées (d) par rapport aux performances obtenues lors de FOR.

	Valeurs	Chances	Différences moyennes standardisées $\pm$ 90% IC	
RMS_{60 moy} (u.a)				
FOR	0,05 $\pm$ 0,02			
INT 0h	0,04 $\pm$ 0,02	Probables	-0,48 $\pm$ 0,31	Petites
INT 6h	0,05 $\pm$ 0,02	Pas claires	-0,10 $\pm$ 0,33	-
INT 24h	0,05 $\pm$ 0,03	Pas claires	-0,22 $\pm$ 0,46	-
RS 0h	0,04 $\pm$ 0,02	Probables	-0,54 $\pm$ 0,48	Petites
RS 6h	0,05 $\pm$ 0,02	Possibles	-0,29 $\pm$ 0,26	Triviales
RS 24h	0,04 $\pm$ 0,02	Probables	-0,66 $\pm$ 0,53	Petites
RMS_{60 max} (u.a)				
FOR	0,05 $\pm$ 0,03			
INT 0h	0,04 $\pm$ 0,02	Probables	-0,48 $\pm$ 0,37	Petites
INT 6h	0,05 $\pm$ 0,02	Pas claires	0,02 $\pm$ 0,42	-
INT 24h	0,04 $\pm$ 0,03	Possibles	-0,22 $\pm$ 0,37	Triviales
RS 0h	0,03 $\pm$ 0,01	Très probables	-0,67 $\pm$ 0,37	Petites
RS 6h	0,04 $\pm$ 0,03	Probables	-0,36 $\pm$ 0,31	Petites
RS 24h	0,04 $\pm$ 0,02	Très probables	-0,63 $\pm$ 0,53	Petites
RMS_{180 moy} (u.a)				
FOR	0,07 $\pm$ 0,03			
INT 0h	0,05 $\pm$ 0,02	Très probables	-0,61 $\pm$ 0,36	Petites
INT 6h	0,06 $\pm$ 0,02	Pas claires	-0,14 $\pm$ 0,53	-
INT 24h	0,05 $\pm$ 0,03	Probables	-0,55 $\pm$ 0,73	Petites
RS 0h	0,05 $\pm$ 0,02	Probables	-0,72 $\pm$ 0,58	Petites
RS 6h	0,06 $\pm$ 0,03	Probables	-0,49 $\pm$ 0,51	Petites
RS 24h	0,05 $\pm$ 0,02	Probables	-0,77 $\pm$ 0,59	Petites
RMS_{180 max} (u.a)				
FOR	0,06 $\pm$ 0,02			
INT 0h	0,05 $\pm$ 0,02	Probables	-0,72 $\pm$ 0,58	Petites
INT 6h	0,07 $\pm$ 0,04	Probables	-0,49 $\pm$ 0,51	Petites
INT 24h	0,06 $\pm$ 0,04	Probables	-0,77 $\pm$ 0,59	Petites
RS 0h	0,04 $\pm$ 0,02	Probables	-0,53 $\pm$ 0,50	Petites
RS 6h	0,06 $\pm$ 0,03	Pas claires	-0,01 $\pm$ 0,40	-
RS 24h	0,05 $\pm$ 0,03	Pas claires	-0,33 $\pm$ 0,80	-
RMS_{iso} (u.a)				
FOR	0,06 $\pm$ 0,03			
INT 0h	0,04 $\pm$ 0,02	Très probables	-0,61 $\pm$ 0,26	Petites
INT 6h	0,05 $\pm$ 0,02	Pas claires	-0,2 $\pm$ 0,41	-
INT 24h	0,05 $\pm$ 0,03	Probables	-0,37 $\pm$ 0,25	Petites
RS 0h	0,04 $\pm$ 0,02	Très probables	-0,6 $\pm$ 0,38	Petites
RS 6h	0,05 $\pm$ 0,03	Probables	-0,44 $\pm$ 0,45	Petites
RS 24h	0,04 $\pm$ 0,02	Très probables	-0,66 $\pm$ 0,32	Petites
Secousse musculaire (N·m)				
FOR	76,6 $\pm$ 19,3			
INT 0h	69,7 $\pm$ 10,7	Probables	-0,39 $\pm$ 0,38	Petites
INT 6h	74,7 $\pm$ 17,7	Possibles	-0,11 $\pm$ 0,28	Triviales
INT 24h	75,4 $\pm$ 17,7	Pas claires	-0,06 $\pm$ 0,27	-
RS 0h	72,5 $\pm$ 14,1	Possibles	-0,21 $\pm$ 0,32	Triviales
RS 6h	75,5 $\pm$ 14,0	Pas claires	-0,03 $\pm$ 0,41	-
RS 24h	76,6 $\pm$ 14,8	Pas claires	0,03 $\pm$ 0,38	-

FOR: force. RS 0h, RS 6h et RS 24h : aucune, 6h et 24h de récupération entre la séance de répétition de sprints et les mesures de force. INT 0h, INT 6h et INT 24h : aucune, 6h et 24h de récupération entre la séance d'intermittent court et les mesures de force. RMS: root mean square. Les qualificatifs pas claire, improbable, possible, probable et très probable définissent les chances d'observer un effet positif ou négatif.

Discussion

Le but de cette étude était de mesurer l'effet aigu de différents types d'entraînement aérobic (RS vs. INT) sur plusieurs paramètres de la production de force. Les principaux résultats ont permis de montrer 1) une récupération encore incomplète de la production de force des membres inférieurs 24h après l'effort aérobic de haute intensité (répétition de sprints longs, RS et intermittent court, INT), 2) que la fatigue mesurée à 24h pourrait être davantage spécifique à l'effort de répétition de sprints longs, comme attesté par le plus grand nombre de variables affectées après ce type d'effort (RS) en comparaison à l'effort intermittent court, 3) que les performances de puissance et de force du haut du corps sembleraient quant à elles altérées jusqu'à 6h après RS et INT. La fatigue induite serait donc dépendante de la durée de récupération entre les efforts, du type d'entraînement et du groupe musculaire sollicité.

L'un des principaux résultats de notre étude mettait en avant des altérations de la production de force des muscles extenseurs du genou, en isométrie et anisométrie ($60^{\circ}\cdot s^{-1}$ et $180^{\circ}\cdot s^{-1}$), immédiatement, 6h et 24h après les deux formes d'exercice (RS et INT). Celle-ci pourrait s'expliquer, notamment par une fatigue d'origine périphérique, trouvant son origine au niveau du couplage excitation-contraction, comme le suggère la diminution de la secousse musculaire dans les conditions RS 0h puis INT 0h et 6h. Ces résultats se distinguent des données de la littérature car la plupart des travaux indiquaient une altération de la production de force 6 à 8h après la réalisation d'efforts fatigants continus et intermittents longs (Bentley et coll., 2000; Sporer & Wenger, 2003). Les efforts aérobies à haute intensité (INT et RS), réalisés en course à pied, induiraient donc une fatigue accrue par rapport aux exercices continus et intermittents longs sur vélo (Bentley et coll., 2000; Sporer & Wenger, 2003). Nos propos sont confirmés par les travaux de De Souza et coll. (2007) mettant en avant une réduction du nombre de répétitions à 80% du 1RM à la presse, plus importante suite à un intermittent à haute intensité (1/1 min à VO_{2max}) par rapport à un travail continu à 90% du seuil anaérobie. Cette altération de performance, plus marquée suite aux efforts aérobies de haute intensité, pourrait s'expliquer par une fatigue plus importante des fibres rapides de type II, préférentiellement sollicitées au cours des exercices de force. L'effort d'endurance induit le recrutement préférentiel des fibres lentes de type I mais peut également solliciter les fibres de type II lorsque l'intensité de l'exercice augmente (Dudley et coll., 1982). Les exercices aérobies de haute intensité (RS et INT) induiraient donc une fatigue des fibres rapides pouvant perturber la production de force suivante (Sporer & Wenger, 2003). D'autres facteurs tels que l'accumulation des métabolites pourraient expliquer cette fatigue aigue. Lors des

entraînements aérobies de haute intensité, une partie de l'énergie nécessaire est fournie par la glycolyse et s'accompagne alors de la production de dégradés métaboliques (H^+ , Pi, ADP) pouvant perturber la contraction musculaire (Sporer & Wenger, 2003). Les efforts d'endurance de haute intensité induiraient donc une fatigue accrue par rapport aux efforts sous-maximaux à travers une plus grande sollicitation des fibres rapides et une plus grande production de métabolites issus de la glycolyse. D'autres investigations mériteraient de confirmer ces propos.

Les exercices de haute intensité, étudiés au cours de notre expérimentation, induiraient une plus grande fatigue aigue que les efforts continus ou intermittents longs (Bentley et coll., 2000; De Souza et coll., 2007; Sporer & Wenger, 2003). Des différences de réponses peuvent même être observées entre les deux types d'entraînement de haute intensité, à savoir RS et INT. Tout d'abord, nous constatons une diminution des performances de CMV_{iso} uniquement après les efforts de répétition de sprints longs (RS 0h et RS 24h). Une altération de la production de force des ischio-jambiers, en condition isométrique, avait également été constatée suite à la reproduction des efforts spécifiques du joueur de football, caractérisée par une répétition d'efforts intenses de sprints (Robineau et coll., 2012). Il semblerait que ces types d'efforts soient donc plus traumatisants pour les ischio-jambiers que l'entraînement intermittent court. Les efforts de sprints sollicitent intensément ces muscles en mode excentrique. Ce régime de contraction peut induire une fatigue périphérique avec l'apparition de dommages de l'ultrastructure myofibrillaire. Les désorganisations de la cellule musculaire les plus fréquemment observées incluent des déformations des stries Z, des lésions de la bande A et un « surétirement » des sarcomères induisant une réduction du nombre de ponts actine-myosine fonctionnels (Kuipers 1994 ; Clarkson 1997).

La production de force maximale, mesurée en condition isométrique ($CMV_{iso Q}$) et concentrique ($CMV_{60 \text{ et } 180 \text{ max}}$), ainsi que la production de force moyenne ($CMV_{60 \text{ et } 180 \text{ moy}}$) des extenseurs du genou étaient altérées suite aux deux formes d'exercices de haute intensité. Cependant, nous observons que le délai d'apparition de la fatigue n'est pas le même selon les deux types d'efforts. L'entraînement INT induit une réduction de la production de force immédiatement après l'effort fatigant pour plusieurs modalités de contractions ($CMV_{iso Q}$, $CMV_{60 \text{ et } 180 \text{ max}}$ et $CMV_{60 \text{ et } 180 \text{ moy}}$). Cette perturbation peut également intervenir après 6h de récupération pour $CMV_{60 \text{ moy}}$ et à 24h pour $CMV_{60 \text{ max}}$ et $CMV_{180 \text{ moy}}$. L'impact de RS sur la production de force est quant à elle assez différente; il semblerait que ce type d'exercice induise une apparition retardée de la fatigue, à 24h, et que celle-ci n'intervienne que sur la modalité de contraction concentrique à $60^\circ \cdot s^{-1}$ ($CMV_{60 \text{ max et moy}}$). Cette apparition

retardée pourrait s'expliquer par les douleurs musculaires (DOMS, delayed onset muscle soreness) induites par la répétition de sprints. Des données similaires ont été proposées par Howatson & Milak, (2009) et montraient alors qu'un exercice consistant à répéter 15 sprints de 30m, entrecoupés de périodes de récupération de 60s, induisait, à post 24h, une diminution significative de la CMV accompagnée d'une augmentation des DOMS et des concentrations de créatine kinase, marqueurs des traumatismes musculaires après 24h de délai. L'entraînement de répétition de sprints aurait donc un impact retardé (24h) sur la production de force des muscles fléchisseurs et extenseurs du genou alors que l'entraînement intermittent perturberait principalement la production de force du quadriceps immédiatement après l'effort (0h).

Les efforts d'endurance de haute intensité, utilisés dans notre étude, induisent également une fatigue des membres supérieurs. Nous avons, en effet, observé une altération de la puissance musculaire et de la force maximale des muscles des membres supérieurs, mesurée au cours d'un mouvement de DC, immédiatement et 6h après, respectivement, les efforts fatigants. Plusieurs travaux se sont intéressés à mesurer les effets aigus de l'entraînement d'endurance, sollicitant principalement les muscles des membres inférieurs, sur la performance de force subséquente (Bentley et coll., 2000; Leveritt & Abernethy, 1999; Sporer & Wenger, 2003) mais aucun d'entre eux, à notre connaissance, n'avait identifié de fatigue des membres supérieurs. Par exemple, Sporer & Wenger (2003) ne montraient aucune altération du nombre de répétition réalisé à 75% du 1RM en DC, sur quatre séries, à la suite de deux types d'entraînement d'endurance sur vélo (intermittent long, 6×3 min et continu, 36 min à 70% PMA) alors que le volume de travail semblait perturbé au cours d'un exercice de presse à jambe. De même, Reed et coll., (2013) ne montraient aucune diminution du volume d'entraînement réalisé au cours de 6 séries à 80% du 1RM en DC alors qu'ils observaient une perturbation de ce volume lors d'un mouvement de ½ squat, suite à 45 min de vélo à 75% de FCmax. Ces études (Sporer et Wenger, 2003; Reed et coll., 2013) mettaient donc en avant une fatigue périphérique pour expliquer l'altération de la production de force des groupes musculaires mobilisés au cours des deux formes d'exercice (endurance et force). Les différences de performances des muscles des membres supérieurs que nous observons avec les résultats de notre étude peuvent s'expliquer par le type d'entraînement d'endurance utilisé. Il semblerait que l'entraînement aérobique de haute intensité, réalisé en course à pied, qu'il soit sous forme d'intermittent court ou de répétition de sprints longs, induise une fatigue globale, qui affecte à la fois les membres inférieurs et supérieurs. Nous pouvons alors se questionner quant à l'origine de la fatigue et proposer de manière purement spéculative que l'entraînement

aérobie de haute intensité, en course à pied, induirait également une fatigue d'origine centrale pouvant altérer la production de force du haut du corps. Cette fatigue pourrait être imputée à des modifications du niveau d'activation et de l'activité myoélectrique des muscles agonistes. La fatigue centrale, quantifiée par les valeurs de RMS sur les muscles du quadriceps, confortent cette hypothèse. Néanmoins, d'autres investigations seraient nécessaires afin de vérifier cette hypothèse pour les muscles des membres supérieurs.

Les indices de fatigue, mesurés à l'issue des séries des 10 contractions concentriques, ne sembleraient que très peu influencées après la réalisation des efforts d'endurance. Les quelques variations vont dans le sens d'une réduction de l'indice de fatigue. Cela signifie que la diminution de force est moindre, lors des séries de 10 contractions concentriques, à la suite des efforts RS et INT. Cela peut s'expliquer simplement par un niveau de force maximal réduit lors des configurations associant les efforts d'endurance et les mesures de force. En effet, plusieurs travaux ont montré que le niveau de force absolue pouvait influencer la performance au cours d'un temps limite ou d'un test d'efforts répétés. La performance au temps limite serait par exemple plus importante chez les femmes que chez les hommes, dont la force maximale est plus grande, lors de contractions prolongées au niveau des muscles extenseurs du genou (Clark et coll., 2005). Selon Girard et coll. (2011), l'un des facteurs déterminants de la fatigue au cours d'un test de sprints répétés serait la performance initiale. En effet, celle-ci semblerait corrélée positivement avec le décrétement de la performance au cours du test.

Conclusion:

Cette étude suggère que la fatigue aigue induite par l'effort aérobic de haute intensité, considérée comme en partie responsable de l'interférence sur le développement de la masse musculaire et de la force, perturberait les différents paramètres de la production de force des membres supérieurs et inférieurs pendant des délais respectifs de 6 et 24h. L'effort de répétition de sprints longs semble avoir des effets retardés sur la performance neuromusculaire en altérant principalement la performance de force jusqu'à 24h après l'exercice initial.

Applications pratiques:

- Ces résultats suggèrent que les préparateurs physiques devraient éviter de planifier, dans la même journée, une séance de musculation mixte (bas et haut du corps) après un effort d'endurance type intermittent court.
- Il serait également préférable de ne pas programmer de séance de musculation du haut du corps, au sein d'une même journée, après l'effort de répétition de sprints longs. Les exercices de musculation du bas du corps seraient quant à eux à éviter dans les 24h après l'exercice de sprint.
- Une solution pour optimiser le temps d'entraînement serait alors de placer l'entraînement de musculation en premier. La fatigue aigue ne favoriserait donc plus l'interférence de l'endurance sur la force.

Dans la configuration FOR/AER, sans temps de récupération, le phénomène d'interférence pourrait en revanche s'expliquer par des réponses moléculaires conflictuelles inhibant la synthèse protéique (Coffey et coll., 2009). Le temps de récupération entre les séances pourrait alors permettre de lutter contre ce mécanisme.

Etude 2. Effet du temps de récupération entre les séances de force et d'endurance sur les adaptations neuromusculaires et oxydatives

Introduction

L'ordre des séances pourrait avoir une incidence sur les gains de force à l'issue des périodes d'entraînement combiné (Bell et coll., 1988). L'agencement AER/FOR induirait une fatigue aigue (étude 1) pouvant être considérée comme un mécanisme explicatif de l'interférence sur le développement des qualités neuromusculaires. L'ordre FOR/AER éviterait ainsi ce phénomène et permettrait d'optimiser les gains de force. Pour cette raison, nous avons choisi, au sein de cette procédure expérimentale, la configuration d'entraînement la moins délétère pour la production de force, c'est-à-dire FOR/AER. Le phénomène interférentiel peut également être lié à des réponses moléculaires antagonistes qui elles mêmes, peuvent être influencées par le délai de récupération. Celui-ci serait alors un autre facteur important, pouvant limiter l'effet d'interférence. A notre connaissance, peu d'études se sont intéressées à analyser l'effet d'un temps de récupération sur les adaptations de force à l'issue d'une période combinée. Il a été montré qu'un délai de 24h entre les séquences induirait des gains de force supérieurs à ceux induits lorsque la configuration d'entraînement ne proposait aucune période de récupération entre les exercices (Sale et coll., 1990). Cependant, l'effet d'un temps de récupération intermédiaire, de l'ordre de quelques heures, sur la production de force, n'a jamais été étudié. Cette analyse serait intéressante d'autant plus que le sport de haut niveau s'accompagne d'une augmentation du volume d'entraînement et par conséquent d'une organisation biquotidienne de la charge de travail.

L'objectif de cette première étude était alors de mesurer les effets de plusieurs durées de récupération (0h, 6h et 24h) entre les efforts de force et d'endurance, sur plusieurs paramètres de la production de force. Nous avons formulé l'hypothèse qu'une durée de récupération minimale de 6h serait suffisante pour obtenir des gains de force supérieurs à ceux mesurés à l'issue de la configuration sans temps de récupération (0h).

Méthode

L'expérimentation durait 10 semaines avec une semaine dédiée aux sessions de familiarisation, deux semaines d'évaluation (initiale et finale) et sept semaines d'entraînement (figure 14). La procédure expérimentale comprenait cinq groupes dont trois d'entraînements combinés, un de force uniquement (FOR) et un contrôle (CONT). Les entraînements

combinés consistaient en deux séquences de chaque qualité par semaine. La charge de travail totale était identique pour tous les groupes d'entraînement combiné. La seule différence était le délai entre les séquences de force et d'endurance. Les séances de force étaient toujours réalisées en premières et suivies immédiatement (0h), 6h (C-6h) ou 24h (C-24h) après par l'entraînement d'endurance. Bien évidemment, le groupe d'entraînement FOR ne réalisait que les séances de musculation. Un délai minimal de 72h était obligatoirement respecté entre deux séances de force pour tous les groupes d'entraînement (C-0h, C-6h, C-24h et F). Le groupe CONT ne s'entraînait pas pendant toute la durée de la procédure expérimentale et ne réalisait seulement que les sessions de familiarisation et de tests. Les participants avaient pour consigne de ne pas participer à d'autres activités physiques, ni de modifier leurs habitudes alimentaires durant toute la durée du protocole.

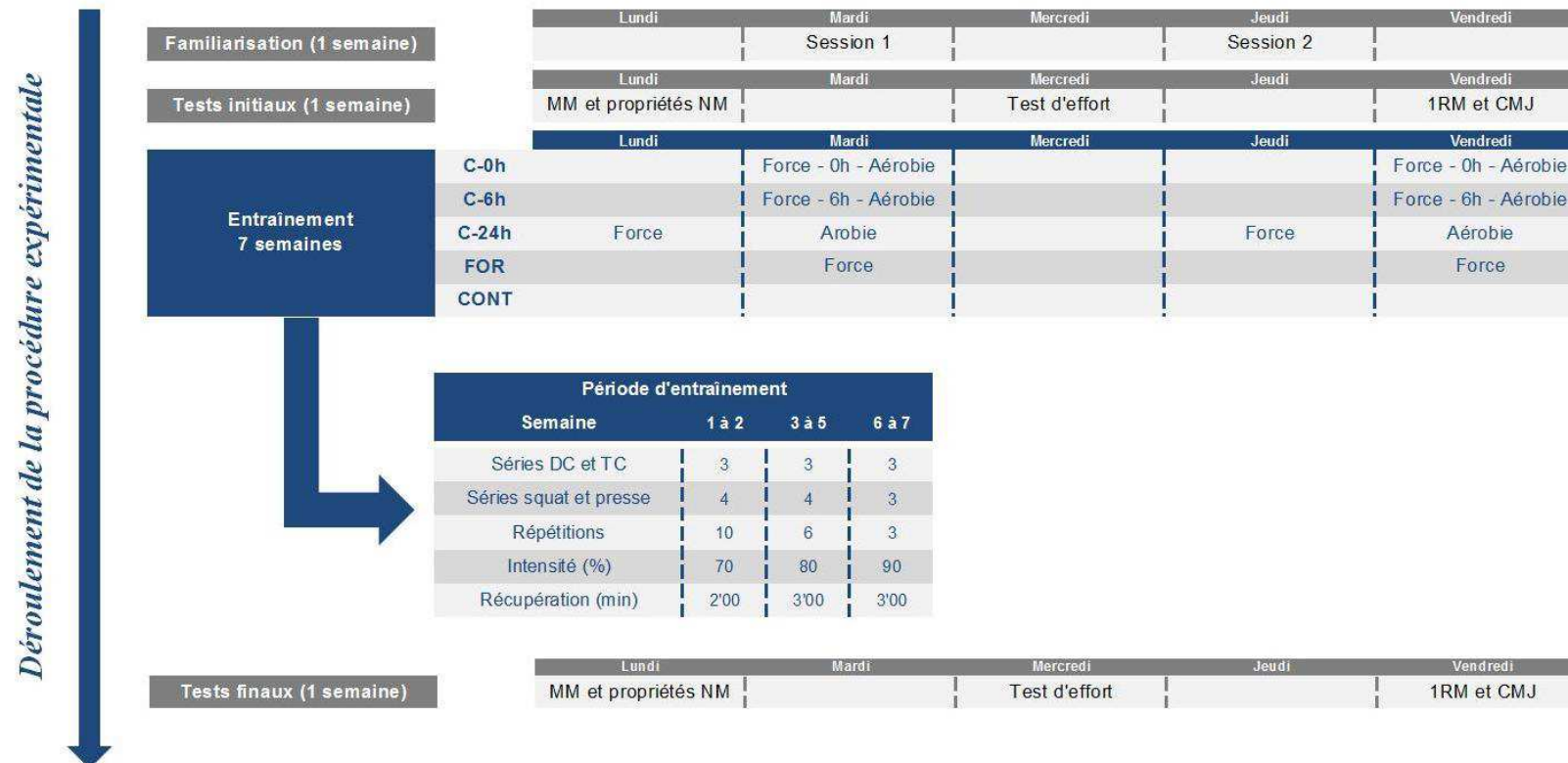


Figure 14. Présentation de la procédure expérimentale de l'étude 1.

CONT: contrôle; C-0h, C-6h et C-24h: aucune, 6h et 24h de récupération entre séances; FOR: Force, DC : Développé-couché, TC : Tirage-couché, MM: moment musculaire, NM: neuromusculaire, RM: répétition maximale, CMJ: contremouvement jump.

Présentation des entraînements

Entraînement de force

L'entraînement de force comprenait 5 exercices. Chaque session débutait par un échauffement à base d'exercice de renforcement des abdominaux et de gainage. L'entraînement était divisé en trois périodes durant lesquelles l'intensité augmentait progressivement (figure 14). Le 1RM était estimé chaque semaine afin de réguler précisément la charge de travail. Les séries de presse étaient associées à des séries de contractions excentriques des ischio-jambiers. Le temps de récupération entre les séries variait de 2 à 3 min selon les recommandations d'entraînement de la force (hypertrophie vs. force maximale) proposées par Zatsiorski (1992). Toutes les contractions musculaires étaient réalisées dans des conditions isoinertielles avec des machines spécifiques (Cybex, Medway, USA). Les exercices étaient alternés entre le haut et le bas du corps et étaient randomisés au sein de chaque entraînement.

Entraînement aérobie

L'entraînement aérobie consistait, après un échauffement de 8 min à intensité modérée, en 3 séries de 6 min d'intermittent 15/15 s à haute intensité. Les participants, alternaient 15 s de course à 120% de la VMA avec 15 s de récupération passive. Ils portaient un cardio fréquencemètre (Polar Electro Oy, Kempele, Finland) durant chaque séquence d'entraînement pour vérifier la sollicitation cardiaque et ainsi réguler les distances à couvrir pendant 15 s d'effort. La première séance d'endurance était consacrée à l'évaluation de la VMA au moyen d'un test de terrain. Celle-ci était complétée par une série de 6 min d'intermittent 15/15 s.

Sessions de tests

Les participants étaient contraints à deux sessions de familiarisation à l'ergomètre isocinétique, au tapis roulant et aux différents exercices de musculation. L'organisation des sessions de tests pré et post entraînement étaient identiques. Les tests étaient réalisés dans un même ordre et aux mêmes horaires pour éviter toute influence de la chronobiologie sur la performance physique.

La semaine commençait par l'évaluation des propriétés neuromusculaires des muscles extenseurs du genou. Chaque session débutait par la détermination de l'intensité optimale de stimulation électrique pour les muscles du quadriceps. Ensuite, les sujets réalisaient un échauffement standardisé consistant à réaliser 8 et 6 contractions concentriques sous

maximales à des vitesses angulaires respectives de $180^{\circ}\cdot s^{-1}$ et $60^{\circ}\cdot s^{-1}$ puis 2 contractions isométriques sous maximales d'environ 4 s à un angle de 75° . Après l'échauffement, le moment musculaire volontaire, pour chacune des contractions évoquées ci-dessus, était mesuré en condition maximale. Les participants maintenaient les contractions maximales volontaires isométriques (CMV_{iso}) ~ 5 s à un angle de flexion du genou de 75° . Ils exécutaient ensuite quatre contractions maximales aux vitesses de $60^{\circ}\cdot s^{-1}$ (CMV_{60}) et $180^{\circ}\cdot s^{-1}$ (CMV_{180}). Deux essais, séparés par 2 min de récupération, étaient proposés pour chaque condition. La valeur maximale obtenue lors de la CMV_{iso} ainsi que les valeurs de force correspondantes à un angle de 75° lors de CMV_{60} et CMV_{180} étaient retenues pour l'analyse. Ensuite, la capacité à répéter des efforts isométriques était évaluée au moyen d'une procédure consistant en 20 CMV_{iso} de 5 s séparées par 10 s de récupération. Le moment moyen mesuré pour chaque contraction était retenu pour l'analyse. Dans un premier temps, nous avons calculé le travail musculaire moyen: $CMV_{moy} = \Sigma CMV / 20$. Dans un second temps, nous avons mesuré la fatigabilité (CMV_{fat}) au moyen de la formule suivante :

$$CMV_{fat} (\%) = 1 - (CMV_{moy} / CMV_{max}) \times 100, \text{ avec } CMV_{max} \text{ correspondant à la meilleure valeur des 20 } CMV \text{ (Girard et coll., 2011).}$$

La deuxième évaluation consistait au test d'effort maximal sur tapis roulant avec mesure des échanges gazeux. Enfin, la semaine se concluait par les mesures de terrain. L'ordre des évaluations était le même pour tous les participants et permettait d'alterner les exercices sollicitant les membres inférieurs et supérieurs (DC, $\frac{1}{2}$ squat, TC, presse et CMJ). Seules les performances obtenues aux tests DC, $\frac{1}{2}$ squat, TC et CMJ étaient retenues dans l'analyse. Les trois sessions de tests étaient appliquées avec 48h de récupération minimum entre chacune d'entre elles.

Résultats

1RM et CMJ

Les variations de performance des 1RM et du CMJ sont représentées par la figure 15. A la fin du protocole, l'augmentation du 1RM au DC était *moyenne à grande* pour C-0h (valeurs pré vs. valeurs post [moyenne $\pm$ écart type], $87,5 \pm 22,2$ vs. $94,5 \pm 23,3$ kg), *moyenne à très grande* ($76,1 \pm 17,9$ vs. $86,1 \pm 16,4$ kg) pour C-6h et *grande à très grande* pour C-24h ($74,2 \pm 12,0$ vs. $82,7 \pm 13,8$ kg) et FOR ($85,5 \pm 13,8$ vs. $95,3 \pm 14,7$ kg). L'augmentation de performance était *petite à moyenne* pour CONT ($80,6 \pm 16,1$ vs. $82,5 \pm 16,0$ kg). Les variations de performance étaient supérieures pour les groupes C-6h (ES, *petites à grandes*),

C-24h et FOR (*triviales* à *grandes*) par rapport à C-0h à la fin de la période d'entraînement. Les différences entre les groupes C-6h, C-24h et FOR n'étaient *pas claires*.

L'augmentation du 1RM au TC était *grande* à *très grande* pour C-0h ($84,0 \pm 10,7$ vs. $90,8 \pm 11,6$ kg), *très grande* à *extrêmement grande* pour C-6h ($78,0 \pm 10,9$ vs. $88,4 \pm 9,9$ kg), *grande* à *extrêmement grande* pour C-24h ($77,5 \pm 10,6$ vs. $86,7 \pm 10,9$ kg) et *moyenne* à *très grande* pour FOR ($91,0 \pm 10,0$ vs. $97,0 \pm 12,2$ kg). La variation de performance n'était *pas claire* ($88,6 \pm 15,6$ vs. $88,3 \pm 13,3$ kg) pour le groupe CONT. Les variations de performance étaient supérieures pour les groupes C-6h (*moyennes* à *très grandes*) et C-24h (*triviales* à *grandes*) par rapport à FOR. De plus, les gains étaient supérieurs pour C-6h (*triviales* à *très grandes*) en comparaison à C-0h.

L'augmentation du 1RM au $\frac{1}{2}$ squat était *moyenne* à *très grande* pour C-0h ($156,0 \pm 20,3$ vs. $182,0 \pm 28,5$ kg), *grande* à *extrêmement grande* pour C-6h ($140,0 \pm 26,5$ vs. $184,1 \pm 34,0$ kg), *grande* à *extrêmement grande* pour C-24h ($143,3 \pm 23,6$ vs. $180,0 \pm 26,4$ kg) et *grande* à *très grande* pour FOR ($152,5 \pm 24,6$ vs. $190,0 \pm 38,4$ kg). La variation de performance n'était *pas claire* ($168,8 \pm 35,6$ vs. $169,4 \pm 31,7$ kg) pour le groupe CONT. Les gains de 1RM au $\frac{1}{2}$ squat étaient supérieurs pour C-6h (*triviales* à *très grandes*), C-24h et FOR (*triviales* à *grandes*) par rapport à C-0h à la fin de la période d'entraînement. Les variations de performance entre les groupes C-6h, C-24h et FOR n'étaient *pas claires*.

L'augmentation de la hauteur de saut au CMJ était *triviale* à *faible* pour C-0h ($33,7 \pm 4,7$ vs. $34,8 \pm 3,8$ cm) et *faible* à *moyenne* pour C-6h ($29,4 \pm 3,9$ vs. $31,5 \pm 3,8$ cm) et C-24h ($32,6 \pm 5,0$ vs. $35,1 \pm 4,4$ cm). Les gains pour le groupe FOR étaient *triviaux* à *moyens* ($33,8 \pm 5,4$ vs. $35,2 \pm 6,9$ cm). La diminution de hauteur de saut était *triviale* à *faible* pour le groupe CONT ($36,6 \pm 5,1$ vs. $35,0 \pm 6,4$ cm). Les différences des gains de hauteur de saut entre C-0h, C-6h, C-24h et FOR n'étaient *pas claires*.

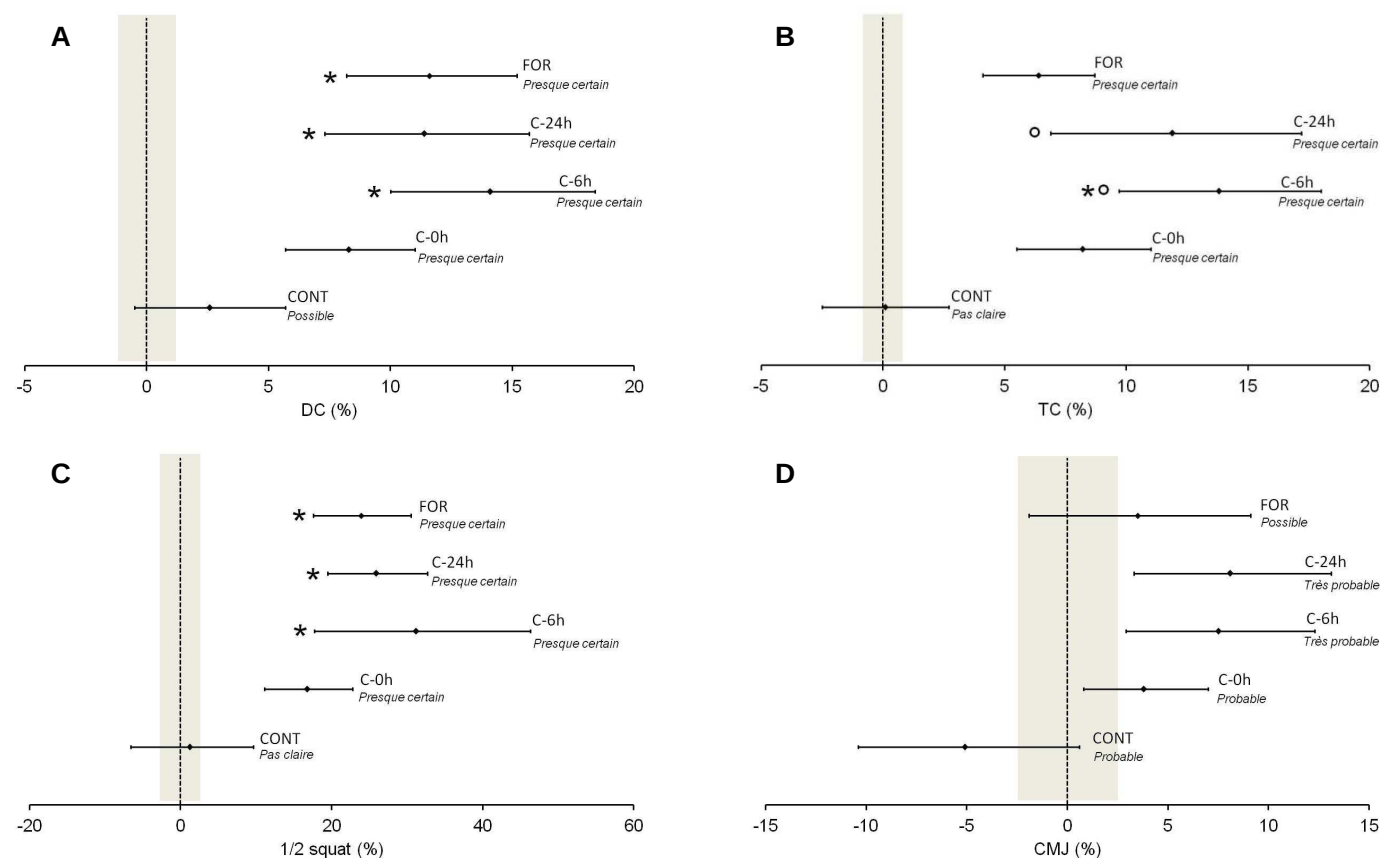


Figure 15. Moyenne des variations intra-individuelles de force maximale (A. DC, B. TC et C. ½ squat) et de détente verticale (D. CMJ) après chaque période d'entraînement.

Les intervalles de confiance sont représentés par les barres horizontales de part et d'autre des moyennes. La zone grisée représente un seuil caractérisant un effet trivial. Son calcul est détaillé dans la partie « analyse statistiques ». CONT : contrôle; C-0h, C-6h et C-24h : aucune, 6h et 24h de récupération entre séances; FOR : Force.

*: gains plus importants par rapport à C-0h (>75% de chance). °: gains plus importants par rapport à FOR (>75% de chance). Les qualificatifs pas claire, possible, probable, très probable et presque certain définissent les chances d'observer un effet positif/négatif ou trivial.

Capacité de production de force et propriétés neuromusculaires

L'augmentation de CMV_{60} (figure 16) était *triviale à moyenne* pour C-0h ($227,1 \pm 38,9$ vs. $234,1 \pm 38,3$ N·m) et C-6h ($223,6 \pm 36,2$ vs. $228,6 \pm 30,2$ N·m), *petite à grande* pour C-24h ($218,9 \pm 39,7$ vs. $231,2 \pm 45,0$ N·m) et *triviale à grande* pour FOR ($233,9 \pm 39,9$ vs. $246,3 \pm 50,0$ N·m). Les variations de performance pour le groupe CONT n'étaient *pas claires* ($233,4 \pm 46,3$ vs. $231,6 \pm 39,3$ N·m). Les gains étaient supérieurs pour C-24h par rapport à C-0h (*triviaux à grands*). Aucune autre différence de variation entre les groupes n'a été observée.

L'augmentation de CMV_{180} (figure 16) était *faible à moyenne* pour C-0h ($183,6 \pm 25,3$ vs. $191,3 \pm 28,4$ N·m) et *triviale à large* pour C-6h ($173,9 \pm 29,4$ vs. $181,5 \pm 25,4$ N·m) et *moyenne à très large* pour C-24h ($168,8 \pm 27,6$ vs. $182,5 \pm 28,1$ N·m) et FOR ($184,2 \pm 30,2$ vs. $204,6 \pm 41,5$ N·m). Les variations de performances pour le groupe CONT n'étaient *pas claires* ($191,2 \pm 25,4$ vs. $192,2 \pm 26,0$ N·m). Les gains étaient supérieurs pour C-24h (*triviaux à grands*) et FOR (*triviaux à très grands*) par rapport à C-0h et C-6h. Aucune autre différence de variation entre les groupes n'a été observée.

L'augmentation de CMV_{iso} (figure 16) était *triviale à moyenne* pour C-0h ($278,6 \pm 53,7$ vs. $287,3 \pm 58,2$ N·m) et C-6h ($279,1 \pm 51,3$ vs. $291,2 \pm 50,0$ N·m) puis *faible à très grande* pour C-24h ($274,8 \pm 57,5$ vs. $296,2 \pm 54,3$ N·m) et FOR ($297,5 \pm 62,6$ vs. $324,3 \pm 73,1$ N·m). Les variations de performance pour CONT n'étaient *pas claires* ($288,3 \pm 39,9$ vs. $289,5 \pm 38,7$ N·m). Aucune différence de variation n'a été observée entre C-0h, C-6h, C-24h et FOR.

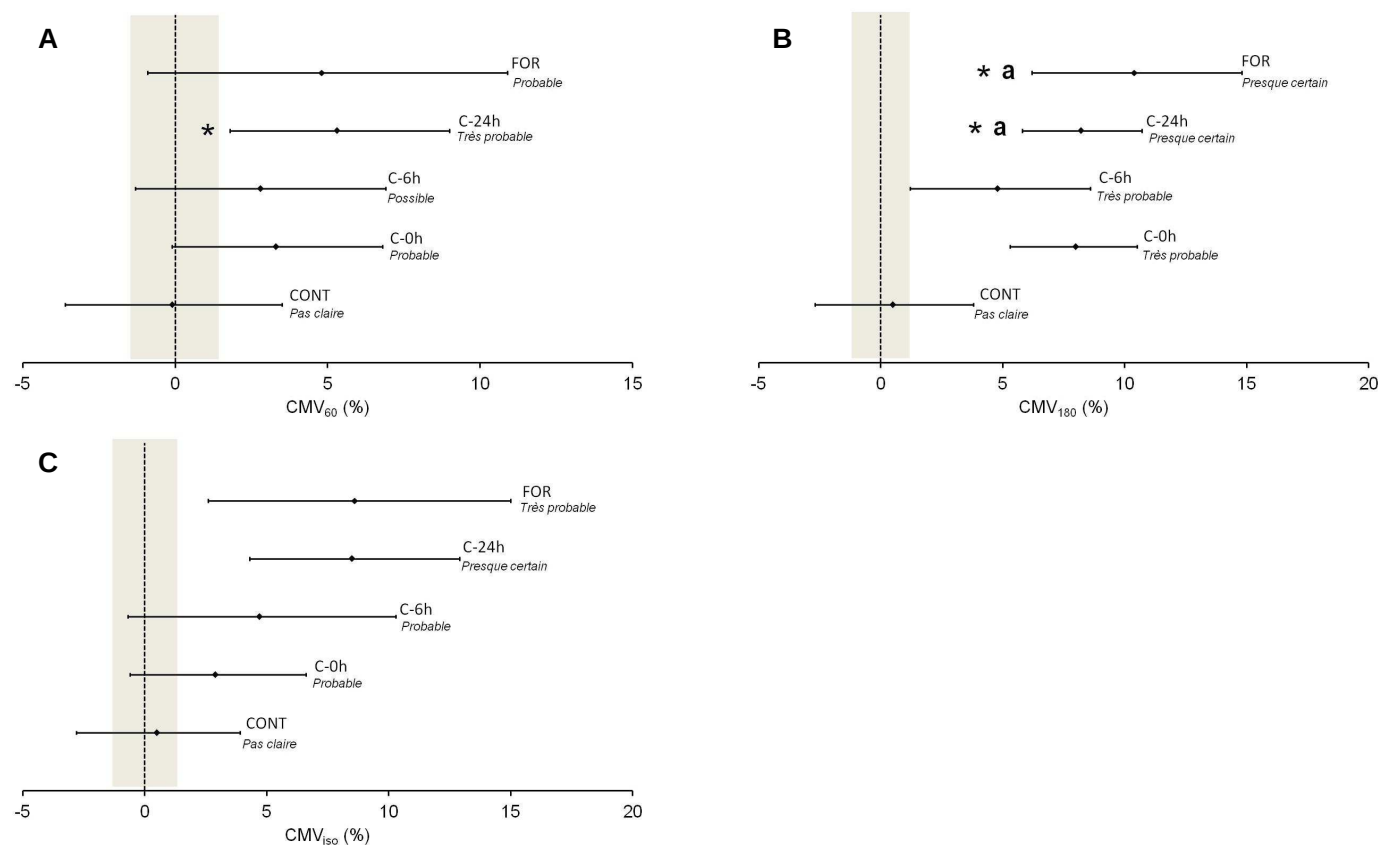


Figure 16. Moyenne des variations intra-individuelles des contractions maximales volontaires à $60^{\circ}\cdot s^{-1}$ (A. CMV_{60}), $180^{\circ}\cdot s^{-1}$ (B. CMV_{180}) et isométriques (C. CMV_{iso}) après chaque période d'entraînement.

Les intervalles de confiance sont représentés par les barres horizontales de part et d'autre des moyennes. La zone grisée représente un seuil caractérisant un effet trivial. Son calcul est détaillé dans la partie « analyse statistiques ». CONT : contrôle; C-0h, C-6h et C-24h : aucune, 6h et 24h de récupération entre séances; FOR : Force. *: gains plus importants par rapport à C-0h (>75% de chance). ^a: gains plus importants par rapport à C-6h (>75% de chance). Les qualificatifs pas claire, possible, probable, très probable et presque certain définissent les chances d'observer un effet positif/négatif ou trivial.

L'augmentation de CMV_{moy} était *petite à moyenne* pour C-0h ($206,2 \pm 32,0$ vs. $220,0 \pm 33,2$ N·m) et *triviale à moyenne* pour CONT ($218,9 \pm 38,8$ vs. $223,8 \pm 43,7$ N·m). Les différences de variations entre ces deux groupes (C-0h et CONT) n'étaient *pas claires*. L'augmentation de CMV_{moy} était *petite à grande* pour C-6h ($205,3 \pm 29,1$ vs. $224,5 \pm 38,3$ N·m), *moyenne à grande* pour FOR ($219,1 \pm 42,6$ vs. $225,7 \pm 47,3$ N·m) et *moyenne à très grande* pour C-24h ($227,1 \pm 39,5$ vs. $248,0 \pm 46,1$ N·m). Les différences de variations entre les groupes C-6h, C-24h et FOR n'étaient *pas claires* (figure 17). Les variations de l'indice de fatigabilité musculaire (CMV_{fat}) n'étaient *pas claires* pour l'ensemble des groupes (tableau 11).

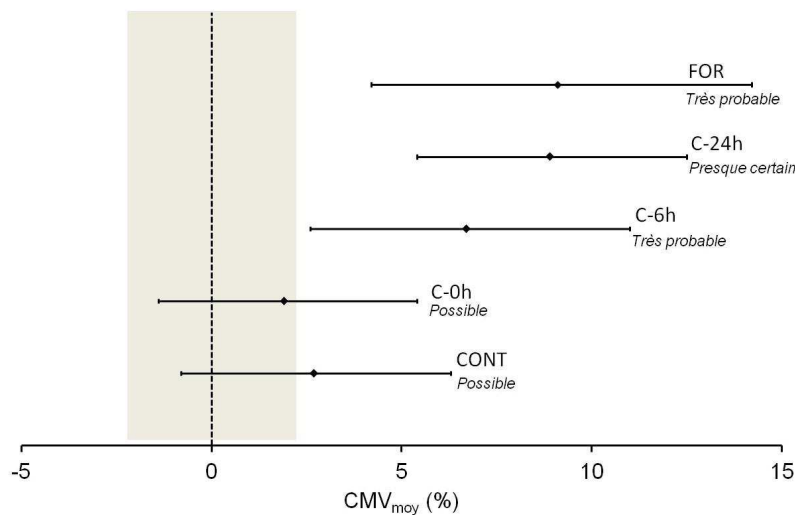


Figure 17. Variations intra-individuelles de la moyenne des contractions maximales isométriques (CMV_{moy}) au cours du test de fatigue après chaque période d'entraînement.

Les intervalles de confiance sont représentés par les barres horizontales de part et d'autre des moyennes. La zone grisée représente un seuil caractérisant un effet trivial. Son calcul est détaillé dans la partie « analyse statistiques ». CONT : contrôle; C-0h, C-6h et C-24h : aucune, 6h et 24h de récupération entre séances; FOR : Force. Les qualificatifs possible, très probable et presque certain définissent les chances d'observer un effet positif/négatif ou trivial.

Les variations des propriétés mécaniques (secousse musculaire) et nerveuses (onde M) du quadriceps ne sont *pas claires* pour tous les groupes expérimentaux. Le niveau d'activation volontaire maximale augmentait pour C-24h (*triviale à moyenne*) (tableau 11).

Tableau 11. Moyennes des performances (pré et post entraînement) et des variations intra-individuelles après chaque période d'entraînement.

	Valeurs pré	Valeurs post	Chances	Variation $\pm$ 90% IC	ES
Secousse (N·m)					
CONT	115,4 $\pm$ 10,3	117,0 $\pm$ 13,3	Pas claire	1,1 $\pm$ 5,7	-
C-0h	102,2 $\pm$ 16,2	102,3 $\pm$ 15,8	Pas claire	0,3 $\pm$ 2,2	-
C-6h	102,7 $\pm$ 18,4	103,6 $\pm$ 16,9	Pas claire	1,1 $\pm$ 3,3	-
C-24h	98,1 $\pm$ 18,7	99,0 $\pm$ 18,4	Pas claire	1,0 $\pm$ 3,5	-
FOR	113,8 $\pm$ 21,2	114,7 $\pm$ 24,2	Pas claire	0,3 $\pm$ 3,3	-
Amplitude onde-M (mV)					
CONT	6,4 $\pm$ 1,6	6,7 $\pm$ 1,2	Pas claire	5,7 $\pm$ 12,3	-
C-0h	6,1 $\pm$ 2,5	6,3 $\pm$ 2,2	Pas claire	6,3 $\pm$ 14,0	-
C-6h	5,8 $\pm$ 1,5	5,8 $\pm$ 1,2	Pas claire	-0,2 $\pm$ 17,6	-
C-24h	6,1 $\pm$ 1,3	6,2 $\pm$ 1,7	Pas claire	0,9 $\pm$ 11,0	-
FOR	5,9 $\pm$ 0,9	6,1 $\pm$ 1,8	Pas claire	2,2 $\pm$ 18,0	-
Activation volontaire (%)					
CONT	89,9 $\pm$ 5,9	90,6 $\pm$ 3,5	Pas claire	1,0 $\pm$ 6,4	-
C-0h	93,4 $\pm$ 4	95,3 $\pm$ 3,8	Pas claire	2,1 $\pm$ 2,4	-
C-6h	94,5 $\pm$ 3,3	96,1 $\pm$ 2,5	Possible	1,7 $\pm$ 1,8	Triviales à petites
C-24h	93,2 $\pm$ 5,6	95,6 $\pm$ 3,5	Probable	2,8 $\pm$ 2,2	Triviales à moyennes
FOR	94,5 $\pm$ 3,2	95,8 $\pm$ 2,8	Possible	1,3 $\pm$ 2,2	Triviales à petites
CMV _{fat} (%)					
CONT	13,3 $\pm$ 5,3	10,9 $\pm$ 4,9	Pas claire	-21,7 $\pm$ 31,4	-
C-0h	14,5 $\pm$ 4,3	13,8 $\pm$ 4,5	Pas claire	-7,7 $\pm$ 27,9	-
C-6h	14,4 $\pm$ 6,4	12,4 $\pm$ 6,0	Pas claire	-13,0 $\pm$ 31,4	-
C-24h	15,8 $\pm$ 6,5	15,1 $\pm$ 4,8	Pas claire	0,2 $\pm$ 22,3	-
FOR	16,8 $\pm$ 5,4	16,6 $\pm$ 3,1	Pas claire	3,3 $\pm$ 35,6	-

Les valeurs pré et post entraînement sont exprimés par : moyenne $\pm$ écart type. Les variations intra-individuelles sont exprimées par : moyenne $\pm$ 90% de l'intervalle de confiance. CONT : contrôle; C-0h, C-6h et C-24h : aucune, 6h et 24h de récupération entre séances; FOR : Force.

Les qualificatifs pas claire, possible et probable définissent les chances d'observer un effet positif ou négatif. La taille de l'effet est interprétée à l'aide des seuils suivants 0,3; 0,9; 1,6; 2,5 et 4,0 qui caractérisaient respectivement des différences triviales, petites, moyennes, grandes, très grandes et extrêmement grandes. Les valeurs sont écrites en rouge à partir d'un effet probable.

VO_{2pic}

Les variations de VO_{2pic} figurent dans la figure 18. L'augmentation de VO_{2pic} était triviale à moyenne pour C-0h (4359 $\pm$ 429 vs. 4525 $\pm$ 547 ml·min⁻¹) et C-6h (4449 $\pm$ 494 vs. 4636 $\pm$ 564 ml·min⁻¹), puis moyenne à grande pour C-24h (4064 $\pm$ 419 vs. 4419 $\pm$ 405 ml·min⁻¹). Les gains de VO_{2pic} étaient plus importants pour C-24h par rapport à C-0h (triviaux à grands) et C-6h (triviaux à moyens). Aucune différence de variation n'a été observée entre C-0h et C-6h.

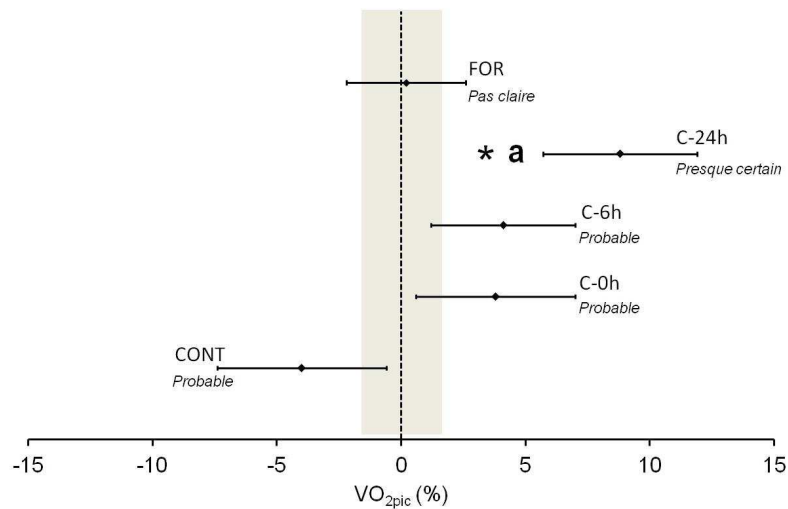


Figure 18. Variations intra-individuelles du pic de consommation d'oxygène (VO_{2pic}) après chaque période d'entraînement.

Les intervalles de confiance sont représentés par les barres horizontales de part et d'autre des moyennes. La zone grisée représente un seuil caractérisant un effet trivial. Son calcul est détaillé dans la partie « analyse statistiques ». CONT : contrôle; C-0h, C-6h et C-24h : aucune, 6h et 24h de récupération entre séances; FOR : Force.

*: gains plus importants par rapport à C-0h (>75% de chance). ^a: gains plus importants par rapport à C-6h (>75% de chance). Les qualificatifs pas claire, probable et presque certain définissent les chances d'observer un effet positif/négatif ou trivial.

Discussion

Le but de cette étude était de mesurer l'effet du temps de récupération, entre les séances de force et d'endurance, sur les adaptations physiologiques à la suite d'un programme d'entraînement combiné de 7 semaines. Les principaux résultats montraient 1) une altération du développement de la force, de la puissance musculaire et de la puissance aérobie suite à COMB et 2) que cet effet interférentiel était dépendant de la durée de récupération entre les séquences. Ce dernier semblerait évident pour les configurations d'entraînement n'imposant aucun (C-0h) voire 6 heures de délai (C-6h) entre l'entraînement de force et d'endurance. Au-delà des distinctions entre les groupes (FOR, C-0h, C-6h et C-24h), nous avons observé des différences d'interférence selon la variable dépendante mesurée (force à vitesse lente vs. force à vitesse rapide) et le groupe musculaire sollicité (bas vs. haut du corps). De plus, à notre connaissance, cette étude est la première à mettre en évidence un effet interférentiel d'un entraînement aérobie de haute intensité type intermittent court sur la performance de force.

L'interférentiel sur le développement de la force, observée dans notre étude, corrobore les résultats de nombreux travaux antérieurs (Bell et coll., 1997 et 2000; Dudley & Djamil, 1989; Glowacki et coll., 2004; Hennessy & Watson, 1994; Hickson, 1980; Hunter et coll., 1987; Kraemer et coll., 1995; Lee et coll., 1990). A l'inverse de ces études, nous avons observé ce résultat avec un volume d'entraînement plus faible, correspondant à 7 semaines et 4 séances/sem. En comparaison, Hickson (1980) mettait en avant ce phénomène d'interférence suite à un programme d'entraînement de 10 semaines. Dans cette étude, aucune altération des gains de force maximale n'était constatée à l'issue de la 7^{ème} semaine d'entraînement (équivalent à la durée de notre protocole). L'effet négatif de l'endurance sur le développement de la force maximale intervenait seulement durant les trois dernières semaines de la procédure expérimentale (semaine 8 à 10) (Hickson, 1980). D'autres études ont confirmé cette interférence à la suite de programmes d'entraînement d'une durée minimale de 8 semaines (Bell et coll., 1997 et 2000; Glowacki et coll., 2004; Hennessy & Watson, 1994; Hickson, 1980; Hunter et coll., 1987; Kraemer et coll., 1995; Lee et coll., 1990). Tous ces protocoles expérimentaux proposaient alors au minimum trois entraînements de chaque qualité par semaine. Nos résultats renforcent donc l'hypothèse de l'incompatibilité des entraînements de force et d'endurance au sein d'une même programmation puisque nous observons un effet interférentiel avec un faible volume d'entraînement.

Les résultats de la présente étude sont, à notre connaissance, les premiers à mettre en évidence une altération des gains de force suite à une période d'entraînement combiné associant un travail intermittent court à un travail de musculation en partie orienté vers un

développement hypertrophique. Ces résultats valident alors le modèle proposé par Docherty & Sporer (2000) (figure 4, page 39) montrant que le risque d'antagonismes physiologiques serait plus important lorsque les entraînements combinaient un travail hypertrophique (> 10 RM) à un travail intermittent de haute intensité (95 à 100% de la VMA). En effet, tous deux présenteraient des adaptations localisées au niveau périphérique supposées contradictoires. Les travaux de Kraemer et coll., (1995) ne valident pas totalement le modèle car ces auteurs utilisaient deux formes d'entraînements aérobie très différentes (continu vs. intermittent court et long à haute intensité) au sein de leur procédure expérimentale.

Les résultats de notre étude nous montrent clairement qu'une période de récupération de 6h est nécessaire entre les exercices, dans le cas de la configuration FOR/AER, afin d'induire des gains de 1RM, sur des mouvements du bas et du haut du corps, identiques à ceux induits par FOR. De plus, une période de récupération de 24h serait nécessaire pour observer les meilleurs gains de VO_{2max} ainsi que des augmentations de moment musculaire des extenseurs de la jambe identiques à celles mesurées suite à FOR. Les réponses moléculaires impliquées dans l'activation de l'hypertrophie musculaire et de la biogénèse mitochondriale, ont récemment été analysées (Apro et coll., 2013). Les auteurs ne montraient aucune altération de l'activation des voies de signalisation impliquées dans la croissance musculaire lorsqu'un entraînement d'endurance à faible intensité était réalisé 30 min après l'entraînement de force. Ce délai de 30 min est néanmoins à modérer car il ne serait pas suffisant pour contrer l'effet de la fatigue aigue, induite par l'entraînement de force, sur la performance d'endurance. A notre connaissance, aucune étude ne s'est intéressée aux effets, sur les réponses moléculaires, de l'entraînement intermittent à haute intensité.

Les gains de 1RM, du bas et du haut du corps, induits par FOR étaient généralement équivalents à ceux induits par les groupes combinés avec un temps de récupération entre les séances (C-6h et C-24h). Seuls les gains de 1RM au TC étaient inférieurs pour FOR par rapport à ceux induits par C-6h et C-24h. Cela pourrait s'expliquer par un effet groupe. En effet, les plus hautes valeurs initiales pour FOR, en comparaison aux autres groupes, pourraient induire une plus faible marge de progression pour la variable TC. Un autre résultat intéressant, de cette étude, nous montre que l'entraînement intermittent court altère le développement de la force, certes du bas du corps, mais aussi celui du haut du corps au cours d'un mouvement de DC pour C-0h, en comparaison aux autres groupes. Cette conclusion se distingue de celle des autres études dans lesquelles l'effet d'interférence de l'entraînement combiné n'était observé que sur le groupe musculaire principalement sollicité au cours des deux types d'entraînement, donc les membres inférieurs dans la plupart des études (Hennessy & Watson, 1994; Lee et coll., 1990).

Ces points de divergence avec les données de la littérature pourraient être attribués aux différences de volume total d'entraînement et de type d'exercice aérobie.

Les contractions maximales volontaires du quadriceps étaient mesurées dans des conditions isométriques et anisométriques, en concentriques à des vitesses angulaires lentes et rapides (60 et $180^{\circ}\cdot s^{-1}$). Nos résultats démontraient un niveau d'interférence plus élevé sur les gains de production de force à vitesse rapide et sont donc en accord avec les données de la littérature (Dudley & Djamil, 1985). En effet, ces auteurs observaient des améliorations du moment musculaire produit en isométrie et en concentrique à vitesse lente (jusqu'à $96^{\circ}\cdot s^{-1}$), identiques à celles mesurées pour FOR. Le statut d'entraînement des sujets pourrait expliquer ces résultats. Ces derniers étaient peu familiarisés à un entraînement de musculation à charge lourde. Ils étaient alors soumis à un mécanisme protecteur d'origine nerveuse, régulateur de tensions, intervenant à des faibles vitesses de contraction (Caiozzo et coll., 1981). Un cycle d'entraînement de force, qu'il soit réalisé seul ou combiné à un travail d'endurance, semblerait lever ce mécanisme protecteur. Nous pouvons donc nous attendre à mesurer des gains de force plus élevés à vitesse lente qu'à vitesse rapide auprès d'une population peu entraînée en musculation. Cela expliquerait alors les différences entre les gains de production de force à vitesse lente et rapide, au sein de notre étude, pour des sujets peu familiarisés en musculation. Nous n'observions pas, à l'issue de notre protocole, d'interférence sur la détente verticale (CMJ), indicateur de la puissance musculaire du bas du corps. Ce résultat contraste alors avec celui d'une autre étude (Hunter et coll., 1987) démontrant une altération des qualités de puissance et d'explosivité, mesurées au moyen d'un CMJ, sans aucune perturbation des gains de force à vitesse lente, mesurés par des tests 1RM. Dans ce cas (Hunter et coll., 1987), l'effet d'interférence était obtenu à l'issue de 12 semaines d'entraînement avec une fréquence de séance élevée (6 séances/sem) alors que nous utilisions un volume moins important au sein de notre protocole. Un volume total de travail important pourrait alors influencer les réponses adaptatives de puissance, et non celles de force maximale, dans le cadre des entraînements combinés.

L'hypothèse supportée par quelques études (Hennessy et Watson, 1994; Hunter et coll., 1987), mettant en avant un effet négatif de l'endurance sur la production de force à vitesse rapide et sur la puissance, est partiellement confirmée au sein de notre étude. Il semblerait que le développement de ces qualités au cours de mouvements mono-articulaires soit davantage sensible au phénomène d'interférence que celui observé au cours de mouvements pluri-articulaires (CMJ, par exemple).

En accord avec les principes de spécificité de l'entraînement, nous n'avons constaté aucune modification de VO_{2pic} à l'issue de FOR alors que nous observions des gains significatifs de cette puissance oxydative pour tous les groupes combinés. De plus, les gains mesurés à l'issue du programme d'entraînement pour le groupe C-24h étaient plus importants par rapport à C-0h et C-6h. La majorité des études, dans la littérature, montraient que l'entraînement combiné induisait des adaptations incluant des gains du potentiel oxydatif (Dudley & Djamil, 1985; Hennessy & Watson, 1994; Hickson, 1980; Sale et coll., 1990). A notre connaissance, seules trois études montraient des résultats contradictoires, c'est-à-dire un plus faible développement des qualités aérobies (PMA, VO_{2pic} , activité de la citrate synthase) à l'issue de la période d'entraînement combiné (Dolezal & Potteiger, 1998; Glowacki et coll., 2004; Nelson et coll., 1990). Au même titre que pour les gains de force, un délai de récupération important (24h) entre les séances, semblerait nécessaire pour minimiser les interférences sur le développement du potentiel oxydatif. Les plus faibles améliorations du VO_{2pic} pour C-0h et C-6h s'expliqueraient par une fatigue neuromusculaire induite par les exercices de force. En effet, cette fatigue aigue pourrait réduire la qualité et l'intensité de l'entraînement d'endurance et donc induire, à terme, un plus faible développement du potentiel aérobie.

Conclusion:

Notre étude montrait que le phénomène d'interférence de l'entraînement intermittent court à haute intensité, sur le développement de la force, dépendrait du temps de récupération entre les séances d'entraînement.

En effet, l'entraînement biquotidien, sans délai entre les séances de force et d'endurance (C-0h), et à moindre degré, avec 6h de récupération entre ces dernières, ne serait pas optimal pour le développement des qualités de force et de puissance mais aussi des réponses oxydatives.

Applications pratiques:

- Ces résultats suggèrent que les préparateurs physiques devraient éviter de planifier deux séances aux exigences antagonistes (force/puissance vs aérobie), avec moins de 6h de récupération entre elles.
- Une période de récupération de 24h serait nécessaire entre les exercices pour obtenir des réponses adaptatives optimales.

Les précédentes adaptations ont été obtenues en associant à l'entraînement de force, un entraînement aérobie intermittent court. Une autre forme d'exercice, telle que la répétition de sprints, est communément utilisée en sport collectif car elle induirait des gains de VO_{2max} , avec un volume de travail réduit, identiques à ceux mesurés suite aux entraînements d'endurance continus à moyenne intensité (Gist et coll., 2013). Egalement, les entraînements de répétition de sprints induiraient des adaptations neuromusculaires intéressantes pour ces sportifs (Buchheit & Laursen, 2013). A notre connaissance, aucune étude ne s'est intéressée à vérifier les effets de ce type d'entraînement dans le cadre d'une association avec l'entraînement de force.

Etude 3. Effet du type d'entraînement d'endurance sur les adaptations neuromusculaires et oxydatives.

Introduction

La configuration des entraînements combinés semblerait influencer les réponses adaptatives à l'entraînement de force. Le temps de récupération serait une variable prépondérante pour contrer l'effet interférentiel de l'endurance sur le développement des capacités neuromusculaires. Les travaux de Sale et coll. (1990) mettaient en évidence de meilleurs gains de force lorsque les séquences de musculation et d'endurance étaient séparées par 24h de récupération. Nos travaux précédents confirmaient ce résultat en mettant en avant des adaptations neuromusculaires, à l'issue d'une programmation quotidienne (C-24h), identiques à celles mesurées à la fin de FOR. En revanche, celles induites par une programmation biquotidienne, avec 6h de récupération entre les séances (C-6h), permettrait seulement de limiter l'interférence sans pour autant induire de développement optimal des qualités de force et de puissance.

L'une des méthodes d'entraînement régulièrement utilisée en sport collectif concerne l'entraînement intermittent de haute intensité. Si les effets de l'intermittent long, dans le cadre des entraînements combinés, ont largement été étudiés, nous remarquons que seul notre précédent travail (étude 2) a mesuré l'influence des entraînements intermittents courts sur l'éventuelle interférence portant sur les gains de force. Nous avons donc souhaité maintenir cette configuration d'entraînement au cours de cette procédure expérimentale et observer si une autre forme d'entraînement aérobique de haute intensité, type répétition de sprints, pouvait influencer les réponses adaptatives neuromusculaires et oxydatives. L'entraînement de répétition de sprints courts, largement utilisé dans la préparation physique en sport-collectif, semblerait très efficace pour le développement de la puissance musculaire et du potentiel oxydatif (Rhea et coll., 2008). Les effets des entraînements de répétition de sprints longs sur les adaptations neuromusculaires, dans le cadre d'un entraînement combiné, sont toutefois méconnus.

L'objectif de notre troisième étude sera alors de mesurer l'impact de deux types d'entraînement d'endurance de haute intensité (1. Répétition de sprints longs, RS et 2. Intermittent court, INT) sur la performance neuromusculaire et oxydative, à l'issue de 8 semaines d'entraînement combiné. D'après les résultats de quelques travaux (Rhea et coll., 2008 ; Balabinis et coll., 2003), nous faisons l'hypothèse que les adaptations neuromusculaires

et oxydatives induites par l'entraînement combinant force et répétition de sprints seront plus importantes que celles induites par l'association force et intermittent court à haute intensité.

Méthode

L'expérimentation durait 11 semaines avec une semaine dédiée aux sessions de familiarisation, deux semaines d'évaluation (initiale et finale) et huit semaines d'entraînement (figure 19). Trois groupes expérimentaux étaient proposés au sein de ce protocole dont deux groupes d'entraînement combiné et un de force seul (FOR). Les groupes combinés consistaient en deux séquences de chaque qualité par semaine. Ceux-ci se distinguaient entre eux par le type d'entraînement d'endurance réalisé (répétition de sprints longs, RS vs. intermittent à haute intensité, INT). Un délai de 24h de récupération était proposé entre les séances de force et d'endurance. Le groupe FOR ne réalisait que les séances de musculation. Un délai minimal de 72h était obligatoirement respecté entre deux séances de force pour tous les groupes d'entraînement (C-RS, C-INT et FOR). Le volume d'entraînement de force était équivalent pour les trois groupes expérimentaux. Les participants avaient pour consigne de ne pas participer à d'autres activités physiques, ni de modifier leurs habitudes alimentaires durant toute la durée du protocole.

Présentation des entraînements

Entraînement de force

L'entraînement de force comprenait 8 exercices : DC, TC, ½ squat, chaise à quadriceps, soulevé de terre, good morning et deux exercices de renforcement des ischio-jambiers en excentrique. Chaque session débutait par un échauffement à base d'exercice de renforcement des abdominaux et de gainage. L'entraînement était divisé en trois périodes durant lesquelles l'intensité augmentait progressivement (figure 19). Le 1RM était estimé chaque semaine afin de réguler précisément la charge de travail. Chaque série de squat, réalisée sur une machine guidée, et de soulevé de terre était immédiatement suivi par un renforcement excentrique des ischio-jambiers à poids de corps ou sur machine. Egalement, chaque série d'extension de la jambe, réalisée sur chaise à quadriceps, était enchaînée par un travail de renforcement des fessiers. Le temps de récupération entre les séries variait de 2 à 3 min selon les recommandations d'entraînement de la force (hypertrophie vs. force maximale) proposées par Zatsiorski (1992). Toutes les contractions musculaires étaient réalisées dans des conditions

isoinertielles avec des machines spécifiques (Cybex, Medway, USA). Les exercices étaient alternés entre le haut et le bas du corps et étaient randomisés au sein de chaque entraînement.

Entraînements d'endurance

Deux types d'entraînements d'endurance ont été proposés au sein de cette étude. Le premier consistait en une répétition de sprints de 30 s entrecoupés de récupération passive de 4 min (RS). Un échauffement spécifique de préparation à la vitesse était proposé aux participants. Le second était formé d'un travail intermittent à haute intensité de type 30/30 s (INT). Après 8 min d'échauffement à intensité croissante, les participants alternaient 30 s de course à 100% de VMA avec 30 s de récupération active à 50% de cette vitesse. Celle-ci était considérée comme étant la vitesse de décrochage obtenue au cours du test d'effort sur tapis roulant. Les sujets portaient un cardio fréquencemètre (Polar Electro Oy, Kempele, Finlande) durant chaque séquence d'entraînement INT pour vérifier la sollicitation cardiaque et ainsi réguler les distances à couvrir pendant les 30 s d'effort et de récupération. La répartition de la charge de travail des entraînements d'endurance est précisée au sein de la figure 19.

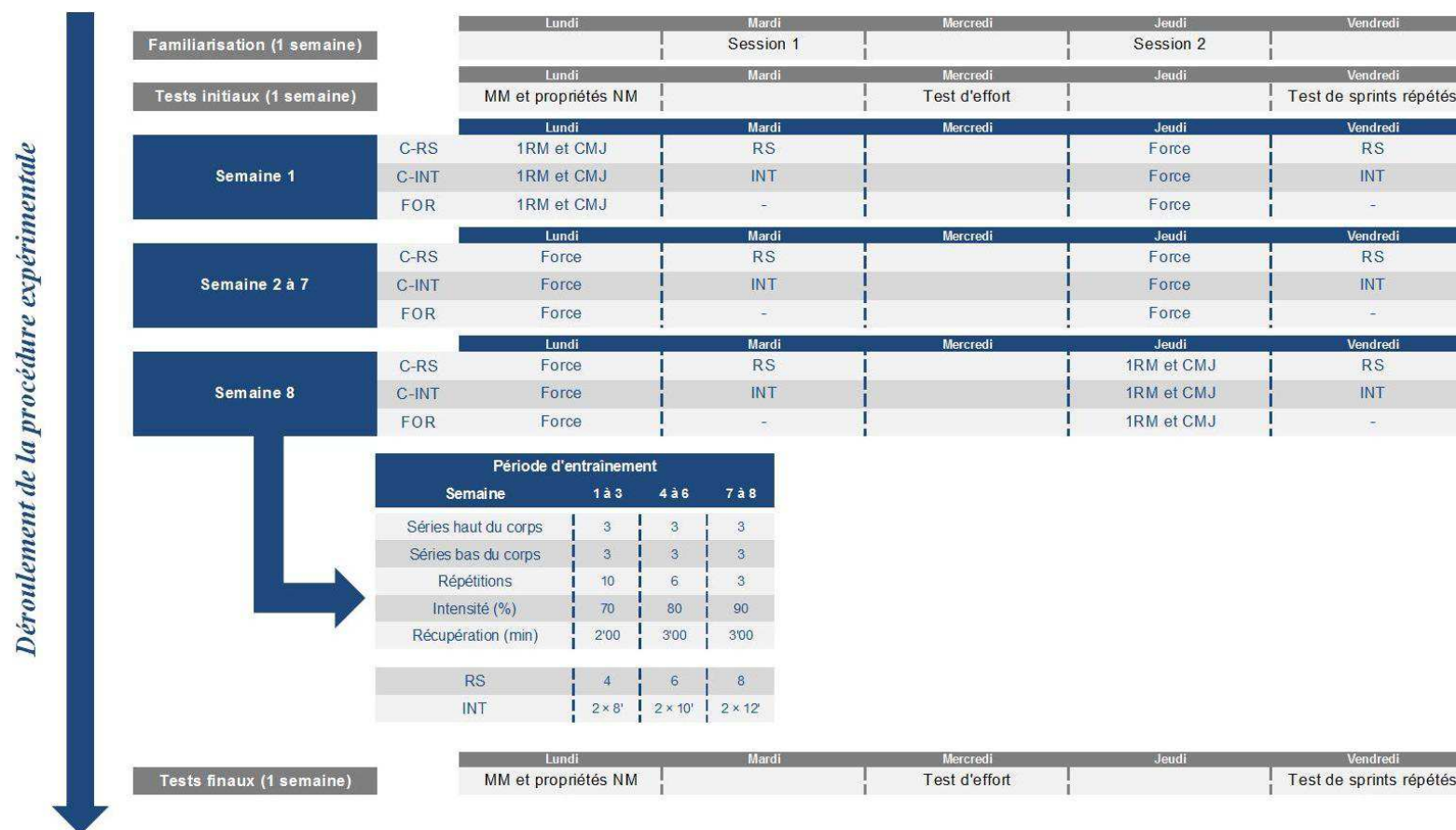


Figure 19. Présentation de la procédure expérimentale de l'étude 2.

C-RS: combiné force/répétition de sprints, C-INT: combiné force/intermittent, FOR: Force, DC : Développé-couché, TC : Tirage-couché, MM: moment musculaire, NM: neuromusculaire, RM: répétition maximale, CMJ: contremouvement jump. Haut du corps: développé-couché et tirage couché; bas du corps: ½ squat, soulevé de terre et chaise à quadriceps. Le volume de travail de force et d'endurance était allégé de 25 à 50% tous les quatre entraînements afin d'éviter tout état de surmenage.

Sessions de tests

Les participants étaient contraints à deux sessions de familiarisation à l'ergomètre isocinétique, au tapis roulant et aux différents tests de terrain (musculature, CMJ, vitesse répétée). L'organisation des sessions de tests pré et post entraînement étaient identiques. Les tests étaient réalisés dans un même ordre et aux mêmes horaires pour éviter toute influence de la chronobiologie sur la performance physique.

La semaine commençait par l'évaluation des propriétés neuromusculaires des muscles extenseurs du genou. Les mesures des $CMV_{iso, 60}$ et 180 sont identiques à celles de l'étude 1. Dans cette étude, la capacité à répéter des efforts isométriques était évaluée au moyen d'une procédure consistant à répéter un maximum de contractions de 5 s égales ou supérieures à 80% de la CMV_{iso} préalablement évaluée. Cette valeur seuil figurait sur l'écran d'un oscilloscope placé juste devant le sujet. Chaque effort était séparé par 10 s de récupération. La contraction était validée si le temps passé au dessus de la cible des 80% de la CMV_{iso} était supérieur à 3 s. Le test s'arrêtait lorsque le participant ne validait pas deux contractions consécutives. Le nombre de répétitions effectuées dans ces conditions était alors retenu pour l'analyse. Le signal EMG était enregistré au cours de chacune des CMV.

La deuxième évaluation consistait au test d'effort maximal sur tapis roulant avec mesure des échanges gazeux. Enfin, la semaine se concluait par l'évaluation du test de sprints répétés ($12 \times 20m$). Un échauffement spécifique de préparation à la vitesse et à un effort aérobie était proposé aux sujets. Ces derniers bénéficiaient de deux minutes de récupération entre la fin de l'échauffement et le début du test. Par soucis de reproductibilité, cette évaluation était réalisée en crampon sur terrain synthétique. La performance maximale (RS_{max}), c'est-à-dire le meilleur temps sur un sprint, la performance moyenne des douze sprints (RS_{moy}) ainsi que l'indice de fatigue (RS_{IF}) étaient retenus pour l'analyse. Cet indice était calculé au moyen de la formule suivante : $RS_{IF}(\%) = [(RS_{moy} / RS_{max}) - 1] \times 100$.

Les mesures de force maximale et de détente verticale étaient réalisées en substitution de la première séance de force. L'ordre des évaluations était le même pour tous les participants et permettait d'alterner les exercices sollicitant les membres inférieurs et supérieurs ($\frac{1}{2}$ squat, DC, CMJ, TC, soulevé de terre et chaise à quadriceps). Seules les performances obtenues au $\frac{1}{2}$ squat, DC, CMJ et TC étaient retenues dans l'analyse. Les quatre sessions de tests étaient appliquées avec 48h de récupération minimum entre chacune d'entre elles.

Résultats

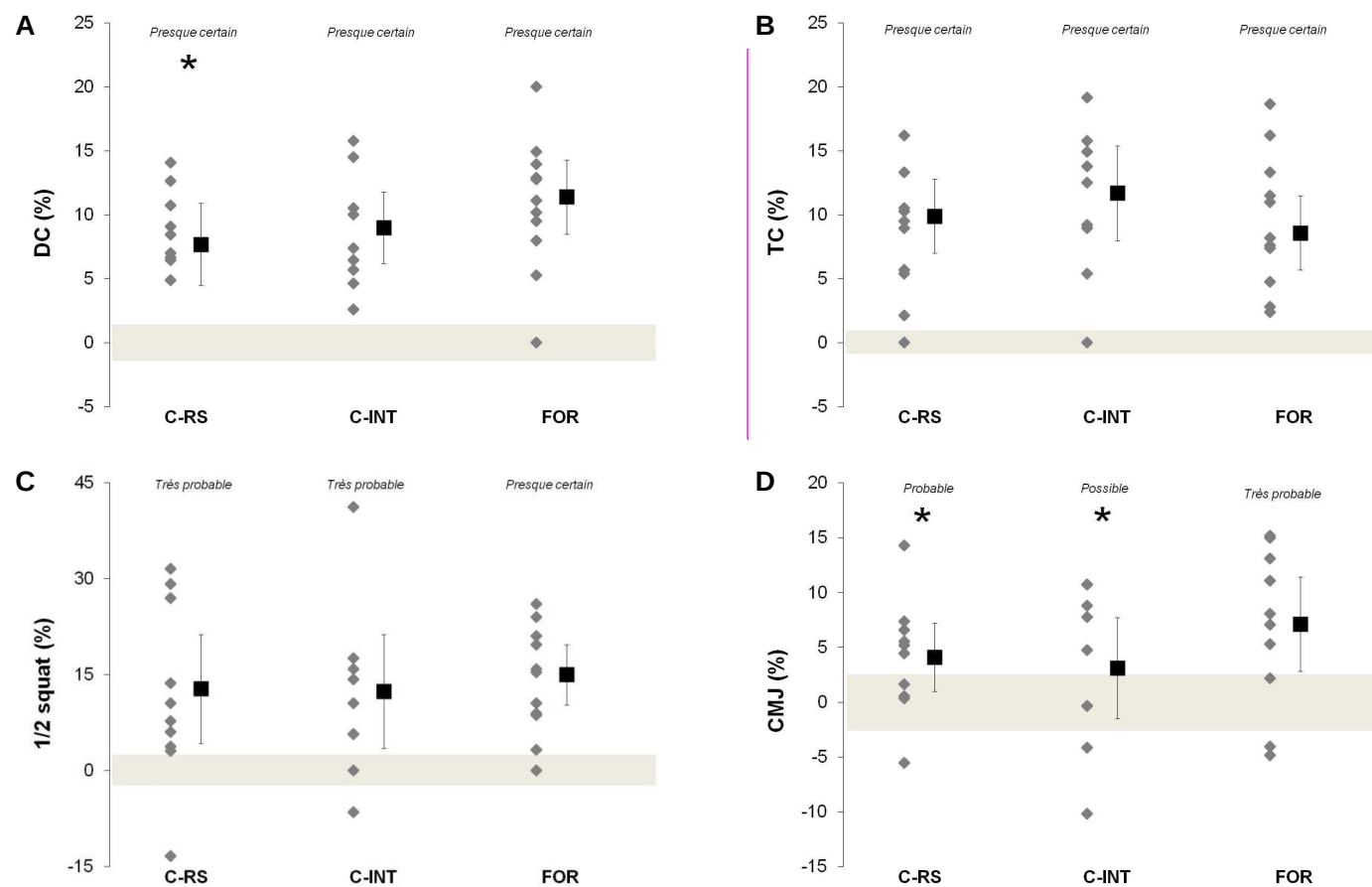
1RM et CMJ

Les variations de performance intra et inter-groupes des tests 1RM et CMJ sont représentées dans la figure 20. A la fin de la procédure expérimentale, les gains de 1RM au DC étaient *petits* pour C-RS (valeurs pré vs. valeurs post [moyenne $\pm$ écart type], $95,0 \pm 19,3$ vs. $102,5 \pm 21,6$ kg), C-INT ($83,9 \pm 13,4$ vs. $91,4 \pm 13,9$ kg) et FOR ($89,3 \pm 12,3$ vs. $99,5 \pm 14,2$ kg). Les gains de performance étaient plus importants pour le groupe FOR par rapport au groupe C-RS (*triviale*).

Les gains de 1RM au TC étaient *petits* pour les groupes C-RS ($90,8 \pm 12,1$ vs. $98,3 \pm 10,1$ kg) et FOR ($93,0 \pm 11,1$ vs. $102,0 \pm 11,1$ kg) puis *moyens* pour C-INT ($81,4 \pm 8,4$ vs. $90,8 \pm 8,0$ kg). Les différences de variations de performance entre les groupes n'étaient *pas claires*.

Les gains de 1RM au $\frac{1}{2}$ squat étaient *petits* pour C-RS ($161,0 \pm 18,7$ vs. $184,0 \pm 38,6$ kg) et *moyens* pour C-INT ($145,6 \pm 17,4$ vs. $163,3 \pm 16,8$ kg) et FOR ($161,4 \pm 18,2$ vs. $187,3 \pm 34,1$ kg). Les différences de variations de performance entre les groupes n'étaient *pas claires*.

Les gains de détente verticale au test CMJ étaient *petits* pour C-RS ($32,7 \pm 3,1$ vs. $34,2 \pm 4,7$ cm) et FOR ($31,3 \pm 4,7$ vs. $34,2 \pm 4,9$ cm) puis *triviaux* pour C-INT ($32,6 \pm 4,8$ vs. $33,6 \pm 4,2$ cm). Les gains de détente verticale étaient plus importants pour FOR par rapport à C-RS et C-INT (*triviaux*). Les différences de variations de performance entre les groupes C-RS et C-INT n'étaient *pas claires*.



Commentaire [j1]: changer

Figure 20. Moyenne des variations intra-individuelles du 1RM (A. DC, B. TC et C. 1/2 squat) et de détente verticale (D. CMJ) après chaque période d'entraînement.

Les carrés noirs représentent la moyenne des variations alors que les losanges gris représentent les variations individuelles. Les intervalles de confiance sont représentés par les barres verticales de part et d'autre des moyennes. La zone grisée représente un seuil caractérisant un effet trivial. Son calcul est détaillé dans la partie « analyse statistique ». C-RS: combiné force/répétition de sprints, C-INT: combiné force/intermittent, FOR: Force. *: gains moins importants par rapport à FOR (>75% de chance). Les qualificatifs possible, probable, très probable et presque certain définissent les chances d'observer un effet positif/négatif ou trivial.

Capacité de production de force et propriétés neuromusculaires

Les variations de performance intra et inter-groupes du moment musculaire sont représentées dans la figure 21. Les gains de MVC_{60} étaient *triviaux* pour C-RS ($254,9 \pm 28,3$ vs. $261,9 \pm 35,2$ N·m) et C-INT ($233,0 \pm 27,0$ vs. $243,0 \pm 39,4$ N·m) et *petits* pour FOR ($235,0 \pm 47,2$ vs. $253,3 \pm 45,9$ N·m). Les gains étaient supérieurs pour FOR par rapport à C-RS (*petite*). Les variations des valeurs d' EMG_{60} ne sont *pas claires* pour C-RS et FOR. Nous observons une *petite* diminution d' EMG_{60} pour C-INT.

Les gains de MVC_{180} étaient *triviaux* pour C-RS ($196,8 \pm 23,8$ vs. $207,2 \pm 25,5$ N·m), C-INT ($179,4 \pm 22,4$ vs. $191,7 \pm 23,3$ N·m) et FOR ($185,0 \pm 37,6$ vs. $196,8 \pm 38,5$ N·m). Les différences de variation de performance entre les trois groupes n'étaient *pas claires*. Les variations des valeurs d' EMG_{180} ne sont *pas claires* pour C-INT et FOR. Nous observons une *petite* diminution d' EMG_{180} pour C-RS.

Les gains de MVC_{iso} étaient *petits* pour C-RS ($323,4 \pm 49,0$ vs. $344,6 \pm 42,7$ N·m) et FOR ($315,9 \pm 73,2$ vs. $342,4 \pm 73,2$ N·m) puis *triviaux* pour C-INT ($307,9 \pm 52,5$ vs. $323,7 \pm 55,6$ N·m). Les variations des valeurs d' EMG_{iso} ne sont *pas claires* pour C-RS et FOR. Nous observons une *petite* diminution d' EMG_{iso} pour C-INT.

Les variations de la surface du bras droit étaient *triviales* pour les groupes C-RS, C-INT et FOR. Les variations de la surface de la cuisse droite étaient *triviales* pour les groupes C-RS et FOR alors qu'elles n'étaient *pas claires* pour C-INT (tableau 12).

Les variations du nombre de répétitions réalisées, supérieures à 80% de la CMV_{iso} , au cours du test de fatigue, n'étaient *pas claires* pour FOR. La diminution du nombre de répétitions était *petite* pour C-RS et C-INT à l'issue des périodes d'entraînement. Les différences de variation entre C-RS et C-INT n'étaient *pas claires* (tableau 12).

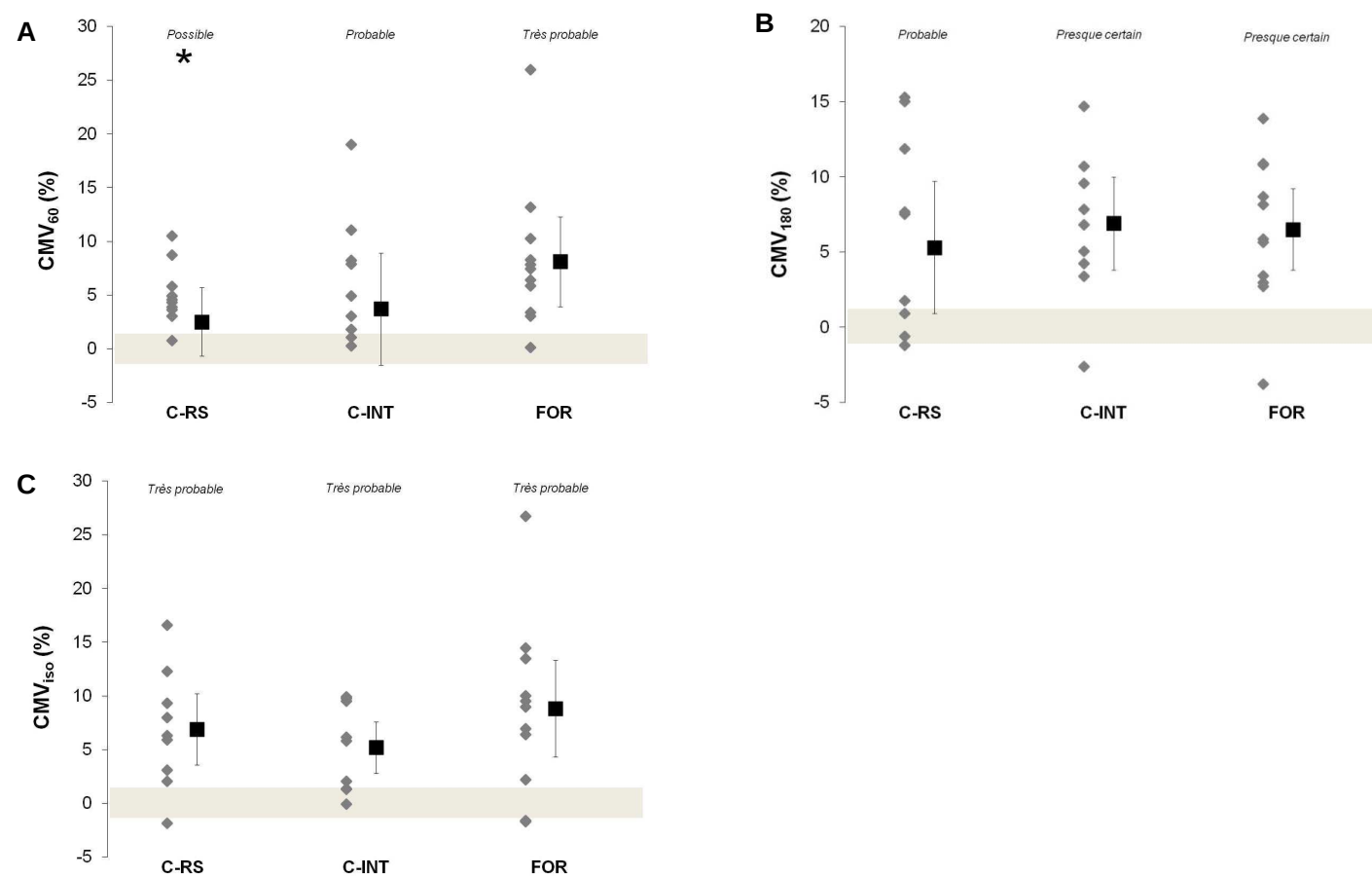


Figure 21. Moyenne des variations intra-individuelles des contractions maximales volontaires à $60^{\circ}\cdot s^{-1}$ (A. CMV_{60}), $180^{\circ}\cdot s^{-1}$ (B. CMV_{180}) et isométriques (C. CMV_{iso})

Les carrés noirs représentent la moyenne des variations alors que les losanges gris représentent les variations individuelles. Les intervalles de confiance sont représentés par les barres verticales de part et d'autre des moyennes. La zone grisée représente un seuil caractérisant un effet trivial. Son calcul est détaillé dans la partie « analyse statistiques ». C-RS: combiné force/répétition de sprints, C-INT: combiné force/intermittent, FOR : Force. *: gains moins importants par rapport à FOR (>75% de chance). Les qualificatifs possible, probable, très probable et presque certain définissent les chances d'observer un effet positif/négatif ou trivial.

Tableau 12. Moyennes (pré et post entraînement) et variations intra-individuelles des paramètres neuromusculaires.

	Valeurs pré	Valeurs post	Chances	Différences moyennes standardisées $\pm$ 90% IC	
EMG ₆₀ (mV)					
FOR	1,40 $\pm$ 0,34	1,45 $\pm$ 0,68	Pas claire	-0,04 $\pm$ 0,38	-
C-RS	1,44 $\pm$ 0,4	1,33 $\pm$ 0,35	Pas claire	-0,23 $\pm$ 0,58	-
C-INT	1,29 $\pm$ 0,33	1,11 $\pm$ 0,12	Probable	-0,53 $\pm$ 0,58	Petites
EMG ₁₈₀ (mV)					
FOR	1,66 $\pm$ 0,4	1,73 $\pm$ 0,75	Pas claire	-0,03 $\pm$ 0,39	-
C-RS	1,77 $\pm$ 0,48	1,55 $\pm$ 0,37	Probable	-0,42 $\pm$ 0,53	Petites
C-INT	1,43 $\pm$ 0,45	1,36 $\pm$ 0,19	Pas claire	-0,06 $\pm$ 0,47	-
EMG _{iso} (mV)					
FOR	1,59 $\pm$ 0,47	1,54 $\pm$ 0,57	Possible	-0,15 $\pm$ 0,31	Triviales
C-RS	1,46 $\pm$ 0,34	1,40 $\pm$ 0,26	Pas claire	-0,13 $\pm$ 0,59	-
C-INT	1,43 $\pm$ 0,36	1,26 $\pm$ 0,17	Probable	-0,45 $\pm$ 0,58	Petites
CMV _{fat} (nb)					
FOR	9,3 $\pm$ 6,9	7,6 $\pm$ 4	Pas claire	-0,23 $\pm$ 0,48	-
C-RS	11,3 $\pm$ 5,6	7,8 $\pm$ 3,8	Très probable	-0,60 $\pm$ 0,39	Petites
C-INT	11,6 $\pm$ 7,7	8,3 $\pm$ 4,5	Probable	-0,42 $\pm$ 0,58	Petites
Surface bras estimée (cm ²)					
FOR	126 $\pm$ 11	127 $\pm$ 12	Quasi certainement pas	0,01 $\pm$ 0,11	Triviales
C-RS	126 $\pm$ 8	125 $\pm$ 8	Improbable	-0,07 $\pm$ 0,17	Triviales
C-INT	118 $\pm$ 10	118 $\pm$ 9	Très peu probable	-0,02 $\pm$ 0,15	Triviales
Surface cuisse estimée (cm ²)					
FOR	244 $\pm$ 24	244 $\pm$ 24	Quasi certainement pas	0,00 $\pm$ 0,08	Triviales
C-RS	243 $\pm$ 15	244 $\pm$ 10	Improbable	0,08 $\pm$ 0,26	Triviales
C-INT	239 $\pm$ 14	238 $\pm$ 16	Pas claire	-0,06 $\pm$ 0,33	-

Les valeurs pré et post entraînement sont exprimées par : moyenne $\pm$ écart type. Les variations intra-individuelles sont exprimées par : différences moyennes standardisées $\pm$ 90% de l'intervalle de confiance. C-RS: combiné force/répétition de sprints, C-INT: combiné force/intermittent, FOR : Force, CMV_{fat}: nombre de répétition à 80% de CMV_{iso}. Les qualificatifs pas claire, quasi certainement pas, très peu probable, improbable, possible, probable, très probable définissent les chances d'observer un effet positif ou négatif. Les valeurs sont écrites en rouge lorsque le % de chance d'avoir un effet positif ou négatif est supérieur à 75%. La taille de l'effet est interprétée à l'aide des seuils suivants 0,3; 0,9; 1,6; 2,5 et 4,0, qui caractérisaient respectivement des différences triviales, petites, moyennes, grandes, très grandes et extrêmement grandes.

Aptitude à répéter des sprints

Les variations de RS_{max} n'étaient pas claires pour tous les groupes expérimentaux. Les gains de RS_{moy} étaient petits pour C-RS alors qu'ils étaient considérés comme triviaux pour C-INT et FOR. Les gains de RS_{IF} étaient moyens pour C-RS alors qu'ils étaient triviaux pour FOR et pas claires pour C-INT (tableau 13).

Mesure des propriétés oxydatives

Les gains de VMA n'étaient *pas clairs* pour FOR à la fin de la procédure d'entraînement alors qu'ils étaient *petits* pour C-RS et C-INT. La différence entre les gains de ces deux groupes expérimentaux était *triviale*. L'amélioration de VO_{2pic} était *petite* à l'issue de C-RS. Les variations de ces mesures n'étaient *pas claires* pour C-INT et FOR (tableau 13).

Tableau 13. Moyennes (pré et post entraînement) et variations intra-individuelles des performances au cours du test de répétition de sprints et du test d'effort.

	Valeurs pré	Valeurs post	Chances	Différences moyennes standardisées $\pm$ 90% IC	
RS_{max} (s)					
FOR	3,33 $\pm$ 0,16	3,33 $\pm$ 0,18	Pas claire	0,00 $\pm$ 0,29	-
C-RS	3,24 $\pm$ 0,13	3,24 $\pm$ 0,16	Pas claire	-0,03 $\pm$ 0,37	-
C-INT	3,29 $\pm$ 0,16	3,29 $\pm$ 0,11	Pas claire	0,01 $\pm$ 0,34	-
RS_{moy} (s)					
FOR	3,80 $\pm$ 0,23	3,76 $\pm$ 0,22	Possible	-0,17 $\pm$ 0,25	Triviales
C-RS	3,67 $\pm$ 0,25	3,55 $\pm$ 0,14	Très probable	-0,54 $\pm$ 0,35	Petites
C-INT	3,67 $\pm$ 0,28	3,62 $\pm$ 0,16	Possible	-0,18 $\pm$ 0,32	Triviales
RS_{IF} (%)					
FOR	14,2 $\pm$ 5,2	12,9 $\pm$ 3,1	Possible	-0,17 $\pm$ 0,25	Triviales
C-RS	13,3 $\pm$ 3,6	9,89 $\pm$ 2,7	Très probable	-1,06 $\pm$ 0,67	Moyennes
C-INT	11,3 $\pm$ 5,5	9,80 $\pm$ 2,8	Pas claire	-0,15 $\pm$ 0,57	-
VO_{2pic} (ml/min)					
FOR	3919 $\pm$ 374	3939 $\pm$ 423	Pas claire	0,04 $\pm$ 0,19	-
C-RS	4079 $\pm$ 289	4301 $\pm$ 326	Très probable	0,64 $\pm$ 0,29	Petites
C-INT	4150 $\pm$ 406	4213 $\pm$ 408	Pas claire	0,14 $\pm$ 0,29	-
VMA (km·h⁻¹)					
FOR	13,2 $\pm$ 1,0	13,1 $\pm$ 1,1	Pas claire	-0,06 $\pm$ 0,28	-
C-RS	13,4 $\pm$ 0,8	14,2 $\pm$ 0,8	Presque certain	0,84 $\pm$ 0,29	Petites
C-INT	14,0 $\pm$ 1,1	14,5 $\pm$ 1,1	Très probable	0,47 $\pm$ 0,19	Petites

Les valeurs pré et post entraînement sont exprimés par : moyenne $\pm$ écart type. Les variations intra-individuelles sont exprimées par : différences des moyennes standardisées $\pm$ 90% de l'intervalle de confiance. C-RS: combiné force/répétition de sprints, C-INT: combiné force/intermittent, FOR: Force. Les qualificatifs pas claire, possible, très probable et presque certain définissent les chances d'observer un effet positif/négatif ou trivial. Les valeurs sont écrites en rouge lorsque le % de chance d'avoir un effet positif ou négatif est supérieur à 75%. La taille de l'effet est interprétée à l'aide des seuils suivants 0,3; 0,9; 1,6; 2,5 et 4,0 qui caractérisaient respectivement des différences triviales, petites, moyennes, grandes, très grandes et extrêmement grandes.

Discussion

L'objectif de cette étude était de déterminer si le type d'entraînement d'endurance de haute intensité, dans le cadre des entraînements combinés, influencerait les réponses adaptatives neuromusculaires et métaboliques à l'issue de 8 semaines d'entraînement. Les principaux résultats suggèrent 1) des interférences sur le développement de la production de force et de la puissance musculaire à l'issue d'une configuration d'entraînement proposant 24h de récupération entre les séances. 2) L'entraînement combiné force/répétition de sprints longs (C-RS) semblerait plus pénalisant sur le développement de la production de force à vitesse lente des membres inférieurs et supérieurs en comparaison à l'entraînement force/intermittent court (C-INT). 3) A l'inverse, C-RS seulement permettrait d'augmenter VO_{2pic} se traduisant par une amélioration de la VMA et probablement de l'aptitude à répéter des sprints.

Le temps de récupération semblerait être une variable prépondérante pour contrer l'effet interférentiel de l'endurance sur le développement des capacités neuromusculaires. Nos travaux précédents (étude 2) confirmaient ce résultat en mettant en avant des adaptations neuromusculaires, à l'issue de C-24h, identiques à celles mesurées à la fin de FOR. L'une des conclusions de la présente étude contredit ce résultat car nous observons une altération des performances de détente verticale, indicateur de puissance musculaire, suite aux deux groupes d'entraînement combiné (C-RS et C-INT), par rapport à FOR. Ce résultat peut nous paraître surprenant d'autant plus que le nombre de séances d'entraînement de chaque qualité par semaine était identique à celui proposé au cours de l'étude 2. En revanche, la durée totale de la présente procédure expérimentale était légèrement plus longue par rapport à celle de l'étude 2. Cette charge d'entraînement d'une semaine supplémentaire serait peut-être suffisante pour expliquer l'interférence sur le développement de la puissance musculaire. De plus, nous pouvons noter d'importantes variations inter-individuelles qui pourraient expliquer nos résultats ainsi que les différences triviales de gains de détente verticale entre le groupe d'entraînement de force uniquement et les groupes d'entraînement combiné (figure 20). En effet, il semblerait que trois individus présentent des gains de détente verticale très positifs, avec des variations supérieures à 10%, suite à FOR, contre un seul individu suite à C-RS et C-INT. Un individu, au sein de C-INT, présenterait même une variation négative proche de 10%.

L'un des principaux résultats de notre étude indiquait donc une altération de la puissance musculaire du bas du corps (détente verticale), pour C-RS et C-INT, en comparaison à FOR. Ce constat est conforté par les données de plusieurs études montrant que la combinaison des qualités de force et d'endurance perturberait davantage le développement

de la production de force à vitesse rapide ainsi que les qualités de puissance et d'explosivité (Glowacki et coll., 2004; Hennessy & Watson, 1994; Hunter et coll., 1987). En revanche, nous avons également observé, uniquement pour C-RS, une perturbation des gains du moment musculaire des extenseurs du genou à $60^{\circ}\cdot s^{-1}$, ainsi que de la force maximale du haut du corps, sur un mouvement de DC. Le groupe d'entraînement combinant des séances de répétition de sprints longs aux séances de musculation (C-RS) perturberait donc à la fois les qualités de production de force à vitesse lente et de puissance (détente verticale). L'apparition d'interférence de l'endurance sur les réponses de force semblerait donc plus importante pour le groupe C-RS. Ce résultat se distingue des conclusions de Balabinis et coll. (2003) et Rhea et coll., (2008) ne montrant aucune interférence voire même des meilleurs gains de puissance musculaire à la suite de deux programmes d'entraînements combinant les séances de force et de répétition de sprints courts. Ces divergences sont surprenantes car les efforts de répétitions de sprints courts et longs induiraient tous deux des adaptations neuromusculaires (Buchheit & Laursen, 2013).

Le délai de récupération entre les exercices de musculation et de répétitions de sprints étant important (24h), nous supposons que les interférences mesurées s'expliqueraient par un autre mécanisme que les réponses moléculaires antagonistes. En effet, la durée de récupération de 24h serait suffisamment longue pour éviter une activation simultanée, et donc un risque d'interférence des voies de signalisation spécifiques des fibres musculaires au développement de force et d'endurance. Aucune augmentation de la CSA estimée du bras et de la cuisse n'a été mesurée à l'issue des trois groupes expérimentaux (C-RS, C-INT et FOR). Cela démontrerait éventuellement que l'interférence mesurée sur les gains de force suite à C-RS s'expliquerait autrement que par une altération de l'équilibre entre les synthèses et dégradations protéiques et donc des gains de masse musculaire. Dans ce cas, le phénomène interférentiel pourrait avoir une explication d'origine centrale. Cette dernière hypothèse est elle aussi à discuter car la perturbation de MVC₆₀ ne s'accompagnait pas de diminution des valeurs d'EMG à l'issue de C-RS. Ces propos sont purement spéculatifs et mériteraient d'être confirmés par d'autres travaux.

L'effet interférentiel plus important, mesuré suite à C-RS, pourrait s'expliquer par le mécanisme de fatigue aigue. En effet, nous avons observé, à l'issue de l'étude 1, que la fatigue induite par le type d'effort de répétition de sprints longs altérerait davantage, par rapport à un effort intermittent court, la performance de force réalisée 24h après. Howatson & Milak (2009) ont montré qu'un exercice consistant à répéter 15 sprints de 30m, entrecoupés de périodes de récupération de 60s, induirait une diminution significative de la

CMV accompagnée d'une augmentation des DOMS et des concentrations de créatine kinase, marqueurs des traumatismes musculaires jusqu'à 48h après l'exercice initial. Ces résultats pourraient alors expliquer, dans notre étude, l'interférence sur les gains de force du bas du corps pour C-RS puisque la deuxième séance de musculation de la semaine intervenait 48h après la première séance de répétition de sprints. L'interférence sur les gains de 1RM au DC pourrait également s'expliquer par une fatigue accrue induite par les efforts de répétitions de sprints. Cette forme d'entraînement induirait plus facilement un état de surmenage chez le sujet pouvant se traduire par une fatigue systémique et notamment un déséquilibre hormonal en faveur du catabolisme (Budgett, 1998). Nous pouvons supposer, de manière spéculative, que cette perturbation centrale pourrait expliquer les plus faibles gains induits sur les membres supérieurs. Un effet groupe pourrait aussi expliquer ce résultat. En effet, les plus hautes valeurs initiales pour C-RS, en comparaison aux autres groupes, pourraient induire une plus faible marge de progression pour la variable DC.

Dans cette étude, le phénomène d'interférence semble s'appliquer, avec une récupération de 24h entre les efforts, aussi bien sur les mouvements analytiques (mono-articulaires) que globaux (pluri-articulaire), contrairement aux observations faites au cours de l'étude 2. En effet, nous observons des altérations des performances mesurées au cours d'un effort d'extension de la jambe mais aussi au cours des tests de détente verticale et de DC. Ce résultat pourrait s'expliquer par l'évolution du statut des participants entre l'étude 2 et 3. En effet, la majorité des sujets de l'étude 3 avaient déjà participé à l'étude 2 et étaient donc mieux familiarisés avec les tests d'évaluation et les exercices. Les gains mesurés au cours de l'étude 3 seraient peut-être davantage liés aux adaptations physiologiques plutôt qu'à l'apprentissage de la technique des mouvements globaux (DC par exemple).

Nous pouvons conclure avec cette première partie en affirmant que l'entraînement associant à la force, des efforts de répétitions de sprints longs, serait plus interférent sur le développement des capacités neuromusculaires qu'un entraînement combinant force et intermittent court. Le phénomène de surmenage, induit par la difficulté des séances de répétition de sprints, constituerait alors un mécanisme explicatif de cette interférence accrue suite à C-RS.

Les deux types d'entraînements combinés (C-RS et C-INT) ont permis des gains de VMA à l'issue des 8 semaines de travail. Seul C-RS induisait quant à lui des gains de VO_{2pic} . Plusieurs travaux (Gist et coll., 2013; Sloth et coll., 2013) reportaient des gains significatifs de paramètres associés avec la puissance aérobie, et notamment du VO_{2pic} , après des périodes variables, de 2 à 7 semaines, d'entraînement de répétition de sprint longs sur ergocycle. Dans

notre étude, les sprints étaient réalisés en course à pied, sur piste. Les adaptations oxydatives induites par des efforts de répétition de sprints, en course à pied ou sur vélo, semblent donc être proches. Aucune augmentation de VO_{2pic} n'avait été mesurée suite à INT. Pourtant, il a été montré que ce type d'entraînement intermittent court (30/30 s, récupération active) était efficace pour améliorer le potentiel oxydatif du sportif (Billat, 2001). Notre résultat est à nuancer car l'effet statistique n'est *pas clair* (47/47/6 % de chances d'avoir un effet positif, trivial et négatif). Un échantillon de sujets plus important nous aurait sans doute permis de détecter une augmentation *possible* du VO_{2pic} à l'issue de C-INT. La simple augmentation de VMA mesurée suite à C-INT pourrait ainsi s'expliquer, au moins en partie, par une amélioration de l'économie de course induite par l'entraînement musculaire.

Le système aérobie permet rapidement de restaurer les réserves des substrats énergétiques tels que la phosphocréatine, pendant les périodes de récupération entre les efforts intenses (Duthie et coll., 2005). Les gains de VO_{2pic} , à l'issue de C-RS, pourraient alors expliquer l'amélioration de la moyenne des temps de course (RS_{moy}) au cours du test de sprints répétés. Cette amélioration serait liée à une moins grande fatigabilité, démontrée par un plus petit indice de fatigue (RS_{IF}) à la fin de la période d'entraînement, d'autant plus que la performance maximale (RS_{max}) restait constante. Ces résultats nous confirment l'importance des filières aérobies et de la composante aérobie du système de la créatine kinase (isoforme mitochondriale de la CK) pour l'amélioration de la performance moyenne au cours du test de sprints répétés. L'augmentation du VO_{2pic} pour C-RS permettrait d'optimiser la restauration des réserves de phosphocréatine entre les efforts et donc d'améliorer la résistance à la fatigue mesurée au cours du test. Par contre, l'augmentation de la VMA, liée à une amélioration de l'économie de course, associée au maintien du VO_{2pic} , suite à C-INT, n'aurait aucune influence sur la capacité à répéter des sprints.

En accord avec les principes de spécificité de l'entraînement, aucune amélioration des indicateurs de puissance oxydative (VO_{2pic} et VMA) n'a été constatée à la fin de FOR. L'entraînement de musculation, orienté sur un développement mixte de la masse musculaire et de la force maximale, ne semble donc pas optimiser l'économie de course des sujets et donc la performance aérobie, mesurée par un test VMA. Nos résultats se distinguent de certaines données de la littérature (Rønnestad & Mujika, 2013; Yamamoto et coll., 2010) mettant en évidence une amélioration des qualités neuromusculaires responsables de l'augmentation de la puissance et de l'économie de course suite à des entraînements destinés cette fois-ci à un travail de force maximale et d'explosivité type pliométrie. Egalement, la performance au cours du test de sprints répétés (12×20m) ne semble pas être affectée par l'entraînement de

FOR. Les gains de force maximale du bas du corps n'auraient même aucun effet sur RS_{max} . L'entraînement de force seul, dont une partie est dédiée à un objectif d'hypertrophie, n'aurait aucune incidence sur l'économie de course et donc sur la vitesse de décrochage au cours d'un test d'effort maximal, et aucun impact sur la performance maximale sur 20m.

Les performances obtenues au cours du test CMV_{fat} pour C-RS et C-INT, consistant donc à répéter un nombre maximal de répétitions isométriques de 5s à 80% de la CMV, ne suivent pas la même conclusion que le test de sprints répétés. En effet, les sujets réalisaient même un nombre moins important de contractions à l'issue des périodes d'entraînement. Les valeurs de CMV_{iso} étant plus importantes après l'entraînement, l'intensité absolue des contractions sous-maximales (80% CMV_{iso}) était par conséquent elle aussi plus élevée. Plusieurs travaux ont montré que le niveau de force absolue pouvait influencer la performance au cours d'un temps limite; ce dernier serait plus important lorsque le niveau de force maximale est plus petit (Clark et coll., 2005). Les adaptations oxydatives n'ont pas été suffisantes pour maintenir un nombre de répétition maximale au moins équivalent à celui mesuré au début de l'entraînement.

Conclusion:

Notre étude montrait que le phénomène d'interférence sur le développement de la force, pourrait dépendre du type d'entraînement de haute intensité utilisé (INT vs. RS). L'entraînement quotidien, avec 24h de récupération entre les séances, semblerait également perturber les adaptations neuromusculaires. L'entraînement de répétition de sprints longs semble plus interférent que l'entraînement intermittent court sur le développement des qualités de force maximale et de puissance. En revanche, il induirait des meilleurs gains de puissance et capacité aérobies (représentées par VO_{2pic}) se traduisant par une amélioration de la VMA et de la capacité à répéter des sprints. Cette forme d'entraînement est intéressante car elle limite considérablement le volume d'entraînement et le temps passé à l'entraînement.

Applications pratiques:

- Les précédents résultats suggèrent que les préparateurs physiques devraient éviter de concilier des séances de répétitions de sprints longs et de musculation au sein d'une même programmation lorsque l'objectif est de développer la force maximale et la puissance. Les mécanismes de fatigue aigue et de surmenage sembleraient expliquer ces résultats.

L'interférence aurait peut-être été moindre avec un volume d'entraînement plus faible ou un délai de récupération encore plus important entre les séances. Il serait intéressant de mesurer les effets des mêmes efforts de répétition de sprints longs mais appliqués cette fois-ci sur vélo, afin de lutter contre l'inflammation et notamment l'activation de TNF, ayant pour conséquence une augmentation de la lyse musculaire et une diminution de la synthèse protéique (Coffey et Hawley, 2007).

CONCLUSION GENERALE, PERSPECTIVES ET APPLICATIONS PRATIQUES

« L'ignorance est toujours prête à s'admirer »

Nicolas Boileau

La préparation physique du joueur de rugby de haut niveau requière un entraînement simultané des qualités de force et d'endurance. Ces deux types d'efforts se caractérisent par des sollicitations musculaires différentes et induisent des adaptations physiologiques spécifiques. Il s'avérerait plausible, à la vue de ces adaptations, que la combinaison de ces deux formes d'entraînement puisse induire un « conflit physiologique » au sein de l'organisme. Hickson (1980) fut le premier chercheur à mettre en évidence que la combinaison des qualités de force et d'endurance, au sein d'une même programmation, semblerait interférer sur le développement des qualités neuromusculaires et le freiner. Plusieurs hypothèses, telles que la fatigue induites par les exercices précédents et les adaptations physiologiques contradictoires, ont été mises en avant pour expliquer ce phénomène. A l'inverse, l'entraînement de musculation ne semble pas présenter d'effets négatifs sur les adaptations oxydatives. Des exercices de force maximale ou de force explosive optimiseraient même la performance d'endurance à travers une amélioration de l'économie de course.

Les principaux résultats de ce travail de thèse mettent en avant des interférences, à l'issue des périodes d'entraînement combiné, sur les gains de force maximale, de production de force à vitesse lente et vitesse rapide mais aussi de puissance musculaire. Nous suggérons donc que les interférences interviendraient sur l'ensemble des paramètres de la production de force. Ces résultats contredisent donc en partie les conclusions de la littérature mettant principalement en exergue une altération des paramètres de production de force à vitesse rapide (Dudley & Djamil, 1985), de puissance (Hennessy & Watson, 1994; Hunter et coll., 1987) et d'explosivité (Hakkinen et coll., 2003).

Les interférences, mesurées au sein de nos expérimentations, agiraient de manière globale, c'est-à-dire à la fois sur les membres inférieurs et supérieurs. Ce résultat n'est qu'en partie en accord avec les données de la littérature mentionnant que l'altération des adaptations neuromusculaires interviendrait prioritairement sur les membres sollicités simultanément au cours des exercices de force et d'endurance (Craig et coll., 1991; Lee et coll., 1990). Nous pouvons ainsi suggérer l'intervention de facteurs centraux pour expliquer l'altération de performance sur les membres supérieurs alors que l'entraînement d'endurance sollicite principalement le bas du corps. Ces propos restent spéculatifs car nous n'avons pas pu confirmer cette hypothèse au sein de nos différents travaux. Cela remet alors quelque peu en cause le modèle proposé par Docherty & Sporer (2000) affirmant que le(s) conflit(s) physiologique(s) responsables du phénomène d'interférence interviendraient au niveau périphérique.

Plusieurs types de modalités d'entraînement permettraient de moduler l'interférence de l'endurance sur la masse musculaire et la force. L'ordre AER/FOR ne semblerait pas optimal car les séances d'endurance de haute intensité, type intermittent court et répétition de sprints longs, induirait une fatigue aigue perturbant les différents paramètres de la production de force des membres inférieurs et supérieurs, et ce pendant une durée pouvant aller jusqu'à 24h. Cette fatigue serait néfaste au développement des qualités neuromusculaires. Afin de limiter le risque d'apparition de celle-ci, il nous a alors semblé pertinent d'adopter la configuration FOR/AER et de mesurer les effets de celle-ci suite à différentes périodes d'entraînement.

L'un de nos principaux résultats indiquait des interférences sur les adaptations neuromusculaires lorsque la séance d'endurance était directement appliquée après la séance de force. Les travaux de Coffey et coll., (2009) valident ces résultats en montrant qu'une configuration d'entraînement (FOR/AER), sans temps de récupération entre les exercices, induirait des réponses moléculaires contradictoires inhibant la synthèse protéique et par conséquent les gains de force. Dans les expérimentations présentées ici, une récupération de 6h entre les exercices ne serait pas suffisante pour inhiber totalement l'effet interférentiel sur les qualités neuromusculaires. Une récupération de 24h entre les séances serait ainsi nécessaire pour une meilleure optimisation de ces qualités même si les effets de cette durée semblent dépendants du type d'entraînement aérobie proposé au sein de l'entraînement combiné.

En effet, les efforts de répétitions de sprints longs altéreraient davantage le développement des différents paramètres de la production de force, en comparaison aux entraînements intermittents courts, à l'issue d'une période combinée avec 24h de récupération entre les séances. Les entraînements d'endurance de haute intensité (intermittent court et répétition de sprints), communément utilisés au rugby, ne semblent donc pas avoir le même impact sur la performance de force.

Le temps de récupération entre les séances mais également le type d'entraînement d'endurance de haute intensité semblent également influencer les réponses des qualités d'endurance suite aux périodes d'entraînement combiné. En effet, nous avons mesuré des gains de VO_{2pic} supérieurs lorsque la configuration d'entraînement était caractérisée par un délai de 24h (C-24h) entre les exercices en comparaison aux configurations C-0h et C-6h. Ce résultat nous interpelle car seules trois études (Dolezal et Potteiger, 1998; Glowacki et coll., 2004; Nelson et coll., 2000) avaient mis en évidence une altération du développement des qualités aérobies à l'issue d'une période d'entraînement combiné. L'hypothèse de la fatigue aigue avait été proposée pour expliquer l'interférence. Nous pouvons également se questionner quant aux éventuels antagonismes moléculaires pouvant freiner les gains du potentiel oxydatif. A notre

connaissance, aucune étude n'a montré d'inhibition des voies de signalisation impliquées par l'effort d'endurance dans le cadre d'une configuration combinée. L'entraînement de répétition de sprints longs est intéressant car il permet, conjointement à une augmentation du $\text{VO}_{2\text{pic}}$, d'améliorer la capacité à répéter des sprints, constituant une qualité prépondérante en sport collectif.

Les études 2 et 3 nous montrent qu'une durée de récupération de 24h entre les exercices induit des gains de $\text{VO}_{2\text{pic}}$ aussi bien lorsque l'entraînement combiné est constitué d'un effort intermittent court (étude 2) ou d'un effort de répétition de sprints longs (étude 3). La différence est que le premier n'altère en rien le développement des qualités neuromusculaires tandis que le second perturbe les gains de puissance et de production de force à vitesse lente de l'ensemble de la musculature. En effet, les gains de force à l'issue de C-24h et FOR étaient identiques (étude 2). Les performances de détente verticale, du 1RM au DC et du moment musculaire à $60^\circ \cdot \text{s}^{-1}$ étaient quant à eux altérés suite à C-RS par rapport à FOR. Pour conclure, une configuration d'entraînement combiné, associant au travail de musculation un travail intermittent court, avec un délai de 24h entre les séances, n'induirait aucune interférence sur les adaptations neuromusculaires et oxydatives (étude 2). En revanche, celle associant à la musculation un travail de répétition de sprints, induirait quelques interférences sur les adaptations neuromusculaires tout en améliorant le potentiel aérobie (étude 3).

L'ensemble des entraînements aérobie proposés au sein de nos recherches étaient réalisés en course à pied. Il semblerait que ces derniers soient plus interférents sur le développement de la force que ceux réalisés sous forme « portée » (vélo, rameur, ...) en raison entre autres, des traumatismes induits par les contacts au sol. Ceux-ci stimuleraient davantage l'inflammation et notamment l'activation des médiateurs de l'inflammation comme le TNF, ayant pour conséquence une augmentation de la lyse musculaire et une diminution de la synthèse protéique (Coffey et Hawley, 2007). Il serait intéressant de comparer les adaptations induites par les entraînements d'endurance de haute intensité mais réalisés cette fois-ci de manière portée (vélo, rameur, natation, etc ...). Il serait également pertinent afin d'alléger la charge de travail de course, généralement conséquente à l'issue des entraînements de rugby, et donc de réduire les traumatismes sur le bas de corps, notamment pour les joueurs ayant une masse corporelle importante (avants).

Les séances spécifiques de jeu, en sport collectif, peuvent induire des sollicitations énergétiques importantes. Cela imposerait aux préparateurs physiques de tenir compte de la sollicitation métabolique induite par ces séances spécifiques, et donc de quantifier précisément la charge d'entraînement (outil GPS) et les réponses physiologiques, (par exemple, la fréquence

cardiaque), induites par l'exercice. L'objectif sera alors de tenir compte des exigences imposées par les séances de rugby afin de coordonner ensuite la programmation des séances de force, vitesse et puissance, afin de diminuer le plus possible l'effet interférentiel sur les paramètres neuromusculaires.

L'analyse des variations individuelles aux entraînements C-RS, C-INT et FOR, représentées graphiquement à l'issue de l'étude 3, laissent apparaître une très grande hétérogénéité des réponses au sein d'une même configuration d'entraînement. Par exemple, les variations du 1RM au ½ squat peuvent aller de -6 à 41% à la fin de C-INT alors que celles de CMV_{iso} oscilleraient entre -2 et 17% à la fin de C-RS. Nous observons la même hétérogénéité des résultats de la puissance oxydative (VO_{2pic}) à l'issue de C-RS avec des variations allant de -1 à 10%. Ces résultats supposent alors des différences de comportements des individus face à une même charge d'entraînement (Karavirta et coll., 2011). Il nous semble pertinent de poursuivre l'analyse statistique des résultats de ces travaux par une analyse de corrélation afin de détecter une éventuelle relation entre les gains de force et d'endurance. L'objectif pourrait être, à terme, d'identifier de manière individuelle les configurations d'entraînement permettant d'obtenir simultanément les meilleurs gains de force et d'endurance.

L'une des problématiques à résoudre pourrait également être de proposer des méthodes permettant d'identifier les réponses individuelles bénéfiques aux différents stimuli d'entraînement. Une équipe Néo-Zélandaise s'est intéressée à ce sujet en mesurant les réponses hormonales (testostérone et cortisol) à différents types d'entraînements de force : 1) hypertrophie (4×10 reps à 70%), 2) force maximale (3×5 à 85%), 3) endurance musculaire (3×15 à 45%) et 4) puissance (3×5 à 40%) (Beaven et coll., 2008). Ces auteurs ont montré que les gains de 1RM, mesurés sur des mouvements du bas et du haut du corps, étaient importants lorsque les sujets participaient au programme d'entraînement induisant des réponses aiguës de testostérone maximales. A l'inverse, lorsque ces mêmes sujets réalisaient le programme d'entraînement induisant des réponses aiguës de testostérone minimales, la performance de force avait tendance à stagner voire diminuer. Cette relation entre les réponses hormonales et les gains fonctionnels pourrait alors guider les entraîneurs et les préparateurs physiques à structurer leurs entraînements afin d'optimiser le développement des qualités physiques. L'analyse individuelle des réponses hormonales pourraient alors être intéressante afin d'identifier les configurations d'entraînements combinés optimales aux adaptations neuromusculaires et oxydatives.

L'objectif étant, pour ces prochaines années, « 1 joueur, 1 planification, 1 programmation »

...

Voici les principaux résultats mis en exergue au cours de ce travail de thèse. Les conclusions de nos études et les données existantes de la littérature nous incitent à respecter différents principes, notamment si l'objectif prioritaire est le développement des qualités neuromusculaires :

- La combinaison des qualités de force et d'endurance interfère sur le développement des qualités neuromusculaires.
 - L'interférence porterait aussi bien sur la capacité de production de force à vitesse lente que sur la capacité de production de force à vitesse rapide et la puissance.
 - Elle agirait sur les membres inférieurs, sollicités intensément au cours des exercices de force et d'endurance, mais également sur les membres supérieurs.
 - L'entraînement de force pourrait aussi pénaliser les adaptations aérobies.
 - Plusieurs variables sont susceptibles de moduler l'interférence sur le développement des qualités de force-puissance, à savoir l'ordre des séances, le temps de récupération, les types d'entraînement et le volume d'entraînement.
 - La configuration d'entraînement FOR/AER avec un temps de récupération important de 24h entre les séances serait préférable pour le développement de la force. Cependant, nous pouvons relever quelques particularités:
 - *Un délai de 6h de récupération pourrait être suffisant entre les séances de musculation et d'intermittent court pour le développement de la force maximale des muscles du haut du corps.*
- Même avec ce délai de 24h de récupération,
- *Le développement optimal de la production de force à vitesse lente du bas et du haut du corps ne serait pas compatible avec un entraînement intense de répétition de sprints longs.*
 - *Le développement optimal de la puissance musculaire du bas du corps ne serait pas compatible avec des entraînements intenses de répétition de sprints ou intermittent court.*
- Le temps de récupération entre les exercices semblerait également déterminant pour les qualités d'endurance. Celles-ci pourraient être réduites dans des configurations d'entraînements présentant un faible délai de récupération entre les séquences (0 et 6h).
- Il existe des différences de réponses sur le développement de la force selon le type d'entraînement aérobique de haute intensité utilisé dans le cadre des entraînements combinés.

- L'entraînement de répétition de sprints longs, même dans une configuration avec 24h de récupération entre les exercices, induirait des interférences sur le développement de la force.
- L'entraînement de répétition de sprints longs induirait des meilleures adaptations oxydatives que l'intermittent court et améliorerait la capacité à répéter des sprints.
- Plusieurs mécanismes expliqueraient l'interférence de l'endurance sur la force dont les phénomènes de fatigue et d'adaptations physiologiques aiguës et chroniques contradictoires. Cela reste des hypothèses car nous ne les avons pas directement mesurés au sein de nos études.

Ce travail de thèse nous aura permis de répondre à quelques questions liées à la problématique des entraînements combinés mais de nombreuses interrogations restent encore en suspend et notamment par rapport au ratio d'entraînement force/endurance. Même si nous ne l'avons pas mesuré directement, il semblerait que l'interférence évoquée ci-dessus sur les qualités neuromusculaires semblerait réduite avec un ratio d'entraînement équivalent à 1 séance aérobie pour 3 séances de musculation par semaine (Jones et coll., 2013).

Cette dernière étude remet fortement en question le concept de la périodisation traditionnelle proposé par Matveyev (1981) consistant en une sollicitation simultanée et équilibrée des qualités physiques au sein d'un même plan d'entraînement. Ce concept a souvent été utilisé en sport-collectif mais s'avérerait contre-productif. Plusieurs travaux ont en effet mis en avant une diminution importante des qualités neuromusculaires (force maximale, puissance maximale, vitesse) à l'issue de plusieurs périodisations traditionnelles en sport-collectif (Issurin, 2010; Schneider et coll., 1998). Nous pouvons émettre l'hypothèse que ces baisses de performance seraient liées à la problématique de la combinaison des entraînements, et notamment de force et d'endurance. Une programmation fine de ces séances, tant au niveau de leurs agencements (FOR/AER vs. AER/FOR) que des délais entre les types d'efforts, ne semblerait pas suffisante pour optimiser le développement des qualités neuromusculaires. La charge de travail serait un élément indispensable pour réduire le phénomène interférentiel. Une solution serait de se fixer des objectifs prioritaires de travail et donc de développer consécutivement, et non plus simultanément, les qualités physiques. Le principe de périodisation par bloc, utilisé initialement par Anatoly Bondarchuk à la fin des années 80, pourrait ainsi être efficace. Cela consisterait à travailler intensément les qualités de force et d'endurance au cours de cycles successifs.

Alors, d'autres problématiques se posent :

- Quelle devrait être la charge minimale d'entraînement d'endurance, au cours d'un cycle de travail de force, afin de maintenir les qualités d'endurance sans que celles-ci ne nuisent sur le développement des qualités neuromusculaires ?
- Quelle devrait être la durée d'un bloc, orienté sur un travail de force, permettant de maintenir les qualités oxydatives et de développer suffisamment les qualités neuromusculaires ?

Ce type de périodisation semblerait adapté au rugby à 7, caractérisé par des cycles de travail de 4 à 7 semaines entre les compétitions.

BIBLIOGRAPHIE

« Un livre n'est excusable qu'autant qu'il apprend quelque chose »

Voltaire

- Aagaard P, Andersen JL, Dyhre-Poulsen P, Leffers AM, Wagner A, Magnusson SP, Halkjaer-Kristensen J, Simonsen EB.** A mechanism for increased contractile strength of human pinnate muscle in response to strength training: changes in muscle architecture. *J Physiol.* 2001;534(2):613-23.
- Abernethy PJ, & Quigley BM.** Concurrent strength and endurance training of the elbow flexors. *J Strength Cond Res.* 1993;7:141-6.
- ACSM's health and fitness.** 2010. 4(6):1-48.
- Adams GR, Hather BM, Baldwin KM, Dudley GA.** Skeletal muscle heavy chain composition and resistance training. *J Appl Physiol.* 1993;74(2):911-5.
- 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;305(1):22-32.
- Atha J.** Strengthening muscle. *Exerc Sport Sci Rev.* 1981;9:1-73.
- Austin D, Gabbett T, Jenkins D.** Physical demands of super 14 rugby union. *J Sci Med Sport.* 2011;14(3):259-63.
- Baechle TR, Earle RW.** Essentials of strength training and conditioning. 3^{ème} edition. 2008.
- Baar K, Esser K.** Phosphorylation of p70(S6k) correlates with increased skeletal muscle mass following resistance exercise. *Am J Physiol.* 1999;276:120-7.
- Babault N, Pousson M, Ballay Y, Van Hoecke J.** Activation of human quadriceps femoris during isometric, concentric, and eccentric contractions. *J App Physiol.* 2001;91(6):2628-34.
- Babault N, Pousson M, Michaut A, Van Hoecke J.** Effect of quadriceps femoris muscle length on neural activation during isometric and concentric contractions. *J Appl Physiol.* 2003;94(3):983-90.
- Baker D, Wilson G, Carlyon R.** Periodization: the effect on strength of manipulating volume and intensity. *J Strength Cond Res.* 1994;8(4):235-42.
- Baker D.** The effects of an in-season of concurrent training on the maintenance of maximal strength and power in professional and college-aged rugby league football players. *J Strength Cond Res.* 2001;15(2):172-7.
- Balabinis CP, Psarakis CH, Moukas M, Vassiliou MP, Behrakis PK.** Early phase changes by concurrent endurance and strength training. *J Strength Cond Res.* 2003;17(2):393-401.
- Bastiaans JJ, Van Diemen JP, Veneberg T, Jeukendrup AE.** The effects of replacing a portion of endurance training by explosive strength training on performance in trained cyclists. *Eur J Appl.* 2001;86(1):79-84.
- Beaven CM, Gill ND, Cook CJ.** Salivary testosterone and cortisol responses in professional rugby players after four resistance exercise protocols. *J Strength Cond Res.* 2008;22(2):426-32.
- Bell GJ, Petersen SR, Quinney HA, Wenger HA.** Sequencing of endurance and high velocity strength training. *Can J Sport Sci.* 1988;13(4):214-9.
- 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;12(4):384-90.
- Bell GJ, Syrotuik D, Socha T, Maclean I, Quinney HA.** Effect of strength training and concurrent

strength and endurance training on strength, testosterone, and cortisol. *J Strength Cond Res*. 1997;11(1):57-64.

Bell GJ, Syrotuik D, Martin TP, Burnham R, Quinney HA. Effect of concurrent strength and endurance training on skeletal muscle properties and hormone concentrations in humans. *Eur J Appl Physiol*. 2000; 81(5):418-27.

Bentley DJ, Smith PA, Davie AJ, Zhou S. Muscle activation of the knee extensors following high intensity endurance exercise in cyclists. *Eur J Appl Physiol*. 2000;81(4):297-302.

Billat LV. Interval training for performance: a scientific and empirical practice. Special recommendations for middle- and long-distance running. Part I: aerobic interval training. *Sports Med*. 2001;31(1):13-31.

Bishop D, Jenkins DG, MacKinnon LT, McEniery M, Carey MF. The effect of strength training on endurance performance and muscle characteristics. *Med Sci Sports Exer*. 1999;31(6):886-891.

Bolster DR, Kubica N, Crozier SJ, Williamson DL, Farrell PA, Kimball SR, Jefferson LS. Immediate response of mammalian target of rapamycin (mTOR)-mediated signalling following acute resistance exercise in rat skeletal muscle. *J Physiol*. 2003;553:213-220.

Buchheit M, Laursen PB. High-intensity interval training, solutions to the programming puzzle: part1: cardiopulmonary emphasis. *Sports Med*. 2013;43(5):313-38.

Budgett R. Fatigue and underperformance in athletes: the overtraining syndrome. *Br J Sports Med*. 1998;32(2):107-10.

Bulgakova NZ, Vorontsov AR, Fomichenko TG. Improving the technical preparedness of young swimmers by using strength training. *Soviet Sports Rev*. 1990;25(2):102-104.

Burgomaster KA, Howarth KR, Phillips SM, Rabokowchuk M, MacDonald MJ, McGee SL, Gibala MJ. Similar metabolic adaptations during exercise after low volume sprint interval and traditional endurance training in humans. *J Physiol*. 2008;586(1):151-60.

Caiozzo VJ, Perrine JJ, Edgerton VR. Training-induced alterations of the in vivo force-velocity relationship of human muscle. *J Appl Physiol*. 1981;51(3):750-4.

Carter J, Jeukendrup AE. Validity and reliability of three commercially available breath-by-breath respiratory systems. *Eur J Appl Physiol*. 2002;86(5):435-41.

Chaillou T, Lee JD, England JH, Esser KA, McCarthy JJ. Time course of gene expression during mouse skeletal muscle hypertrophy. *J Appl Physiol*. 2013;115(7):1065-74.

Chtara M, Chamari K, Chaouachi M, Chaouachi A, Koubaa D, Feki Y, Millet GP, Amri M. Effects of intra-session concurrent endurance and strength training sequence on aerobic performance and capacity. *Br J Sports Med*. 2005;39(8):555-60.

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. *J Strength Cond Res*. 2008;22(4):1037-45.

Chromiak JA, Mulvaney DR. A review: the effect of combined strength and endurance training on strength development. *J Appl Sport Sci Res*. 1990;4(2):55-60.

Clark BC, Collier SR, Manini TM, Ploutz-Snyder LL. Sex differences in muscle fatigability and activation patterns of the human quadriceps femoris. *Eur J Appl Physiol.* 2005;94:196-206.



- Clarkson PM, Tremblay I.** Exercise-induced muscle damage, repair, and adaptation in humans. *J Appl Physiol.* 1988;65(1):1-6.
- Clarkson PM.** Eccentric exercise and muscle damage. *Int J Sports Med.* 1997;18(4):314-17.
- Coffey V, Hawley J.** The molecular bases of training adaptation. *Sports Med.* 2007;37(9):737-63.
- Coffey VG, Pilegaard H, Garnham AP, O'Brien BJ, Hawley JA.** Consecutive bouts of diverse contractile activity alter acute responses in human skeletal muscle. *J Appl Physiol.* 2009;106(4):1187-97.
- Coffey VG, Jemiolo B, Edge J, Garnham AP, Trappe SW, Hawley JA.** Effect of consecutive repeated sprint and resistance exercise bouts on acute adaptive responses in human skeletal muscle. *Am J Physiol.* 2009;297(5):1441-51.
- Collins MA, Snow TK.** Are adaptations to combined endurance and strength training affected by the sequence of training ? *J Sports Sci.* 1993;11(6):485-91.
- Coughlan GF, Green BS, Pook PT, Toolan E, O'Connor SP.** Physical game demands in elite rugby union: a global positioning system analysis and possible implications for rehabilitation. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2001;41(8):600-5.
- Costill DL, Coyle EF, Fink WF, Lesmes GR, Witzmann FA.** Adaptations in skeletal muscle following strength training. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol.* 1979;46(1):96-9.
- Costill DL.** Muscle biopsy research: application of fiber composition to swimming. *J Fla Med Assoc.* 1980;67(4):401-404.
- Craig BW, Lucas J, Pohlman R, Stelling H.** The effects of running, weightlifting and a combination of both on growth hormone release. *J Appl Sport Science Res.* 1991;5(4):198-203.
- Cunningham JT, Rodgers JT, Arlow DH, Vazquez F, Moota VK, Puigserver P.** mTOR controls mitochondrial oxidative function through a YY1-PGC-1 α transcriptional complex. *Nature.* 2007;450:736-41.
- Dawson MJ, Gadian DG, Wilkie DR.** Muscle fatigue investigated by phosphorus NMR. *Nature.* 1978;274(31):861.
- Deakin GB.** Concurrent training in endurance athletes: the acute effects on muscle recovery capacity, physiological, hormonal and gene expression responses post-exercise. *Thèse.* 2004.
- Deschenes MR, Judelson DA, Kraemer WJ, Meskaitis VJ, Volek JS, Nindl BC, Harman FS, Deabber DS.** Effects of resistance training on neuromuscular junction morphology. *Muscle Nerve.* 2000;23(10):1576-81.
- Dettmers C, Lemon RN, Stephan KM, Fink GR, Frackowiak RS.** Cerebral activation during the exertion of sustained static force in man. *Neuroreport.* 1996;7(13):2103-10.
- De Souza EO, Tricoli V, Franchini E, Paulo AC, Regazzini M, Ugrinowitsch C.** Acute effect of two aerobic exercise modes on maximum strength and strength endurance. *J Strength Cond Res.* 2007;21(4):1286-90.
- De Souza EO, Rosa LF, Pires FO, Wilson J, Franchini E, Tricoli V, Ugrinowitsch C.** The acute effects of varying strength exercises bouts on 5km running. *J Sports Sci Med.* 2011;10(3):565-70.

- De Souza EO, Tricoli V, Roschel H, Bacureau AV, Ferreira JC, Aoki MS, Neves M, Aihara AY, Da Rocha A, Ugrinowitsch C.** Molecular adaptations to concurrent training. *Int J Sports Med.* 2013;34(3):207-13.
- Docherty D, Sporer B.** A proposed model for examining the interference phenomenon between concurrent aerobic and strength training. *Sports Med.* 2000;30(6):385-94.
- Dolezal BA, Potteiger JA.** Concurrent resistance and endurance training influence basal metabolic rate in nondieting individuals. *J Appl Physiol.* 1998;85(2):695-700.
- Drummond MJ, Vehrs PR, Schaalje GB, Parcell AC.** Aerobic and resistance exercise sequence affects excess postexercise oxygen consumption. *J Strength Cond Res.* 2005;19(2):332-7.
- Duchateau J, Hainaut K.** Behaviour of short and long latency reflexes in fatigued human muscles. *J Physiol.* 1993;471:787-99.
- Dudley GA, Abraham WM, Terjung RL.** Influence of exercise intensity and duration on biochemical adaptations in skeletal muscle. *J Appl Physiol.* 1982;53:844-50.
- Dudley GA, Djamil R.** Incompatibility of endurance- and strength-training modes of exercise. *J Appl Physiol.* 1985;59(5):1446-51.
- Dudley GA, Fleck SJ.** Strength and endurance training. Are they mutually exclusive? *Sports Med.* 4(2):79-85.
- Duthie G, Pyne D, Hooper S.** Applied physiology and game analysis of rugby union. *Sports Med.* 2003;33(13):973-91.
- Duthie G, Pyne D, Hooper S.** Time motion analysis of 2001 and 2002 super 12 rugby. *J Sports Sci.* 2005;23:523-30.
- Eaton C, George K.** Position specific rehabilitation for rugby union players. Part I: empirical movement analysis data. *Phys Ther Sport.* 2006;7:22-29.
- Ellison GM, Waring CD, Vicinanza C, Torella D.** Physiological cardiac remodelling in response to endurance exercise training: cellular and molecular mechanisms. *Heart.* 2012;98(4):5-10.
- Fernandez-Gonzalo R, Lundberg TR, Tesch PA.** Acute molecular responses in untrained and trained muscle subjected to aerobic and resistance exercise training versus resistance training alone. *Acta Physiol.* 2013. Sous presse.
- Fitts RH.** Cellular mechanisms of muscle fatigue. *Physiol Rev.* 1994;74(1):49-94.
- Fitts RH.** Muscle fatigue: the cellular aspects. *Am J Sports Med.* 1996;24(6):9-13.
- Fleck SJ, Kraemer WJ.** Resistance training: basic principles (part 1 of 4). *Physician Sportsmed.* 16:160-71.
- Gabriel DA, Kamen G, Frost G.** Neural adaptations to resistive exercise: mechanisms and recommendations for training practices. *Sports Med.* 2006;36(2):133-49.
- Gergley JC.** Comparison of two lower-body modes of endurance training on lower-body strength development while concurrently training. 2009;23(3):979-87.

- Girard O, Mendez-Villanueva A, Bishop D.** Repeated-sprint ability – part 1: factors contributing to fatigue. *Sports Med.* 2011;41(8):673-94.
- Gist NH, Fedewa MW, Dishman RK, Cureton KJ.** Sprint interval training effects on aerobic capacity: a systematic review and meta-analysis. *Sports Med.* 2013; sous presse.
- Glowacki S, Martin SE, Maurer A, Baek W, Green JS, Crouse SF.** Effects of resistance, endurance, and concurrent exercise on training outcomes in men. *Med Sci Sports Exerc.* 2004;36(12):2119-27.
- Gollnick PD, Piehl K, Saltin B.** Selective glycogen depletion pattern in human muscle fibres after exercise of varying intensity and at varying pedaling rates. *J Physiol.* 1974;241(1):45-57.
- Gollnick PD.** Relationship of strength and endurance with skeletal muscle structure and metabolic potential. *Int J Sports Med.* 1982;3(1):26-32.
- Gotshalk LA, Loebel CC, Nindl BC, Putukian M, Sebastianelli WJ, Newton RU, Hakkinen K, Kraemer WJ.** Hormonal responses of multiset versus single-set heavy-resistance exercise protocols. *Can J Appl Physiol.* 1997;22(3):244-55.
- Gravelle BL, Blessing DL.** Physiological adaptation in women concurrently training for strength and endurance. *J Strength Cond Res.* 2000;14(1):5-13.
- Green HJ, Houston ME, Thomson JA, Fraser IG.** Fiber type distribution and maximal activities of enzymes involved in energy metabolism following short-term supramaximal exercise. *Int J Sports Med.* 1984;5(4):198-201.
- Green HJ, Dahly A, Schoemaker K, Goreham C, Bombardier E, Ball-Burnett M.** Serial effects of high-resistance and prolonged endurance training on Na⁺-K⁺ pump concentration and enzymatic activities in human vastus lateralis. *Acta Physiol Scand.* 1999;165(2):177-84.
- Häkkinen 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;89(1):42-52.
- Hawley JA, Williams MM.** Dietary intakes of age-group swimmers. *Br J Sports Med.* 1991;25(3):154-8.
- Henneman E, Somjen G, Carpenter DO.** Excitability and inhibitability of motoneurons of different sizes. *J Neurophysiol.* 1965;28(3):599-620.
- Hennessy LC, Watson AWS.** The interference effects of training for strength and endurance simultaneously. *J Strength Cond Res.* 1994;8:12–9.
- Hepburn D, Maughan RJ.** Glycogen availability as a limiting factor in the performance of isometric exercise. *J Physiol.* 1982;325:52-53.
- Hickson RC.** Interference of strength development by simultaneously training for strength and endurance. *Eur J Appl Physiol.* 1980;45:255-63.
- Hickson RC, Dvorak BA, Gorostiaga M, Kurowski TT, Foster C.** Potential for strength and endurance training to amplify endurance performance. *J Appl Physiol.* 1988;65:2285-90.
- Hoff J, Gran A, Helgerud J.** Maximal strength training improves aerobic endurance performance. *Scand J Med Sci Sports.* 2002;12(5):288-95.

Hopkins WG, Marshall S, Batterham A, Hanin J. Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. *Med Sci Sports Exerc.* 2009;41(1):3–13.

Hopkins WG. Spreadsheets for analysis of controlled trials with adjustment for a subject characteristic. *Sportscience.* 2006;10:46-50.

Hortobagyi T, Katch FI, Lachance PF. Effects of simultaneous training for strength and endurance on upper and lower body strength and running performance. *J Sports Med Phys Fitness.* 1991;31(1):20-30.

Housh DJ, Housh TJ, Weir JP, Weir LL, Johnson GO, Stout JR. Anthropometric estimation of thigh muscle cross-sectional area. *Med Sci Sports Exerc.* 1995;27(5):784-91.

Howatson G, Milak A. Exercise-induced muscle damage following a bout of sport specific repeated sprints. *J Strength Cond Res.* 2009;23(8):2419-24.

Hunter G, Demment R, Miller D. Development of strength and maximum oxygen uptake during simultaneous training for strength and endurance. *J Sports Med Phys Fitness.* 1987;27(3):269-75.

Irrcher I, Ljubicic V, Kirwan AF, Hood DA. AMP-activated protein kinase-regulated activation of the PGC1- α promoter in skeletal muscle cells. *Plos One.* 2008;3(10).

Issurin VB. New horizons for the methodology and physiology of training periodization. *Sports Med.* 2010;40(3):189-206.

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;94(1-2):70-75.

Izquierdo M, Ibanez J, Gonzalles-Badillo JJ, Hakkinen K, Ratamess NA, Kraemer WJ, French DN, Eslava J, Altadill A, Asiain X, Gorostiaga EM. Differential effects of strength training leading to failure versus not to failure. *J Appl Physiol.* 2006;100:1647-56.

Jones NL, Sutton JR, Taylor R, Toews CJ. Effect of pH on cardiorespiratory and metabolic responses to exercise. *J Appl Physiol.* 1977;43:959-964.

Jones DA, Rutherford OM, Parker DF. Physiological changes in skeletal muscle as a result of strength training. *Q J Exp Physiol.* 1989;74(3):233-56.

Jones TW, Howatson G, Russel M, French DN. Performance and neuromuscular adaptations following differing ratios of concurrent strength and endurance training. *J Strength Cond Res.* 2013; sous presse.

Karavirta L, Hakkinen K, Kauhanen A, Arijia-Blazquez A, Sillanpaa E, Rinkinen N, Hakkinen A. Individual responses to combined endurance and strength training in older adults. *Med Sci Sports Exerc.* 2011;43(3):484-90.

Karlsson J, Funderburk CF, Essen B, Lind AR. Constituents of human muscle in isometric fatigue. *J Appl Physiol.* 1975;38:208-211.

Kearns CF, Abe T, Brechue WF. Muscle enlargement in sumo wrestlers includes increased muscle fascicle length. *Eur J Appl Physiol.* 2000;83(4-5): 289-96.

Kraemer WJ, Fleck SJ, Dziados JE, Harman EA, Marchitelli LJ, Gordon SE, Mello R, Frykman PN, Koziris LP, Triplett NP. Changes in hormonal concentrations after different heavy-resistance exercise protocols in women. 1993;75(2):594-604.

- 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.* 1995;78(3):976-89.
- Kraemer WJ, Ratamess NA.** Fundamentals of resistance training: progression and exercise prescription. *Mil Med.* 2004;169(12):994-9.
- Kuipers H.** Exercise-induced muscle damage. *Int J Sports Med.* 1994;15(3):132-5.
- Lacomme M.** Analyse de la tâche et physiologie appliquée au rugby. Etude de la fatigue associée à l'exercice maximal isométrique répété. *Thèse.* 2013.
- Lee A, Craig BW, Lucas J, Pohlman R, Stelling H.** The effect of endurance training, weight training and a combination of endurance and weight training upon the blood profil of young male subjects. *J Appl Sport Sci Res.* 1990;4(3):68-75.
- Leveritt M, Abernethy PJ.** Acute effects of high-intensity endurance exercise on subsequent resistance activity. *J Strength Cond Res.* 1999;13(1):47-51.
- Leveritt M, Abernethy PJ, Barry BK, Logan PA.** Concurrent strength and endurance training. A review. *Sports Med.* 1999;28(6):413-27.
- Lira VA, Brown DL, Lira AK, Kavazis AN, Soltow QA, Zeanah EH, Criswell DS.** Nitric oxide and AMPK cooperatively regulate PGC-1 in skeletal muscle cells. *J Physiol.* 2010;588(18):3551-66.
- Little JP, Sadfar A, Wilkin GP, Tarnopolsky MA, Gibala MJ.** A practical model of low-volume high intensity interval training induces mitochondrial biogenesis in human skeletal muscle: potential mechanisms. *J Physiol.* 2010;588(6):1011-22.
- Lundberg TR, Fernandez-Gonzalo R, Gustafsson T, Tesch PA.** Aerobic exercise alters skeletal muscle molecular responses to resistance exercise. *Med Sci Sports Exerc.* 2012;44(9):1680-8.
- MacDougall JD, Sale DG, Elder GCB, Sutton JR.** Muscle ultrastructural characteristics of elite powerlifters and bodybuilders. *Eur J Appl Physiol.* 1982;48:117-126.
- MacDougall JD.** Morphological changes in human skeletal muscle following strength training and immobilization. *Human muscle power.* 1986;269-88.
- Maclaren DP, Gibson H, Parry-Billings M, Edwards RH.** A review of metabolic and physiological factors in fatigue. *Exerc Sport Sci Rev.* 1989;17:29-66.
- Maffiuletti NA, Bizzini M, Desbrosses K, Babault N, Munzinger U.** Reliability of knee extension and flexion measurements using the Con-Trex isokinetic dynamometer. *Clin Physiol Funct Imaging.* 2007;27(6):346-53.
- Mathai AS, Bonen A, Benton CR, Robinson DL, Graham TE.** Rapid exercise-induced changes in PGC-1alpha mRNA and protein in human skeletal muscle. *J Appl Physiol.* 2008;105(4):1098-105.
- Matveyev L.** Fundamentals of sports training. *Progress publishers.* 1981.
- 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;27(3):429-36.
- McCarthy JP, Pozniak MA, Agre JC.** Neuromuscular adaptations to concurrent strength and endurance training. *Med Sci Sports Exerc.* 2002;34(3):511-9.

- Merton P.** Voluntary strength and fatigue. *J Physiol.* 1954;123(3):553-64.
- Mikkola J, Rusko H, Nummela A, Pollari T, Hakkinen K.** Concurrent endurance and explosive type strength training improves neuromuscular and anaerobic characteristics in young distance runners. *Int J Sports Med.* 2007;28(7):602-11.
- Millet GP, Jaouen B, Borrani F, Candau R.** Effects of concurrent endurance and strength training on running economy and VO₂ kinetics. *Med Sci Sports Exerc.* 2002;34(8):1351-9.
- Morgan TE, Cobb LA, Short FA, Ross R, Gunn DR.** Effects of long-term exercise on human muscle mitochondria. *Muscle Metab Exerc.* 1971;11:87-95.
- Nader GA, Esser KA.** Intracellular signaling specificity in skeletal muscle in response to different modes of exercise. *J Appl Physiol.* 2001;90(5):1936-42.
- Nader GA.** Concurrent strength and endurance training: from molecules to man. *Med Sci Sports Exerc.* 2006;38(11):1965-70.
- Nelson AG, Arnall DA, Loy SF, Silvester LJ, Conlee RK.** Consequences of combining strength and endurance training regimens. *Physical Therapy.* 1990;70(5):287-94.
- Newham DJ, Jones DA, Clarkson PM.** Repeated high-force eccentric exercise: effects on muscle pain and damage. *J Appl Physiol.* 1987;63(4):1381-6.
- Noakes TD.** Why marathon runners collapse. *S Afr Med J.* 1988;73(10):569-71.
- Paavolainen L, Hakkinen K, Hamalainen I, Nummela A, Rusko H.** Explosive-strength training improves 5-km running time by improving running economy and muscle power. *J Appl Physiol.* 1999;86(5):1527-33.
- Paton CD, Hopkin WG.** Combining explosive and high-resistance training improves performance in competitive cyclists. *J Strength Cond Res.* 2005;19(4):826-30.
- Putman CT, Jones NL, Lands LC, Bragg TM, Hollidge-Horvat MG, Heigenhauser GJ.** Skeletal muscle pyruvate dehydrogenase activity during maximal exercise in humans. *Am J Physiol.* 1995;269:458-468.
- Putman CT, XU X, Gillies E, MacLean IM, Bell GJ.** Effects of strength, endurance and combined training on myosin heavy chain content and fibre-type distribution in humans. *Eur J Appl Physiol.* 2004;92:376-84.
- Ratamess N.** ACSM's foundations of strength training and conditioning. 2008
- Rhea MR, Oliverson JR, Marshall G, Peterson MD, Kenn JG, Naclerio Aylo'n F.** Noncompatibility of power and endurance training among college baseball players. *J Strength Cond Res.* 2008;22(1):230-234.
- Roberts SP, Trewartha G, Higgitt RJ, El-Abd J, Stokes KA.** The physical demands of elite English rugby union. *J Sports Sci.* 2008;26(8):825-33.
- Robineau J, Jouaux T, Lacroix M, Babault N.** Neuromuscular fatigue induced by a 90-minute soccer game modeling. *J Strength Cond Res.* 2012;26(2):555-62.
- Rønnestad BR, Hansen EA, Raastad T.** Strength training improves 5-min all-out performance following 185 min of cycling. *Scand J Med Sci Sports.* 2011;21(2):250-9.

- Rønnestad BR, Mujika I.** Optimizing strength training for running and cycling endurance performance: a review. *Scan J Med Sci Sports*. 2013;sous presse.
- Ross LR, Garvican LA, Jeacocke NA, Laursen PB, Abbiss CR, Martin DT, Burke LM.** Novel pre-cooling strategy enhances time trial cycling in the heat. *Med Sci Sports Exerc*. 2011;43(1):123-33.
- Sahlin K, Edstrom L, Sjöholm H.** Fatigue and phosphocreatine depletion during carbon dioxide-induced acidosis in rat muscle. *Am J Physiol*. 1983;245(1):15-20.
- Sale DG.** Influence of exercise and training on motor unit activation. *Exer Sport Sci Reviews*. 1986;15:95-151.
- Sale DG.** Neural adaptation to resistance training. *Med Sci Sports Exerc*. 1988;20(5):135-145.
- Sale D, Jacobs I, MacDougall J, Garner S.** Comparison of two regimens of concurrent strength and endurance training. *Med Sci Sports Exerc*. 1990;22(3):348-56.
- Sale D, MacDougall J, Jacobs I, Garner S.** Interaction between concurrent strength and endurance training. *J Appl Physiol*. 1990;68(1):260-70.
- Saunders PU, Telford RD, Pyne DB, Peltola EM, Cunningham RB, Gore CJ, Hawley JA.** Short-term plyometric training improves running economy in highly trained middle and long distance runners. *J Strength Cond Res*. 2006;20(4):947-54.
- Schneider V, Arnold B, Martin K, Bell D, Crocker P.** Detraining effects in college football players during the competitive season. *J Strength Cond Res*. 1998;12:42-45.
- Silva RF, Cadore EL, Kothe G, Guedes M, Alberton CL, Pinto SS, Pinto RS, Trindade G, Krueel LF.** Concurrent training with different aerobic exercise. *Int J Sports Med*. 2012;33(8):627-34.
- Simoneau JA, Lortie G, Boulay MR, Marcotte M, Thibault MC, Bouchard C.** Human skeletal muscle fiber type alteration with high-intensity intermittent training. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 1985;35(3):182-9.
- Sloth M, Sloth D, Overgaard K, Dalgas U.** Effects of sprint interval training on VO₂max and aerobic exercise performance: a systematic review and meta-analysis. *Scand J Med Sci Sports*. 2013; sous presse.
- Sporer BC, Wenger HA.** Effects of aerobic exercise on strength performance following various periods of recovery. *J Strength Cond Res*. 2003;17(4):638-44.
- Spurrs SW, Murphy AJ, Watsford ML.** The effect of plyometric training on distance running performance. *Eur J Appl Physiol*. 2003;89(1):1-7.
- Staron RS, Karapondo DL, Kraemer WJ, Fry AC, Gordon SE, Falkel JE, Hagerman FC, Hikida RS.** Skeletal muscle adaptations during early phase of heavy-resistance training in men and women. *J Appl Physiol*. 1994;76:1247-55.
- Staron RS.** Human skeletal muscle fiber types: delineation, development, and distribution. *Can J Appl Physiol*. 1997;22(4):307-27.
- Strojnik V, Komi PV.** Neuromuscular fatigue after maximal stretch-shortening cycle exercise. *J Appl Physiol*. 1998;84(1):344-50.

Suarez-Arrones L, Arenas C, Lopez G, Requena B, Terril O, Mendez-Villanueva A. Positional differences in match running performance and physical collisions in men rugby sevens. *Int J Sports Physiol Perform*. 2013. Sous presse.

Tanaka H, Costill DL, Thomas R, Fink WJ, Widrick JJ. Dry-land resistance training for competitive swimming. *Med Sci Sports Exerc*. 1993;25(8):952-9.

Tanaka H, Swensen T. Impact of resistance training on endurance performance. *Sports Med*. 1998;25(3):191-200.

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;102(2):145-52.

Tesch PA, Colliander EB, Kaiser P. Muscle metabolism during intense, heavy-resistance exercise. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 1986;55(4):362-6.

Toussaint HM, Vervoorn K. Effects of specific high resistance training in the water on competitive swimmers. *Int J Sports Med*. 1990;11(3):228-33.

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*. 2011;111(5):1335-44.

Weiner MW, Moussavi RS, Baker AJ, Boska MD, Miller RG. Constant relationship between force, phosphate concentration, and pH in muscles with differential fatigability. *Neurology*. 1990;40(12):1888-93.

West DJ, Cook CJ, Beaven M, Kilduff LP. The influence of the time of day on core temperature and lower body power output in elite rugby union sevens players. *J Strength Cond Res*. 2013; sous presse.

Westerblad H, Allen DG, Bruton JD, Andrade FH, Lannergren J. Mechanisms underlying the reduction of isometric force in skeletal muscle fatigue. *Acta Physiol Scand*. 1998;162(3):253-60.

Wilkie DR. Muscular fatigue: effects of hydrogen ions and inorganic phosphate. *Fed Proc*. 1986;45(13):2921-3.

Wilson JM, Marin PJ, Rhea MR, Wilson SMC, Loenneke JP, Anderson JC. Concurrent training: a meta-analysis examining interference of aerobic and resistance exercises. *J Strength Cond Res*. 2012;26(8):2293-2307.

Winder WW. Energy-sensing and signaling by AMP-activated protein kinase in skeletal muscle. *J Appl Physiol*. 2001;91(3):1017-28.

Woledge RC. Possible effects of fatigue on muscle efficiency. *Acta Physiol Scand*. 1998;162(3):267-73.

Yamamoto LM, Lopez RM, Klau JF, Casa DJ, Kraemer WJ, Maresh CM. The effects of resistance training on endurance distance running performance among highly trained runners: a systematic review. *J strength Cond Res*. 2008;22:2036-2044.

Yamamoto LM, Klau JF, Casa DJ, Kraemer WJ, Armstrong LE, Maresh CM. The effects of resistance training on road cycling performance among highly trained cyclists: a systematic review. *J strength Cond Res*. 2010;24(2):560-6.

Bibliographie

Young K, Davies CT. Effect of diet on human muscle weakness following prolonged exercise. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1984;53(1):81-5.

Zatsiorsky VM. Intensity of Strength Training Facts and Theory: Russian and Eastern European Approach. *Nat Strength Conditioning Ass J.* 1992;14(5):46-57.

Zoll J, Koulman N, Bahi L, Ventura-Clapier R, Bigard AX. Quantitative and qualitative adaptation of skeletal muscle mitochondria to increased physical activity. *J Cell Physiol.* 2003;194(2):186-93.

ANNEXES

« Le travail de force est essentiel à la préparation physique. A mon avis, travailler avec de lourdes charges et basculer sur de l'explosivité, apporte un résultat très probant pour notre discipline. Je ne me sens pas capable d'obtenir de la vitesse ou de l'explosivité sans avoir engrangé de la force. L'endurance est également une forme de travail inévitable pour notre sport puisqu'il est important d'habituer l'organisme à des efforts tenus sur la durée. Il est difficile d'analyser la capacité à combiner une séance de force à une séance d'endurance, mais la certitude est que ces deux éléments sont primordiaux à notre préparation physique et à la forme d'efforts nécessaire au rugby à 7 »

Julien Candelon, joueur de rugby professionnel au sein de l'équipe de France à 7.

« Le rugby est un sport d'affrontement, nécessitant aux joueurs qui le pratiquent de développer des niveaux de force élevés. Cependant, l'évolution actuelle du rugby tend vers une augmentation du temps de jeu effectif des matchs et par conséquent, une augmentation des déplacements de joueurs, leur imposant de développer leurs qualités aérobies. La question des entraînements combinés prend alors tout son sens dans la préparation physique du joueur de rugby moderne. Connaissant les interférences que peuvent générer l'entraînement de ces qualités sur leur développement conjoint, la problématique, complexe, du préparateur physique devra être de choisir les priorités à donner à l'entraînement de ces qualités, en fonction des caractéristiques du joueur et de la saison ! »

Mathieu Lacome, préparateur physique du Pôle France et de l'équipe de France des M20.

*« We knew we could run in the mud because of
our strength training »*

One coach



Milon de Crotone est l'un des plus célèbres athlètes de la Grèce antique.

Il était capable de traverser l'Italie en courant et de porter un taureau sur ses épaules.

Gestion des interférences liées au développement des qualités énergétiques et neuromusculaires

Julien Robineau – Fédération Française de Rugby

ABSTRACT

La préparation physique du joueur de rugby requière le développement simultané des qualités de force et d'endurance (Duthie et coll., 2003) et nécessite alors la combinaison d'efforts antagonistes pouvant induire un « conflit physiologique » au sein de l'organisme. Hickson (1980) fut le premier chercheur à mettre en évidence que la combinaison des qualités de force et d'endurance, au sein d'une même programmation, semble interférer sur le développement des qualités neuromusculaires. Cette interférence semblerait intervenir préférentiellement sur la production de force à vitesse rapide, la puissance et l'explosivité et concernerait essentiellement les groupes musculaires mobilisés au cours des deux formes d'entraînements. Plusieurs hypothèses, telles que la fatigue et les adaptations physiologiques contradictoires, ont été mises en avant pour expliquer ce phénomène. A l'inverse, l'entraînement de musculation ne semble pas présenter d'effets négatifs sur les adaptations oxydatives. Plusieurs variables, liées à la programmation de l'entraînement, influenceraient l'interférence sur le développement de la force. L'objectif général de ce travail de recherche sera alors d'étudier les effets de différentes configurations d'entraînement permettant de limiter l'intervention du phénomène interférentiel. Dans une première étude, nous avons mis en évidence une fatigue aigue induite par différents types d'entraînements d'endurance de haute intensité pouvant aller jusqu'à 24h. Ces résultats mettaient alors en avant la pertinence de placer les séances qualitatives de force avant celles d'endurance au sein d'une programmation combinée. Dans une deuxième étude, nous avons proposé de vérifier l'effet du temps de récupération entre les séances de force et d'endurance sur les adaptations neuromusculaires et oxydatives. Il s'avérerait alors qu'une durée de récupération de 24h soit plus efficace sur les gains de force et de VO_{2pic} qu'une durée intermédiaire de 6h. Enfin, dans une troisième étude, nous nous sommes centrés sur les effets du type d'entraînement aérobique de haute intensité sur les adaptations physiologiques. L'entraînement de répétition de sprints longs perturberait davantage les gains de force à l'issue d'une période combinée caractérisée pourtant par 24h de récupération entre les séances. Ce type d'entraînement induirait en revanche des gains plus importants de VO_{2pic} et de la performance moyenne au cours d'un test de sprints répétés qu'un entraînement intermittent court.

MOTS CLES

Force – Endurance – Interférence – Fatigue – Voies de signalisation moléculaires



Managing strength and aerobic training-induced interference

Julien Robineau – French rugby union federation

ABSTRACT

Physical training of rugby players requires simultaneous development of strength and endurance qualities (Duthie et al., 2003) and therefore the combination of antagonistic exercises inducing a "physiological conflict". Hickson (1980) was the first to demonstrate that the combination of strength and endurance qualities within a same program seems to reduce the development of neuromuscular qualities. This interference would impair preferentially maximal strength production at fast velocity, maximal power and explosivity and would concern mainly muscle groups solicited during the two forms of training (strength and aerobic). Several hypotheses, such as fatigue and conflicting physiological adaptations have been put forward to explain the interference. Conversely, strength training does not appear to have negative effects on oxidative adaptations. Many variables related to schedule of training, would influence the impairment of strength quality development. The main aim of this research was to measure the effects of different configurations of training in order to limit the interference on neuromuscular adaptations. In a first study, we emphasized an acute fatigue up to 24 hours induced by different types of high-intensity interval training. These results showed the relevance to program strength before endurance sessions during a concurrent training program. Then, in a second study, we proposed to measure the effect of recovery delay between strength and aerobic sessions on neuromuscular and oxidative adaptations. We observed a 24h recovery period was more effective than lower duration of 6h on strength gains and VO₂peak. Last, in a third study, we focused on the effects of the type of high-intensity interval training. Sprint interval training would more impair strength gains after a concurrent training period, despite 24h recovery delay between sessions. However, this type of training would induce greater gains of VO₂peak and consequently of repeated sprint ability than short intermittent training.

KEY WORDS

Strength – Aerobic – Fatigue – Molecular signaling pathways

