



La fatigue neuromusculaire secondaire à l'ultra-trail : comparaison de deux formats de course de même distance

Matthieu Maréchal, Franck Bouquet

► To cite this version:

Matthieu Maréchal, Franck Bouquet. La fatigue neuromusculaire secondaire à l'ultra-trail : comparaison de deux formats de course de même distance. Médecine humaine et pathologie. 2020. dumas-02572425

HAL Id: dumas-02572425

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02572425>

Submitted on 13 May 2020

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.

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il n'a pas été réévalué depuis la date de soutenance.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact au SID de Grenoble :
bump-theses@univ-grenoble-alpes.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

<http://www.cfcopies.com/juridique/droit-auteur>

Année : 2020

**LA FATIGUE NEUROMUSCULAIRE SECONDAIRE A L'ULTRA-TRAIL :
COMPARAISON DE DEUX FORMATS DE COURSE DE MÊME DISTANCE**

THÈSE
PRÉSENTÉE POUR L'OBTENTION DU TITRE DE DOCTEUR EN MÉDECINE
DIPLOME D'ÉTAT

Matthieu MARECHAL

Franck BOUQUET

[Données à caractère personnel]

THÈSE SOUTENUE PUBLIQUEMENT À LA FACULTÉ DE MÉDECINE DE GRENOBLE

Le : 11/03/2020

DEVANT LE JURY COMPOSÉ DE

Président du jury :

Monsieur le Professeur Pierre BOUZAT

Membres :

Monsieur le Docteur Stéphane DOUTRELEAU (directeur de thèse)

Monsieur le Docteur Samuel VERGES

Monsieur le Professeur Athan BAILLET

L'UFR de Médecine de Grenoble n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans les thèses ; ces opinions sont considérées comme propres à leurs auteurs.

Doyen de la Faculté : **Pr. Patrice MORAND**

Année 2019-2020

ENSEIGNANTS DE L'UFR DE MEDECINE

CORPS	NOM-PRENOM	Discipline universitaire
PU-PH	ALBALADEJO Pierre	Anesthésiologie-réanimation et médecine péri-opératoire
PU-PH	APTEL Florent	Ophthalmologie
PU-PH	ARVIEUX-BARTHELEMY Catherine	Chirurgie viscérale et digestive
PU-PH	BAILLET Athan	Rhumatologie
PU-PH	BARONE-ROCHETTE Gilles	Cardiologie
PU-PH	BAYAT Sam	Physiologie
MCF Ass.MG	BENDAMENE Farouk	Médecine Générale
PU-PH	BENHAMOU Pierre Yves	Endocrinologie, diabète et maladies métaboliques
PU-PH	BERGER François	Biologie cellulaire
MCU-PH	BIDART-COUTTON Marie	Biologie cellulaire
PU-PH	BLAISE Sophie	Chirurgie vasculaire ; médecine vasculaire
MCU-PH	BOISSET Sandrine	Bactériologie-virologie
PU-PH	BOLLA Michel	Cancérologie-Radiothérapie
PU-PH	BONAZ Bruno	Gastroentérologie, hépatologie, addictologie
PU-PH	BONNETERRE Vincent	Médecine et santé au travail
PU-PH	BOREL Anne-Laure	Nutrition
PU-PH	BOSSON Jean-Luc	Biostatistiques, informatique médicale et technologies de communication
MCU-PH	BOTTARI Serge	Biologie cellulaire
PR Ass.MG	BOUCHAUD Jacques	Médecine Générale
PU-PH	BOUGEROL Thierry	Psychiatrie d'adultes
PU-PH	BOUILLET Laurence	Médecine interne
MCU-PH	BOUSSAT Bastien	Epidémiologie, économie de la santé et prévention
PU-PH	BOUZAT Pierre	Anesthésiologie-réanimation et médecine péri-opératoire
PU-PH	BRAMBILLA Christian	Pneumologie
PU-PH	BRAMBILLA Elisabeth	Anatomie et cytologie pathologiques
MCU-PH	BRENIER-PINCHART Marie Pierre	Parasitologie et mycologie
PU-PH	BRICAULT Ivan	Radiologie et imagerie médicale
PU-PH	BRICHON Pierre-Yves	Chirurgie thoracique et cardiovasculaire
MCU-PH	BRIOT Raphaël	Thérapeutique-médecine de la douleur
MCU-PH	BROUILLET Sophie	Biologie et médecine du développement et de la reproduction
PU-PH	CAHN Jean-Yves	Hématologie
PU-PH	CARPENTIER Patrick	Chirurgie vasculaire, médecine vasculaire
PR Ass.MG	CARRILLO Yannick	Médecine Générale
PU-PH	CESBRON Jean-Yves	Immunologie
PU-PH	CHABARDES Stephan	Neurochirurgie
PU-PH	CHABRE Olivier	Endocrinologie, diabète et maladies métaboliques
PU-PH	CHAFFANJON Philippe	Anatomie

CORPS	NOM-PRENOM	Discipline universitaire
PU-PH	CHARLES Julie	Dermato-vénéréologie
MCF Ass.MG	CHAUVET Marion	Médecine Générale
PU-PH	CHAVANON Olivier	Chirurgie thoracique et cardio- vasculaire
PU-PH	CHIQUET Christophe	Ophthalmologie
PU-PH	CHIRICA Mircea	Chirurgie viscérale et digestive
PU-PH	CINQUIN Philippe	Biostatistiques, informatique médicale et technologies de communication
MCU-PH	CLAVARINO Giovanna	Immunologie
PU-PH	COHEN Olivier	Histologie, embryologie et cytogénétique
PU-PH	COURVOISIER Aurélien	Chirurgie infantile
PU-PH	COUTTON Charles	Génétique
PU-PH	COUTURIER Pascal	Gériatrie et biologie du vieillissement
PU-PH	CRACOWSKI Jean-Luc	Pharmacologie fondamentale, pharmacologie clinique
PU-PH	CURE Hervé	Cancérologie
PU-PH	DEBATY Guillaume	Médecine d'Urgence
PU-PH	DEBILLON Thierry	Pédiatrie
PU-PH	DECAENS Thomas	Gastro-entérologie, Hépatologie
PU-PH	DEMATTEIS Maurice	Addictologie
PU-PH	DEMONGEOT Jacques	Biostatistiques, informatique médicale et technologies de communication
MCU-PH	DERANSART Colin	Physiologie
PU-PH	DESCOTES Jean-Luc	Urologie
PU-PH	DETANTE Olivier	Neurologie
MCU-PH	DIETERICH Klaus	Génétique
MCU-PH	DOUTRELEAU Stéphane	Physiologie
MCU-PH	DUMESTRE-PERARD Chantal	Immunologie
PU-PH	EPAULARD Olivier	Maladies infectieuses ; Maladies tropicales
PU-PH	ESTEVE François	Biophysique et médecine nucléaire
MCU-PH	EYSSERIC Hélène	Médecine légale et droit de la santé
PU-PH	FAUCHERON Jean-Luc	Chirurgie viscérale et digestive
MCU-PH	FAURE Julien	Biochimie et biologie moléculaire
PU-PH	FERRETTI Gilbert	Radiologie et imagerie médicale
PU-PH	FEUERSTEIN Claude	Physiologie
PU-PH	FONTAINE Éric	Nutrition
PU-PH	FRANCOIS Patrice	Epidémiologie, économie de la santé et prévention
MCU-MG	GABOREAU Yoann	Médecine Générale
PU-PH	GARBAN Frédéric	Hématologie ; Transfusion
PU-PH	GAUDIN Philippe	Rhumatologie
PU-PH	GAVAZZI Gaëtan	Gériatrie et biologie du vieillissement
PU-PH	GAY Emmanuel	Neurochirurgie
MCU-PH	GILLOIS Pierre	Biostatistiques, informatique médicale et technologies de communication
PU-PH	GIOT Jean-Philippe	Chirurgie plastique, reconstructrice et esthétique
MCU-PH	GRAND Sylvie	Radiologie et imagerie médicale
PU-PH	GRIFFET Jacques	Chirurgie infantile
MCU-PH	GUZUN Rita	Nutrition
PU-PH	HAINAUT Pierre	Biochimie et biologie moléculaire
PU-PH	HALIMI Serge	Nutrition
PU-PH	HENNEBICQ Sylviane	Biologie et médecine du développement et de la reproduction
PU-PH	HOFFMANN Pascale	Gynécologie-obstétrique

CORPS	NOM-PRENOM	Discipline universitaire
PU-PH	HOMMEL Marc	Neurologie
PU-MG	IMBERT Patrick	Médecine Générale
PU-PH	JOUK Pierre-Simon	Génétique
PU-PH	KAHANE Philippe	Physiologie
MCU-PH	KASTLER Adrian	Radiologie et imagerie médicale
PU-PH	KRAINIK Alexandre	Radiologie et imagerie médicale
PU-PH	LABARERE José	Epidémiologie, économie de la santé et prévention
MCU-PH	LABLANCHE Sandrine	Endocrinologie, diabète et maladies métaboliques
MCU-PH	LANDELLE Caroline	Bactériologie – virologie ; Hygiène hospitalière
PU-PH	LANTUEJOUL Sylvie	Anatomie et cytologie pathologiques
MCU-PH	LARDY Bernard	Biochimie et biologie moléculaire
MCU - PH	LE GOUELLEC Audrey	Biochimie et biologie moléculaire
PU-PH	LECCIA Marie-Thérèse	Dermato-vénéréologie
MCF Ass.MG	LEDoux Jean-Nicolas	Médecine Générale
PU-PH	LEROY Vincent	Gastroentérologie ; hépatologie ; addictologie
PU-PH	LETOUBLON Christian	Chirurgie viscérale et digestive
PU-PH	LEVY Patrick	Physiologie
PU-PH	LONG Jean-Alexandre	Urologie
MCU-PH	LUPO Julien	Bactériologie-virologie
PU-PH	MAGNE Jean-Luc	Chirurgie vasculaire ; Médecine vasculaire
MCU-PH	MAIGNAN Maxime	Médecine d'urgence
PU-PH	MAITRE Anne	Médecine et santé au travail
MCU-PH	MALLARET Marie-Reine	Hygiène hospitalière
PU-PH	MALLION Jean-Michel	Cardiologie
MCU-PH	MARLU Raphaël	Hématologie ; Transfusion
MCU-PH	MAUBON Danièle	Parasitologie et mycologie
PU-PH	MAURIN Max	Bactériologie-virologie
MCU-PH	MC LEER Anne	Histologie, embryologie et cytogénétique
MCU-PH	MONDET Julie	Histologie, embryologie et cytogénétique
PU-PH	MORAND Patrice	Bactériologie-virologie
PU-PH	MOREAU-GAUDRY Alexandre	Biostatistiques, informatique médicale et technologies de communication
PU-PH	MORO Elena	Neurologie
PU-PH	MORO-SIBILOT Denis	Pneumologie
MCU-PH	MORTAMET Guillaume	Pédiatrie
PU-PH	MOUSSEAU Mireille	Cancérologie
PU-PH	MOUTET François	Chirurgie plastique, reconstructrice et esthétique ; brûlologie
MCF Ass.MG	ODDOU Christel	Médecine Générale
MCU-PH	PACLET Marie-Hélène	Biochimie et biologie moléculaire
PU-PH	PAILHE Régis	Chirurgie orthopédique et traumatologie
PU-PH	PALOMBI Olivier	Anatomie
PU-PH	PARK Sophie	Hématologie ; Transfusion
PU-PH	PASSAGGIA Jean-Guy	Anatomie
PR Ass.MG	PAUMIER-DESBRIERES Françoise	Médecine Générale
PU-PH	PAYEN DE LA GARANDERIE Jean-François	Anesthésiologie-réanimation et médecine péri-opératoire
MCU-PH	PAYSANT François	Médecine légale et droit de la santé
MCU-PH	PELLETIER Laurent	Biologie cellulaire
PU-PH	PELLOUX Hervé	Parasitologie et mycologie

CORPS	NOM-PRENOM	Discipline universitaire
PU-PH	PEPIN Jean-Louis	Physiologie
PU-PH	PERENNOU Dominique	Médecine physique et de réadaptation
PU-PH	PERNOD Gilles	Médecine vasculaire
PU-PH	PIOLAT Christian	Chirurgie infantile
PU-PH	PISON Christophe	Pneumologie
PU-PH	PLANTAZ Dominique	Pédiatrie
PU-PH	POIGNARD Pascal	Bactériologie-virologie
PU-PH	POLACK Benoît	Hématologie
PU-PH	POLOSAN Mircea	Psychiatrie d'adultes
PU-PH	RAMBEAUD Jean-Jacques	Urologie
PU-PH	RAY Pierre	Biologie et médecine du développement et de la reproduction
MCU-PH	RENDU John	Biochimie et biologie moléculaire
MCU-PH	RIALLE Vincent	Biostatistiques, informatique médicale et technologies de communication
PU-PH	RIETHMULLER Didier	Gynécologie-obstétrique ; gynécologie médicale
PU-PH	RIGHINI Christian	Oto-rhino-laryngologie
PU-PH	ROMANET Jean Paul	Ophthalmologie
PU-PH	ROSTAING Lionel	Néphrologie
MCU-PH	ROUSTIT Matthieu	Pharmacologie fondamentale ; pharmacologie clinique ; addictologie
MCU-PH	ROUX-BUISSON Nathalie	Biochimie et biologie moléculaire
MCF Ass.MG	ROYER DE VERICOURT Guillaume	Médecine Générale
MCU-PH	RUBIO Amandine	Pédiatrie
PU-PH	SARAGAGLIA Dominique	Chirurgie orthopédique et traumatologie
MCU-PH	SATRE Véronique	Génétique
PU-PH	SAUDOU Frédéric	Biologie cellulaire
PU-PH	SCHMERBER Sébastien	Oto-rhino-laryngologie
PU-PH	SCHWEBEL Carole	Médecine intensive-réanimation
PU-PH	SCOLAN Virginie	Médecine légale et droit de la santé
MCU-PH	SEIGNEURIN Arnaud	Epidémiologie, économie de la santé et prévention
PU-PH	STAHL Jean-Paul	Maladies infectieuses ; Maladies tropicales
PU-PH	STANKE Françoise	Pharmacologie fondamentale
MCU-PH	STASIA Marie-José	Biochimie et biologie moléculaire
PU-PH	STURM Nathalie	Anatomie et cytologie pathologiques
PU-PH	TAMISIER Renaud	Physiologie
PU-PH	TERZI Nicolas	Médecine intensive-réanimation
MCU-PH	TOFFART Anne-Claire	Pneumologie
PU-PH	TONETTI Jérôme	Chirurgie orthopédique et traumatologie
PU-PH	TOUSSAINT Bertrand	Biochimie et biologie moléculaire
PU-PH	VANZETTO Gérald	Cardiologie
PU-PH	VUILLEZ Jean-Philippe	Biophysique et médecine nucléaire
PU-PH	WEIL Georges	Epidémiologie, économie de la santé et prévention
PU-PH	ZAOUTI Philippe	Néphrologie
PU-PH	ZARSKI Jean-Pierre	Gastroentérologie ; hépatologie ; addictologie

PU-PH : Professeur des Universités - Praticiens Hospitaliers
MCU-PH : Maître de Conférences des Universités - Praticiens Hospitaliers
PU-MG : Professeur des Universités de Médecine Générale
MCU-MG : Maître de Conférences des Universités de Médecine Générale
PR Ass.MG : Professeur des Universités Associé de Médecine Générale
MCF Ass.MG : Maître de Conférences Associé de Médecine Générale

REMERCIEMENTS MATTHIEU

A,

Monsieur le Professeur Pierre BOUZAT,

C'est un honneur de vous avoir à la présidence de notre jury de thèse. Soyez assuré de mon respect et de ma gratitude.

Monsieur le Docteur Stéphane DOUTRELEAU,

Pour avoir accepté de diriger ce travail, ton investissement et tes conseils. Merci pour ta disponibilité et ta patience. J'ai un immense respect du médecin que tu es.

Monsieur le Docteur Samuel VERGES,

Pour nous avoir permis de partager cette belle expérience au sein de ton laboratoire, de nous avoir fait confiance tout au long de l'étude. Nous avons pu apprendre beaucoup de choses à tes côtés, et notamment cette démarche scientifique.

Monsieur le Professeur Athan BAILLET,

Pour avoir accepté d'être membre de ce jury et examinateur de notre travail. Je vous exprime ma plus grande reconnaissance.

A Franck mon co-thésard, sans toi cette thèse n'aurait pas eu la même tournure, elle aurait été trop monotone. Ca n'a pas toujours été facile, mais l'important c'est le résultat. Ta connerie te dépasse et c'est pour ça que tu existes.

Les coureurs ont tous apprécié notre motivation et les encouragements qu'on a pu leur donner tout au long de l'étude (« Allez pousse, pousse, pousse »).

Je n'ai aucun doute que tu seras un bon médecin et à l'écoute de tes patients.

Aux coureurs, pour leur volontariat, sans qui l'étude n'aurait pas été possible, et qui ont tous joué le « jeu » jusqu'au bout. Certains nous ont bien fait rire, et je m'excuse encore d'avoir eu ce rôle de bourreau...

Mes parents,

Pour votre amour et votre soutien précieux tout au long de ces années interminables. Merci Maman pour toutes tes attentions, tu as su me « r'quinquer » dans les moments de faiblesse. Merci de m'avoir transmis ton grand passé de sportive que je mets à profit dans ces montagnes.

Merci Papa de m'avoir poussé jusque là, à donner le meilleur de moi-même, ton autorité à certainement beaucoup aider.

Merci d'avoir fait de moi votre priorité.

A toute ma famille : grands-parents, oncles et tantes, cousins et cousines. Vous êtes trop pour tous vous citer.

Au Nord,

Ch'berquaille, cette fabuleuse région de France qui m'a bercée, m'a appris le savoir-vivre et la générosité (et aussi le lever de coude).

Mes amis d'enfance, toudi à faire eul' mariolle (Pipo, Vico, Félix, Paco, Tim...)

Mes amis du lycée toujours présents (Juju, Coco, Yonyon, Stan, Quent, Ben...)

Mes amis de médecine qui m'ont accompagné pendant ces différentes années, la team BBC.

A Const, ce gars en or. Malgré la distance, tu sais te rendre disponible n'importe quand, merci d'avoir fait le trajet avec Rinema et p'tit père Emile !

A Bao, toi qui te bats contre cette maladie depuis déjà plusieurs années, ta force mentale est inégalable, le nombre de fois où je pense à toi pour me redonner du courage est incalculable. Ton oreille absolue, tes qualités musicales et artistiques sont uniques. Le Jazz et le conservatoire Bruxellois n'existeraient pas sans toi !

A tous mes co-internes,

A PJ, Petit-Jean, souviens-toi la première fois qu'on s'est vu à St-François, la tronche qu'on tirait... c'était un mal pour un bien.

A Hélène (ch'ti un jour, ch'ti toujours), quand on t'a vu arriver, on ne se sentait pas si mal loti.

A Greg, j'adore quand tu passes l'aspirateur à 3h du mat' en pré-garde sur mon paillason, tous ces petits contre la monte sur la route, ces concerts.

A Ben, nos petites virées à 3 avec Greg, votre hospitalité Annécienne.

A Ondine, ma confidente, ta bonne humeur toujours au rendez-vous.

A Hugues, ô grand philosophe et sage paillachu que tu es.

A tous mes co-internes Héloïse, Caro, Loïc la machine, Aurèle, Ayoub, Bérangère, Coco l'incrute, Nel, Nico, Schach, Chatoune, Lisa et bien d'autres

A tous ceux que j'ai côtoyés pendant mes stages,

La pneumo de Chambé : Philou et nos visites aussi hilarantes l'une que l'autre, Marie pour m'avoir fait découvrir ta passion pour l'échographie, Eric et Pauline.

Le service des Urgences de Grenoble : pour votre accueil, votre formation, la bonne humeur qui y régnait.

Jean-Pierre, Claire, Cécile et Marie pour m'avoir fait découvrir et aimer la médecine ambulatoire.

La maison médicale des Carroz/Flaine.

Le service de Rhumato d'Annecy.

« L'intelligence, c'est pas sorcier, il suffit de penser à une
connerie et de dire l'inverse »

Coluche

REMERCIEMENTS FRANCK

À Monsieur le Docteur Stéphane Doutreleau notre directeur de thèse, Maitre de Conférence au CHU de Grenoble,

Un grand merci pour ce projet que tu nous as proposé avec Samuel en janvier 2018. Un sujet passionnant et qui correspond à ma passion pour le trail. Tu as su nous donner la motivation dans les moments difficiles et tu as toujours eu confiance en nous. Tu as été d'une grande rapidité dans tes réponses et d'une disponibilité sans faille. Merci d'avoir partagé cette épreuve avec nous et nous t'en sommes reconnaissants.

À Monsieur le Docteur Samuel Vergès, responsable de l'équipe de recherche *INSERM* et du laboratoire HP2 à Grenoble,

Avec Stéphane, tu nous as proposé de participer à ce projet unique. Cette thèse est le fruit d'une collaboration de presque deux ans avec toi. C'est à tes côtés que nous avons compris ce que rigueur et précision voulaient dire.

À Monsieur Pierre Bouzat, Professeur en *Anesthésiologie-Réanimation* au CHU de Grenoble,

Nous vous sommes reconnaissants de l'honneur que vous nous faites de présider notre jury de thèse. Veuillez recevoir le témoignage de notre respectueuse considération.

À Monsieur Athan Baillet, Professeur en *Rhumatologie* au CHU de Grenoble,

Nous vous sommes reconnaissants d'avoir accepté d'être examinateur et membre de notre jury. Soyez assuré de notre gratitude et de notre profond respect.

À Matthieu mon co-thésard dit « Marechide Forex », un druide et un chercheur hors norme. Merci pour ta rigueur et tes encouragements prodigués aux coureurs, le cœur plein de passion pendant les séances de neurostimulation. Toujours A FOND A FOND A FOND... N'oublies jamais tes racines du Nord tio père, n'oublies jamais tes racines de Frelinghien-les-Bains quand tu manges une frite.

Je tiens à remercier l'ensemble des coureurs volontaires du protocole « Recherche UT4M 2018 » qui ont accepté de participer avec enthousiasme à cette formidable étude. Je tiens aussi à exprimer toute ma gratitude auprès de Léa et de Thibault membres de l'équipe de recherche du laboratoire HP2 de l'université Grenoble Alpes qui nous ont apporté une aide précieuse dans le recueil et le traitement des données de notre thèse.

À ma famille :

- À papa, ton absence est toujours pesante dans ces moments difficiles. Tu as manqué à quelques jours ma première thèse mais tu as quand même su trouver les mots à l'époque pour m'encourager à reprendre mes études de médecine,
- À maman qui m'a toujours soutenu, rassuré, et surtout écouté dans les moments les plus délicats. Je te remercie d'avoir fait le déplacement depuis Dunkerque avec tatie Brigitte,
- À Emilie et Julie, mes sœurs qui m'ont toujours soutenu dans mon projet,
- À Edouard, mon frère, le génie créatif de la famille,
- À mes deux beaux-frères : Maxence, Romain et ma belle-sœur Camille avec qui les repas en famille sont toujours agréables,
- À ma grand-mère, mamie Denise qui m'a toujours encouragé depuis le début,
- À mon cousin Clément pour les nombreux repas partagés avec Elodie lors de mon arrivée dans la région. A nos séances de stand-up face à la caméra, tu as été présent dans des moments difficiles,
- À ma tante Brigitte, qui a fait le déplacement en ce jour très spécial pour moi.

À mes amis :

- À Romain, un soutien sans faille de toi et de Tu-Anh. Une amitié qui n'est pas prête de s'arrêter. Tu n'as pas pu faire le déplacement en ce milieu de semaine car trop occupé à gérer l'épidémie du coronavirus à Lille,
- À Ien Ien, ce compère de voyage en Chine dans les hôpitaux de Wuhan. Nous avons découvert ensemble les vertus de la médecine traditionnelle chinoise.

- À Eric, ce sombre cavalier au flegme particulier. Une amitié qui a commencé il y a 15 ans dans les séances de travaux pratiques par la lourdeur des protocoles de chimie organique,
- À Mathieu, merci de ton écoute,
- À Gaby, tu es toujours présente quand je remonte sur Lille. Tu es même un soutien depuis mon départ sur Grenoble,
- À Baptiste, ce bon vieux Claude Franchois, une amitié longue depuis la maternelle,
- À Hugues, ce poète disparu du Nord, un paillachu hors norme, un phrasé unique. Nos sorties en REQ sont toujours exceptionnelles, vivement la prochaine,
- À Solène, merci pour les sorties en trail avec qui les dénivelés ne sont pas un problème. Toujours la frontale chargée au taquet, car on ne sait jamais, on peut se perdre au détour d'un bosquet,
- À mes co-internes rencontrés au fil de mon internat.

À mes responsables de stage :

- Aux docteurs Pierre et Claire Ortega, un couple de médecin passionné avec une grande écoute,
- Au docteur Christian Isoré, un maître de stage exceptionnel,
- Au docteur Alain Ballochi, pour son calme et sa patience,
- Au docteur Gérard Esturillo, pour son humanisme,
- Au service de maladie infectieuse du CH de Chambéry, une équipe médicale et paramédicale formidable.

SOMMAIRE

SOMMAIRE DES FIGURES ET DES TABLEAUX.....	14
ABREVIATIONS.....	16
RESUME.....	17
ABSTRACT	18
I. INTRODUCTION.....	19
II. ETATS DES CONNAISSANCES	21
1) Définition de la fatigue.....	21
2) Quantification de la fatigue	23
a. Fatigue centrale	23
b. Fatigue périphérique	25
3) La fatigue neuromusculaire en Ultra-Trail.....	26
4) Fatigue neuromusculaire et blessure	27
III. MATERIELS & METHODES	29
1) Population	29
2) Design expérimental.....	30
3) Variables mesurées et méthodes de mesure	32
a. Exploration de la force musculaire volontaire maximale	32
i. Procédure.....	32
ii. Stimulations électriques	33
b. Quantification de la fatigue centrale et périphérique	33
c. VO2max.....	34
d. Données anthropométriques.....	34
e. Douleurs et fatigue subjective.....	34
4) Critères de jugement	35
a. Principal	35
b. Secondaires	35
5) Analyses statistiques	35

IV.	RESULTATS.....	36
1)	Caractéristiques des sujets.....	36
2)	Performances sur les deux courses.....	37
3)	Fatigue musculaire à l'arrivée	38
a.	Perception subjective	38
b.	Fatigue globale (Contraction volontaire maximale)	38
c.	Fatigue centrale (Activation volontaire)	39
d.	Fatigue périphérique (Secousse musculaire simple).....	39
4)	Cinétique de récupération musculaire	40
a.	Perception subjective	40
b.	Fatigue globale (Contraction volontaire maximale)	41
c.	Fatigue centrale (Activation volontaire)	42
d.	Fatigue périphérique (Secousse musculaire simple).....	43
5)	Anthropométrie	44
a.	Poids.....	44
b.	Masse grasse	44
6)	Douleurs musculaires	46
a.	Mollets	46
b.	Quadriceps	47
V.	DISCUSSION.....	48
1)	Fatigue.....	48
a.	Globale.....	48
b.	Centrale	48
c.	Périphérique	50
d.	Prévention et blessure	51
2)	Cinétique de récupération	51
3)	Anthropométrie	54
a.	Poids.....	54
b.	Masse grasse	55
4)	Forces et limites de l'étude	56
VI.	CONCLUSION	57
VII.	BIBLIOGRAPHIE.....	59

SOMMAIRE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure 1. La fatigue neuromusculaire	21
Figure 2. Les différentes composantes de la fatigue neuromusculaire.....	22
Figure 3. Les processus pouvant contribuer aux phénomènes de fatigue neuromusculaire	23
Figure 4. Quantification de la fatigue neuromusculaire	24
Figure 5. Evolution de la force et du potentiel d'action associés à une stimulation surimposée lors de contractions volontaires d'intensité croissante	25
Figure 6. Caractéristiques de la secousse musculaire évoquée par stimulation simple du nerf moteur.....	26
Figure 7. Schéma du déroulement de l'étude	31
Figure 8. Profil de course et chronologie des visites sur l'UT4M 160 km	32
Figure 9. Profil de course et chronologie des visites sur l'UT4M 4x40 km	32
Figure 10. Description d'une session de test.....	34
Figure 11. Flow Chart de l'étude.....	37
Figure 12. Evolution de l'échelle EVA, témoin de fatigue générale des 2 groupes en fonction du temps	40
Figure 13. Comparaison de la cinétique de récupération de la MVC entre les 2 courses en fonction du temps et du groupe musculaire	41
Figure 14. Comparaison de la cinétique de récupération de la VA entre les 2 courses en fonction du temps et du groupe musculaire	42
Figure 15. Comparaison de la cinétique de récupération des Pt entre les 2 courses en fonction du temps et du groupe musculaire.....	43
Figure 16. Evolution du poids des 2 groupes en fonction du temps	44
Figure 17. Evolution de la variation du pourcentage de masse grasse des 2 groupes en fonction du temps.....	45
Figure 18. Evolution des sensations de douleur des mollets des 2 groupes en fonction du temps	46

Figure 19. Evolution des sensations de douleur des cuisses des 2 groupes en fonction du temps	47
Tableau 1. Caractéristiques des sujets	36
Tableau 2. Performances finales de course	37
Tableau 3. Moyennes des sensations de fatigue générale évaluées par EVA (en pré et post-course immédiat) et rapports des moyennes	38
Tableau 4. Moyennes des MVC pour chaque groupe musculaire (en pré et post-course immédiat) avec pourcentage par rapport aux valeurs de base et comparaison des moyennes entre les 2 courses	38
Tableau 5. Moyennes des VA pour chaque groupe musculaire (en pré et post-course immédiat) avec pourcentage par rapport aux valeurs de base et comparaison des moyennes entre les 2 courses	39
Tableau 6. Moyennes des Pt pour chaque groupe musculaire (en pré et post-course immédiat) avec pourcentage par rapport aux valeurs de base et comparaison des moyennes entre les 2 courses.....	40
Tableau 7. Moyennes des MVC de récupération pour chaque groupe musculaire en pourcentage par rapport aux valeurs de base et comparaison des moyennes entre les 2 courses aux différents temps	41
Tableau 8. Moyennes des VA de récupération pour chaque groupe musculaire en pourcentage par rapport aux valeurs de base et comparaison des moyennes entre les 2 courses aux différents temps	42
Tableau 9. Moyennes des Pt de récupération pour chaque groupe musculaire en pourcentage par rapport aux valeurs de base et comparaison des moyennes entre les 2 courses aux différents temps	43
Tableau 10. Comparaison des moyenne des masses grasses (en pré, post-course, à J+2, J+5 et J+10) entre les 2 groupes.....	45
Tableau 11. Moyennes des sensations de douleur des mollets évaluées par EVA (entre pré et post-course immédiat) avec rapport des moyennes.....	46
Tableau 12. Moyennes des sensations de douleur des cuisses évaluées par EVA (entre pré et post-course immédiat) avec rapport des moyennes.....	47

ABREVIATIONS

ATP: Adénosine Tri-Phosphate

CHU: Centre Hospitalier Universitaire

CNIL: Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés

CPP: Centre de Protection des Personnes

CRF: Case Report Form

CRP: Protéine C Réactive

D + /-: Dénivelé positif / négatif

EVA: Echelle Visuelle Analogique

HP2: Hypoxie & Physiopathologie

LCA: Ligament Croisé Antérieur

MVC: Maximum Voluntary Contraction

MSR: Multi-Stage Race

N: Newton

Pt: Peak Twitch

SSR: Single-Stage Race

VA: Voluntary Activation

UT4M: Ultra-Tour des 4 Massifs

UTMB: Ultra-Trail du Mont-Blanc

RESUME

Objectif : Les courses d'Ultra-Trail comprennent 2 formats de course principaux: les courses en une seule étape, et les courses en plusieurs étapes. Aucune étude n'a encore été réalisée pour comparer la fatigue et la récupération neuromusculaire de ces 2 formats de course sur des distances et des dénivelés similaires. L'objectif principal de cette étude était d'évaluer la fatigue neuromusculaire et la cinétique de récupération de 2 courses d'Ultra-Trail d'égale distance courues en une seule étape ou en plusieurs étapes sur 4 jours consécutifs. Les objectifs secondaires étaient de quantifier les données anthropométriques en étudiant les variations de poids et de masse grasse, ainsi que les sensations de douleurs.

Méthodes : Trente-deux coureurs ont participé à l'étude: 17 ont couru 160 km en une seule étape et 15 ont couru 40 km par jour pendant 4 jours consécutifs. Les 2 courses se sont déroulées sur le même parcours. Des évaluations neuromusculaires ont été réalisées avant (PRE), immédiatement après (POST), et 2 jours (J2), 5 jours (J5) et 10 jours (J10) après les courses. La fonction neuromusculaire a été évaluée à la fois sur les extenseurs du genou et les fléchisseurs plantaires, soit par des contractions volontaires, soit provoquées (respectivement sur le nerf fémoral et sur le nerf tibial) à l'aide d'une stimulation nerveuse électrique.

Résultats : Les principaux résultats montrent une perte d'activation volontaire (fatigue centrale) sur l'extension du genou plus importante pour les sujets de la course en une seule étape que ceux de la course à plusieurs étapes directement après la course (-21% vs -5% ; $p < 0,05$). En phase de récupération, les réponses de force après stimulation simple sur muscles relâchés (fatigue périphérique) ont mis plus de temps à récupérer pour les sujets de la course à plusieurs étapes, à la fois pour les extenseurs du genou et les fléchisseurs plantaires.

Conclusion : Courir un Ultra-Trail en plusieurs étapes sur des jours consécutifs, chacun séparé par une période de repos, induit des dommages plus prolongés de la fonction neuromusculaire, tandis que courir un Ultra-Trail en une seule étape sur le même parcours entraîne une fatigue centrale plus importante.

MOTS-CLES: Fatigue centrale et périphérique, Récupération neuromusculaire, Course d'ultra-endurance

ABSTRACT

Purpose: Ultra-Trail running includes 2 main types of events: single and multi-stage races. No study has yet been performed to compare fatigue and neuromuscular recovery of these 2 running formats over similar distances and elevation difference. The aim of this study was to assess neuromuscular fatigue and recovery kinetics following two Ultra-Trail of equal distance run either in a single stage or in 4 successive days. The secondary objectives were to quantify the anthropometric data by studying the variations in weight and fat mass, as well as pain sensations.

Methods: Thirty-two runners participated in the study: 17 ran 160 km in a single-stage and 15 ran 40 km/day over 4 days. The two races were performed on the same course. Neuromuscular function was tested before (PRE), immediately after (POST), and 2 days (D2), 5 days (D5) and 10 days (D10) after the races. Neuromuscular function was evaluated on both knee extensors and plantar flexors, either by voluntary contractions or by evoking (respectively on the femoral nerve and the tibial nerve) using electrical nerve stimulation.

Results: The main results show a loss of voluntary activation (central fatigue) on knee extension greater for subjects in the single-stage race than those in the multi-stage race directly after the race (-21% vs -5%; $p < 0,05$). At the recovery time, responses after simple stimulation on relaxed muscles (peripheral fatigue) took longer to recover for the subjects in the multi-stage race, for both knee extensor and plantar flexors.

Conclusion: Running an Ultra-Trail in several stages over consecutive days, each separated by rest, induces more prolonged damages of neuromuscular function, while running an Ultra-Trail in single-stage on the same course is associated with greater central fatigue.

KEY WORDS: Central and peripheral fatigue, Neuromuscular recovery, Ultra-endurance running

I. INTRODUCTION

La pratique de la course à pied en montagne ou «Trail» est en plein essor en France et ailleurs dans le monde. Actuellement, les épreuves de Trail sont classées en fonction de leur distance et dénivelé, et peuvent se courir en une seule étape (Ex : Ultra-Trail du Mont Blanc) ou en plusieurs étapes (Ex : Marathon Des Sables) (1,2,3).

Cette pratique sportive s'associe à des contraintes physiologiques spécifiques liées en particulier à la durée des efforts réalisés (plusieurs heures ou jours), au terrain (dénivelé important, sol technique, altitude moyenne) et à l'environnement (isolement, altitude, variations de températures etc...).

Courir un Ultra-Trail est très exigeant pour le corps humain, avec des effets importants, entre autres, sur les muscles (1), les articulations (4), le cœur (5), le sommeil (6) et la fatigue (3). Des études ont permis ces 10 dernières années d'explorer les conséquences des courses de longue distance notamment sur la fatigue et la récupération neuromusculaire. Ces études ont montré que la pratique du trail sur des distances longues est associée au développement d'une fatigue musculaire à la fois centrale (liée à la commande cérébrale) et périphérique (liée au muscle lui-même) (2).

Pour diversifier les pratiques, les organisateurs proposent maintenant de courir les trails de très longues distances, en plusieurs étapes, la plupart du temps sur plusieurs jours consécutifs. C'est aussi une technique classique d'entraînement en trail, consistant à concentrer sur quelques jours consécutifs une importante charge d'entraînement (« Les week-end chocs »). Les conséquences de ce format de course ou d'entraînement, en termes de fatigue et de récupération musculaire, ne sont pas encore bien connues et à notre connaissance, aucune étude n'a à ce jour comparé les conséquences, sur le plan de la fatigue musculaire et de la récupération, d'une course de longue distance faite en une étape versus en plusieurs étapes. Les conséquences sont potentiellement importantes car la fatigue, en altérant le contrôle neuromusculaire, est un facteur classique favorisant la survenue de blessures (7-12).

L'Ultra-Trail des 4 Massifs (UT4M) est une course de trail qui parcourt les 4 massifs situés autour de Grenoble. C'est l'une des rares courses où les coureurs peuvent choisir de parcourir exactement le même trajet en une fois ou en 4 fois sur 4 jours consécutifs.

L'objectif principal de cette étude est donc de quantifier et de comparer les niveaux de fatigue musculaire, avant et après chaque épreuve, ainsi que la cinétique de récupération jusqu'à 10 jours, dans 2 groupes de coureurs participant à l'UT4M. Les objectifs secondaires sont d'évaluer les modifications anthropométriques ainsi que les sensations subjectives de fatigue et de douleurs musculaires.

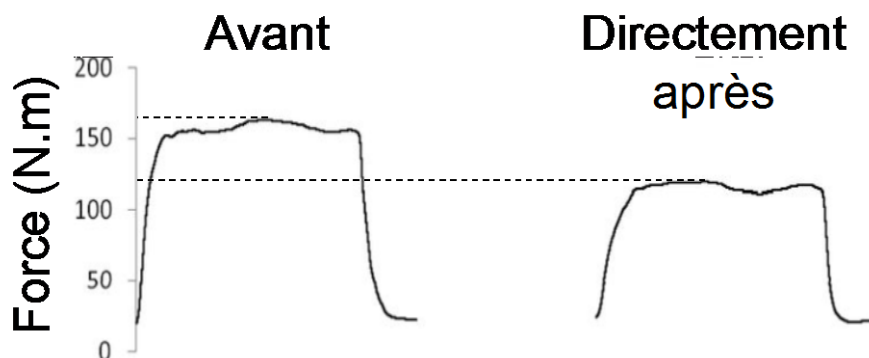
II. ETATS DES CONNAISSANCES :

1) Définition de la fatigue :

La fatigue est un état résultant de contraintes physiologiques ou psychologiques aboutissant à une diminution des performances physiques ou cognitives. Au niveau d'un muscle, la fatigue est définie par la réduction de la capacité de ce muscle, à produire une force en réponse à un stimulus (2,4).

La fatigue neuromusculaire est influencée par de multiples facteurs, soit liés à la personne elle-même (sexe, âge, environnement, entraînement), soit liés au type d'exercice lui-même (intensité, type, vitesse, durée).

La mesure de force peut se faire de nombreuses façons. La plus courante est la mesure de la force au cours d'une contraction maximale volontaire (MVC) par un capteur de force installé sur un ergomètre de mesure (Figure 1) (13). Ces mesures doivent être parfaitement standardisées pour être reproductibles.



***Figure 1.** La fatigue neuromusculaire : Evolution de la force (en newton/mètre) isométrique produite par un groupe musculaire (ici les fléchisseurs plantaires) au cours d'une contraction maximale volontaire avant et après un effort. La diminution de la force mesurée signe la présence d'une fatigue.*

La perte de force maximale enregistrée après un exercice prolongé peut résulter de plusieurs mécanismes se situant à différents niveaux entre le cortex moteur et les muscles périphériques (3,14).

On distingue une fatigue dite centrale, liée à un défaut d'activation neuromusculaire et une fatigue dite périphérique, liée à un déficit de force produite par le muscle lui-même. Ces deux mécanismes sont schématisés sur les figures 2 et 3.

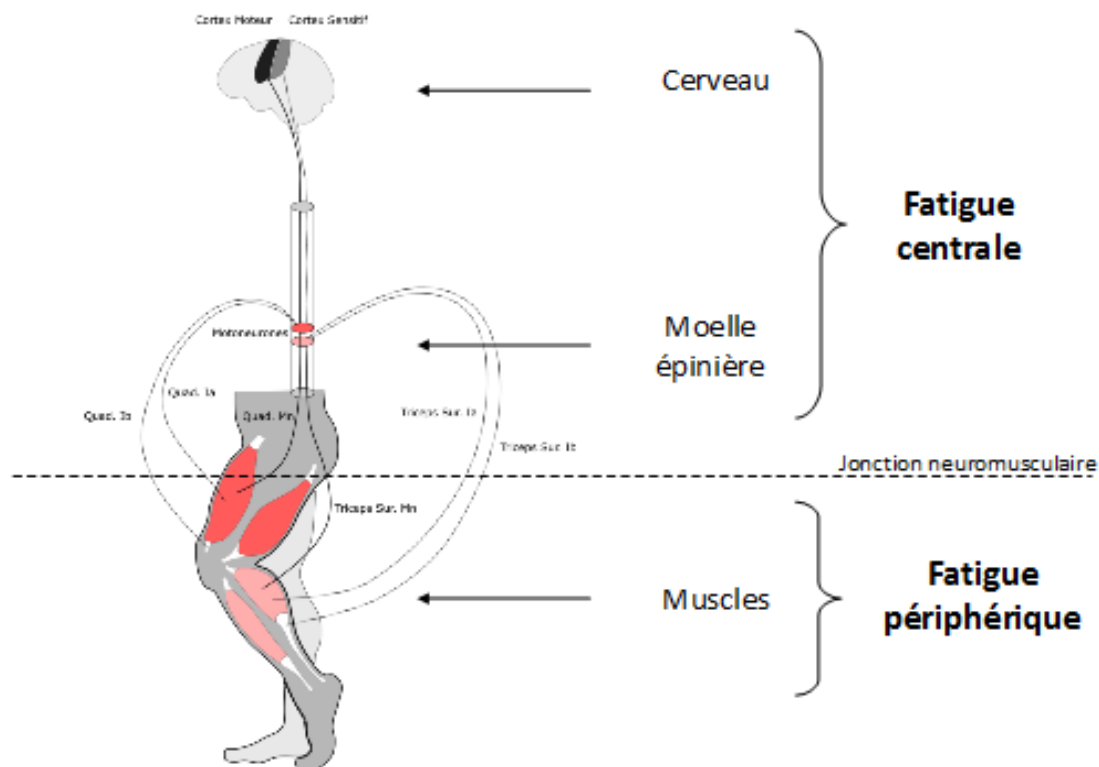


Figure 2. Les différentes composantes de la fatigue neuromusculaire. *Fatigue centrale : altérations des mécanismes spinaux et supra-spinaux de la commande motrice. Fatigue périphérique : dysfonction au niveau ou en deçà de la jonction neuromusculaire.*

La fatigue centrale est liée à des modifications pouvant être causées par différents mécanismes spinaux et supra-spinaux comme des altérations neurobiologiques du cortex, des changements des propriétés intrinsèques des motoneurones innervant les fibres musculaires contractiles, l'inhibition du pool de motoneurones par des afférences inhibitrices notamment mécano-sensitives et métabo-sensitives (Figure 3) (14).

La fatigue périphérique est liée à des dysfonctionnements au niveau ou en aval de la jonction neuromusculaire : modification de la transmission du potentiel d'action, du couplage excitation-contraction, de la disponibilité des substrats et accumulation des métabolites, du milieu intracellulaire et de l'irrigation sanguine musculaire (Figure 3) (13,15).

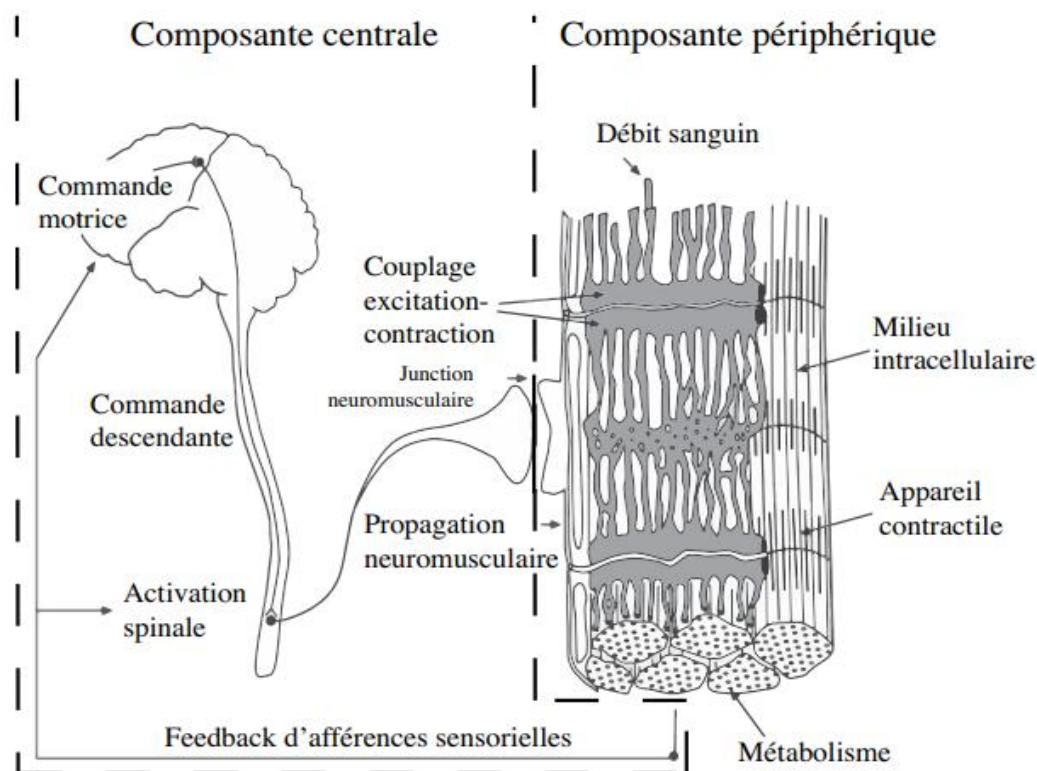


Figure 3. Les différents processus pouvant contribuer aux phénomènes de fatigue neuromusculaire (13,15).

2) Quantification de la fatigue

a. Fatigue centrale

La fatigue centrale est définie comme une altération de la capacité du sujet à activer volontairement un muscle ou un groupe musculaire donné. Une diminution de l'activation volontaire (VA) maximale d'un sujet serait alors le témoin de cette fatigue centrale.

Dans la littérature, il existe différentes façons de quantifier ce déficit d'activation (13,16).

La méthode classique consiste à demander au sujet de contracter volontairement son muscle au maximum de ce qu'il peut faire, et, lorsqu'il est contracté, de surimposer une stimulation électrique sur le nerf moteur de ce muscle. C'est la technique de la stimulation surimposée. On mesure alors la quantité de force que la stimulation électrique provoque (Figure 4).

S'il n'y a pas de différence, il n'y a pas de fatigue centrale.

S'il y a une différence, le sujet a plus de mal à activer son muscle volontairement, ce qui témoigne d'une fatigue centrale. Plus cette différence est importante, plus il y a de la fatigue centrale.

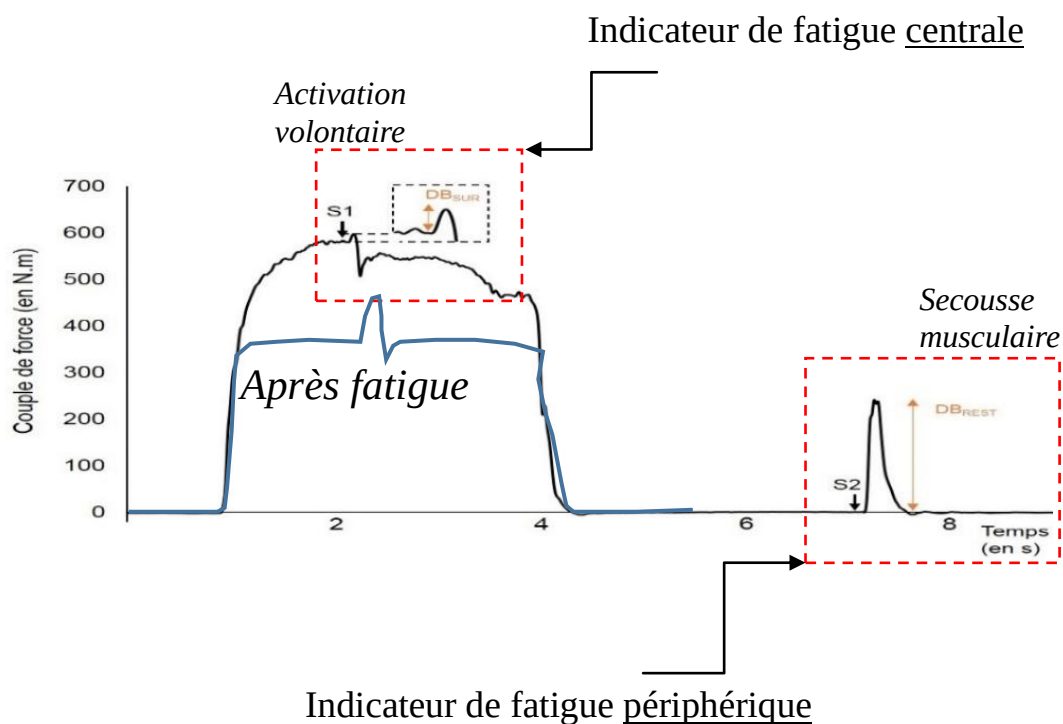


Figure 4. Quantification de la fatigue neuromusculaire. Couple de force enregistré avant (courbe noire) et après la course (course bleue) en fonction du temps. Pendant le maintien du plateau de contraction volontaire maximale, une stimulation électrique S1 est surimposée permettant de mesurer la force supplémentaire développée, indicateur de fatigue centrale – Lorsque le muscle est complètement relâché, une stimulation électrique S2 est imposée permettant de mesurer la force développée d'une secousse musculaire simple, indicateur de fatigue périphérique.

L'amplitude de la secousse surimposée à une contraction volontaire isométrique diminue proportionnellement avec l'augmentation de la force de contraction du groupe musculaire étudié. Ainsi, pour une force de contraction musculaire volontaire maximale, l'amplitude de la secousse surimposée devient normalement presque nulle (Figure 5).

En étudiant les variations de l'amplitude de la secousse surimposée à une contraction volontaire maximale, on obtient donc le déficit d'activation volontaire qui est l'indicateur préférentiel de la fatigue centrale (13,16).

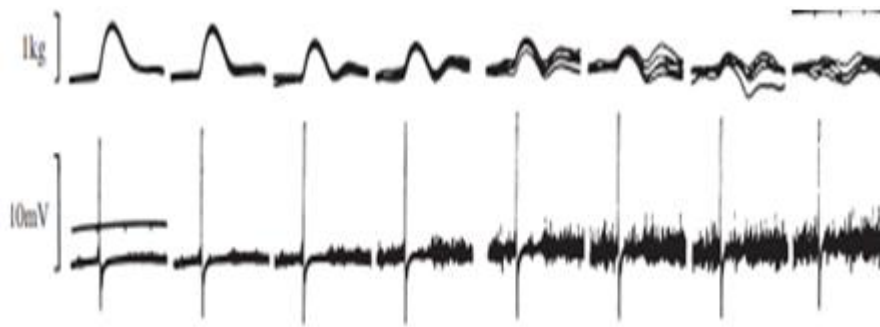


Figure 5. Evolution de la force (en kg) et du potentiel d'action (en mV) associés à une stimulation surimposée lors de contractions volontaires d'intensité croissante (13,16).

b. Fatigue périphérique

La fatigue périphérique est définie comme une altération des mécanismes «intrinsèque» des muscles striés, situés en aval de la jonction neuromusculaire (13,15).

Pour quantifier le niveau de fatigue périphérique, il est important de s'affranchir des processus centraux et de l'influence d'éventuelles variations du niveau d'activation volontaire des sujets lors de la contraction musculaire volontaire. Le principe consiste à stimuler le nerf moteur innervant un muscle par un courant électrique percutané.

La méthode actuellement la plus utilisée pour mesurer cette fatigue est la stimulation électrique simple d'un nerf moteur sur un muscle relâché (4,13,17,18).

Le pic de force mesuré est appelé « secousse musculaire » ou peak twitch (Pt) (Figure 4 et 6). En mesurant la variation de l'amplitude de chaque secousse musculaire, on peut donc quantifier le niveau de fatigue périphérique pour un groupe musculaire donné (13,16,17).

Sur les secousses musculaires, il est possible de calculer d'autres paramètres secondaires comme le temps de contraction, le temps de demi-relaxation et la vitesse maximale de contraction pour essayer de différencier différents mécanismes (18) .

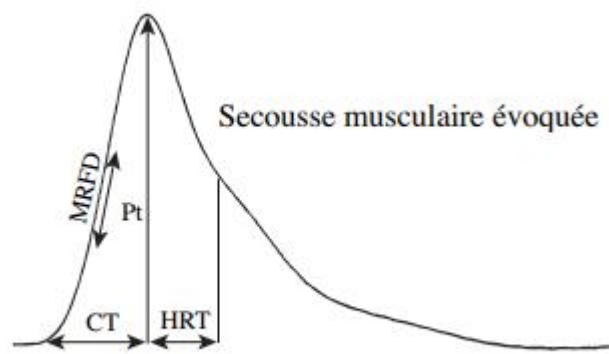


Figure 6. Caractéristiques de la secousse musculaire évoquée par stimulation simple du nerf moteur (7). Pt = Peak twitch ; CT = temps de contraction ; HRT = temps de demi-relaxation.

3) La fatigue neuromusculaire en Ultra-Trail

Depuis 10 ans, les courses de trail sont devenues de véritables modèles d'étude des mécanismes de la fatigue et de la cinétique de récupération musculaire en réponse à des exercices intenses et prolongés.

Les premières données sur la fatigue musculaire ont été rapportées par une étude faite lors de l'UTMB en 2009 (166 km et 9500 D+) par l'équipe de Millet *et al* (18). Cette étude a montré que, à l'issue de la course, la fatigue se traduisait par une perte en moyenne de 40% des capacités neuromusculaires. En revanche, tous les sujets récupéraient leur capacité de force musculaire en moins de deux semaines (18). Une étude complémentaire réalisée en 2013 sur un Ultra-Trail de 330 km (Tor des Géants, presque deux fois plus long que l'UTMB) a montré que la fatigue musculaire n'était globalement pas plus importante et qu'il n'y avait donc a priori pas de relation avec la distance (19).

Dans ces deux études la fatigue concernait les groupes de muscles testés, à savoir ceux responsables de l'extension du genou et de la flexion plantaire (18,19).

La diminution de l'activation volontaire, donc la fatigue centrale, sur les extenseurs du genou et les fléchisseurs plantaire après cet Ultra-Trail de 166 km (UTMB) était respectivement de 19% et 6% (18). Cette diminution était plus importante après 330 km avec une diminution respectivement de 22% sur les extenseurs du genou et de 29 % sur les fléchisseurs plantaires (19)

Ces résultats sont conformes à d'autres études qui ont mis en évidence la présence de dysfonctions neuromusculaires périphériques des extenseurs du genou et des fléchisseurs plantaires à la suite de différentes courses de trail-running de 40 à 330 km (20-24).

D'une façon générale et quel que soit le niveau de fatigue, les dommages musculaires étaient très marqués, avec une grande disparité entre les coureurs. Ces dommages étaient évalués de façon indirecte par des modifications biologiques sanguines, comme l'augmentation du taux de certaines protéines musculaires notamment la créatine kinase et la myoglobine, l'apparition d'un syndrome inflammatoire marqué par l'augmentation de la CRP, et les douleurs musculaires ressenties. Malgré tout, aucun paramètre simple (niveau de performance, âge, nombre d'heures d'entraînement) ne semble expliquer cette variabilité (20).

4) Fatigue neuromusculaire et blessure

La prévalence annuelle des blessures liées à la course à pied varie entre 50% et 79% (7). Les origines sont multiples et la fatigue peut être un facteur favorisant en raison d'une augmentation du stress, de la répétition importante des chocs et des vibrations induites au niveau musculo-squelettiques (7).

Des études récentes ont montré que l'entorse latérale de la cheville est la blessure la plus courante pour tout type de sport confondu. Dans cette pathologie, les symptômes aigus disparaissent rapidement, mais certains patients rapportent une douleur persistante liée à un phénomène que l'on nomme « Instabilité Fonctionnelle de la Cheville » (9). Ce phénomène peut provenir d'une altération de la réponse motrice ou sensitive d'un groupe musculaire responsable de la stabilité dynamique de la cheville après une première blessure. Ces muscles génèrent une force motrice suffisante pour s'opposer au principal mécanisme de l'entorse de la cheville associant une inversion et une flexion plantaire (9).

Rodrigues *et al.* ont montré chez les personnes présentant une instabilité fonctionnelle de la cheville une modification des signaux électromyographiques du système musculaire compensateur des mouvements de la cheville après une fatigue importante et donc une réduction du contrôle de la stabilité du système articulaire pouvant prédisposer les individus à la survenue de blessures (9).

Par ailleurs, le genou par sa structure anatomique joue un rôle important dans la proprioception grâce aux mécanorécepteurs situés au niveau des tendons, des muscles en périphérie du genou, des ligaments croisés, des ligaments collatéraux et des ménisques (10). Cet ensemble joue un rôle dans la prévention des blessures du genou car il permet de stabiliser l'ensemble et d'assurer une coordination motrice entre les muscles stabilisateurs statiques du genou et de la cuisse (10).

La fatigue neuromusculaire induite au niveau du genou a probablement une influence sur les afférences et les efférences neuromusculaire à ce niveau. Cette hypothèse semble être en accord avec les différentes observations d'études qui montrent que les ruptures du ligament croisé antérieur (LCA) sont plus fréquentes à la fin d'un événement sportif, lorsqu'un participant est fatigué (10). Ce phénomène a été constaté en particulier dans le ski de loisir, où des ruptures du LCA se produisent fréquemment en fin de journée (11). Une revue de la littérature récente a montré que la fatigue neuromusculaire était un facteur de risque intrinsèque favorisant la rupture du LCA chez les footballeurs (10).

A notre connaissance, le lien entre fatigue et blessure a largement été démontré dans le milieu sportif, mais pas dans le monde du trail-running spécifiquement.

Cependant, une étude réalisée aux Pays-Bas a montré que l'apport de conseils personnalisés en ligne a empêché l'apparition de blessures liées à la course parmi certains « traileurs » néerlandais (12).

III. MATERIELS & METHODES :

L'étude UT4M 2018 est une étude pilote, exploratoire, prospective, non randomisée et monocentrique réalisée dans le cadre de la Chaire Universitaire « Sport, Altitude, Santé » de la Fondation Université Grenoble Alpes et dont le promoteur est le CHU de Grenoble-Alpes, réalisée sur les courses de l'UT4M de l'édition 2018 (du 22 au 26 Août 2018).

Elle a reçu un avis favorable du Comité de Protection des Personnes (CPP) du Sud-ouest et Outre-mer II le 06 Juillet 2018 ainsi que de la Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés (CNIL). Les résultats présentés ici ne sont qu'une partie de cette étude.

1) Population

Le recrutement des sujets a été fait selon plusieurs méthodes : un mail descriptif de l'étude a été envoyé à tous les inscrits des courses UT4M 160 km et 4x40 km, puis un appel à volontaire a été relayé sur le site internet de l'évènement et via les réseaux sociaux.

Les critères d'inclusion étaient :

- Homme ou femme
- Age: 18-55 ans
- Absence de maladie chronique: cardiovasculaire, respiratoire, métabolique ou neuromusculaire
- Supérieur à 3 ans de pratique du trail (au moins 1 course >40 km/an terminée et une course >100 km terminée (groupe trail 160 km))
- Certificat médical de non contre-indication à la pratique du trail
- Sujets disponibles à Grenoble avant et dans les 15 jours après la course
- Sujets assujettis à un régime de sécurité social
- Sujets aptes à signer le consentement éclairé

Les critères de non-inclusion étaient :

- Pathologies cardiorespiratoires, métaboliques et neurologiques
- Sujets non échogènes
- Traitements médicamenteux susceptibles d'interagir avec les mesures de l'étude

- Sujets présentant des troubles du sommeil chroniques
- Personnes refusant de signer la fiche d'information et l'accord de participation
- Pathologies psychiatriques ou antécédent de troubles du comportement
- Personnes sous tutelle ou non assujetties à un régime de sécurité sociale
- Femme enceinte, parturiente, mère qui allaite
- Personne privée de liberté par décision judiciaire ou administrative
- Personne faisant l'objet d'une mesure de protection légale, ne pouvant pas être incluse dans les essais cliniques

2) Design expérimental

Les inclusions pour chaque sujet ont débuté en Juillet 2018, la durée de participation totale était de 3 mois.

Les évaluations pré et post-course se sont déroulées du 23 au 26 Aout 2018 (dates des courses) et les évaluations de récupération jusqu'au 6 Septembre 2018 (J+10).

Le parcours de la course ainsi que le profil sont donnés sur les figures 8 et 9.

Les sujets étaient répartis en 2 groupes :

- course réalisée en une étape (groupe SSR : Single-Stage Race) qui devait courir les 160 km et 11000 m de dénivelé, en une fois (course UT4M Xtrem 160 km)
- et course en plusieurs étapes (groupe MSR : Multi-Stage Race) qui devait suivre exactement le même parcours en quatre jours consécutifs (UT4M Challenge 4x40 km), soit environ 40 km par jour.

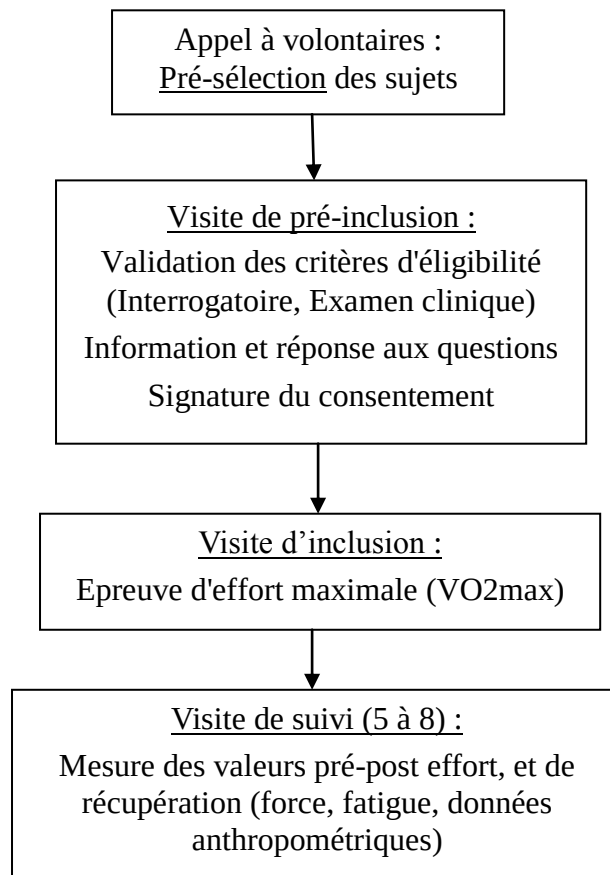


Figure 7. Schéma du déroulement de l'étude

Les visites de suivi correspondaient aux mesures pré et post épreuve ainsi qu'aux mesures en phase de récupération selon le déroulement suivant :

- Les sujets du groupe SSR devaient participer à 5 visites : avant (PRE), après (POST), 2 jours après (J+2), 5 jours après (J+5) et 10 jours après (J+10) la course
- Les sujets du groupe MSR devaient en plus de ces 5 visites en faire 3 de plus : après la première (POST1), la deuxième (POST2) et la troisième (POST3) étape.

Chacune de ces visites a eu lieu de façon identique et a permis de collecter les paramètres correspondant aux critères de jugement (données neuromusculaires, anthropométriques, fatigue et douleur). Le recueil et la protection des données se sont fait grâce à un cahier d'observation (CRF) en format papier qui a été rempli au fur et à mesure des différentes visites de l'étude.

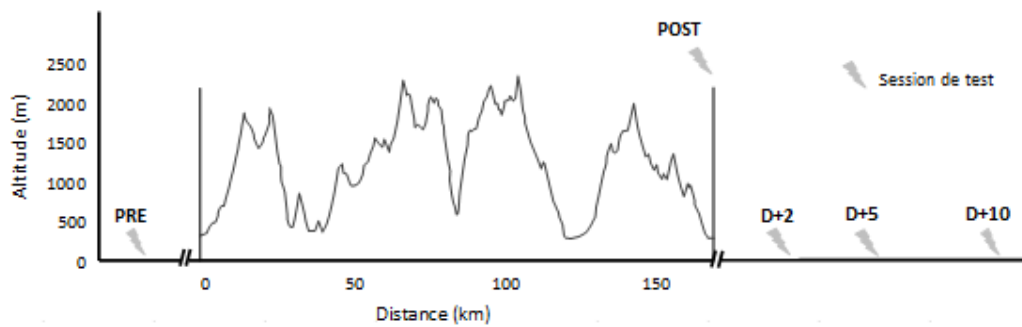


Figure 8. Profil de course et chronologie des visites sur l'UT4M 160 km

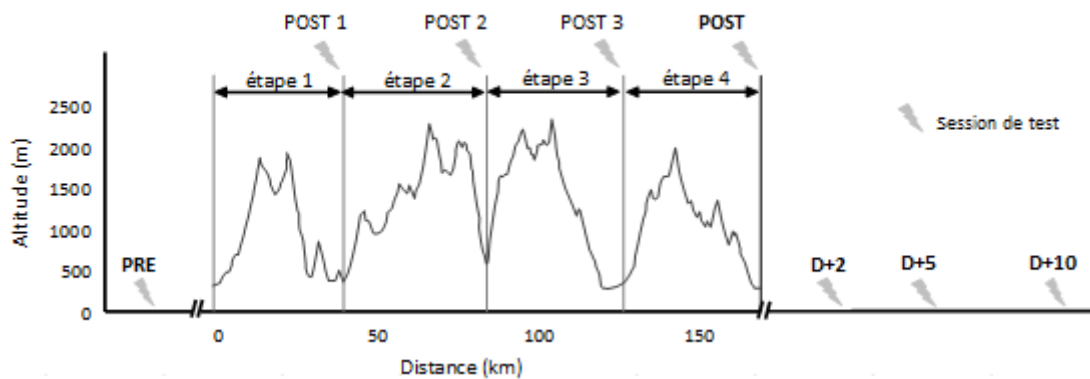


Figure 9. Profil de course et chronologie des visites sur l'UT4M 4x40 km

3) Variables mesurées et méthodes de mesure

a. Exploration de la force musculaire volontaire maximale

i. Procédure

Pour quantifier la perte de force musculaire, des évaluations neuromusculaires ont été réalisées sur deux ergomètres spécifiques. Le protocole de test a été effectué sur les extenseurs du genou (quadriceps) et sur les fléchisseurs plantaires (mollets) de la même façon en pré et post-course.

Ces ergomètres permettaient de positionner la jambe droite de façon standardisée (angle du genou et de la cheville à 90°) alors que le sujet était assis (évaluation des extenseurs du genou) ou semi-allongé (évaluation des extenseurs de la cheville) et de mesurer la force d'extension au niveau de la cheville (pour les extenseurs du genou) ou de l'avant pied (pour les extenseurs de la cheville) avec une jauge de contrainte reliée à capteur de force calibré

avec un amplificateur et un système d'enregistrement. Le capteur de force était fixé à la chaise afin que la force mesurée soit dans l'alignement de la force appliquée (12).

La force produite par les groupes musculaires étudiés était caractérisée par la réponse mécanique (amplitude de force) lors d'une contraction volontaire maximale ou lors d'une stimulation électrique du nerf moteur (nerf fémoral au niveau du triangle fémoral pour le quadriceps, nerf tibial au niveau du creux poplité pour le mollet) (4).

ii. Stimulations électriques

Des stimulations électriques simples ont été délivrées au niveau du nerf fémoral et du nerf tibial à l'aide d'un stimulateur (Digitimer DS7, Hertfordshire, UK) jusqu'à obtenir une intensité de stimulation optimale et maximale.

Ces stimulations ont permis de mesurer les propriétés contractiles des extenseurs du genou et de la cheville (par stimulation du muscle relâché), mais aussi de mesurer le niveau d'activation volontaire (par stimulation surimposée à une contraction maximale volontaire). Par ce procédé, on distingue les 2 niveaux de fatigue, centrale, et périphérique.

b. Quantification de la fatigue centrale et périphérique

Pour quantifier ces différentes fatigues, le protocole consistait en un échauffement standardisé (sauf pour les sessions POST) de 10 contractions sous-maximales suivi de 3 contractions volontaires maximales avec une période de repos d'une minute entre chaque contraction maximale. Sur les 2 dernières contractions maximales a été surajoutée une stimulation nerveuse électrique (doublet haute intensité 100 Hz), suivie de 3 stimulations (doublet 100Hz, doublet 10 Hz et contraction simple) sur des muscles relâchés.

La fatigue centrale a été quantifiée par le pourcentage de perte d'activation volontaire, en surimposant un doublet à haute fréquence de 100 Hz au cours d'une contraction musculaire volontaire maximale pour chaque groupe musculaire.

La fatigue périphérique a quant à elle été quantifiée par le pourcentage de perte lors d'une secousse musculaire simple en imposant des stimulations électriques sur chaque groupe musculaire relâché.

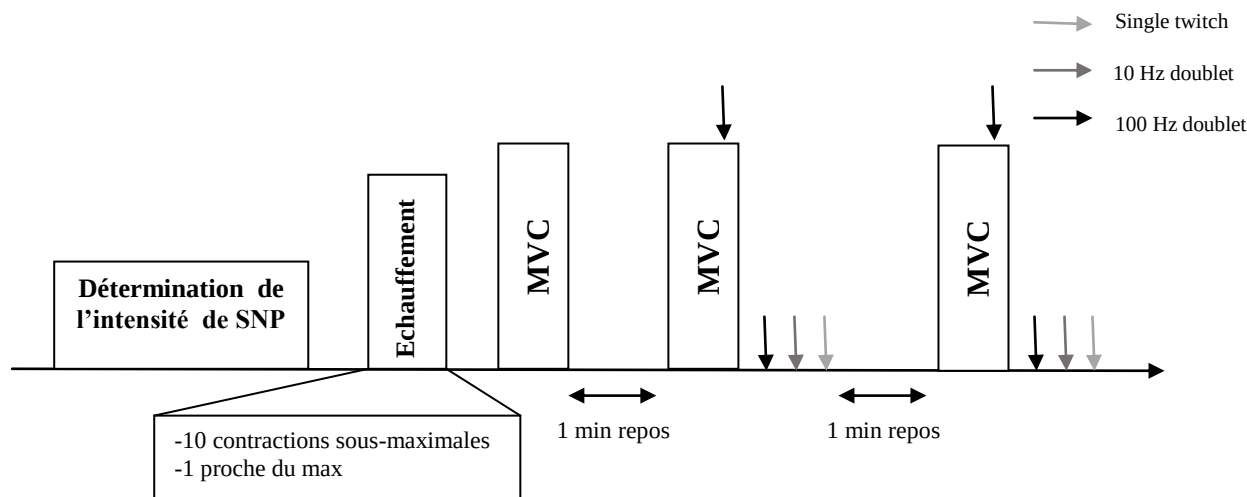


Figure 10. Description d'une session de test. SNP : Stimulation Nerveuse Périphérique ; MVC : Contraction Volontaire Maximale.

c. VO₂max

Lors de l'inclusion, chaque coureur a bénéficié d'une épreuve d'effort maximale triangulaire sur vélo (e-bike, General Electric, France) avec mesure des échanges gazeux (Medisoft, Belgique). Cette épreuve a permis de mesurer la VO₂max, quantité maximale d'oxygène que le corps peut consommer lors d'un effort intense par unité de temps (en ml/min/kg), la puissance maximale développée, et permettait de s'assurer de l'absence de contre-indication évidente à la pratique de cette épreuve sportive.

d. Données anthropométriques

Le poids et le pourcentage de masse grasse ont été mesurés grâce à 2 types de balance : une balance de laboratoire Tanita SC240 Ma pour le 160 km et une balance Téfal Body Partner pour le 4x40 km.

e. Douleurs et fatigue subjective

L'évaluation des douleurs musculaires et de la fatigue générale a été recueillie grâce à une échelle visuelle analogique (EVA) où le coureur devait estimer ses sensations sur une échelle de 0 à 10.

4) Critères de jugement

a. Principal

Pourcentage de diminution pré-post effort de la force musculaire globale (extenseurs de la cheville et extenseurs du genou) évaluée par neurostimulation.

b. Secondaires

Modification pré-post effort du poids corporel et de la composition corporelle (mesurée par bio-impédancemétrie, en kg) ; Evaluation par échelle visuelle des douleurs musculaires et de la fatigue musculaire.

5) Analyses Statistiques

Toutes les données ont été présentées et analysées sous forme de valeur moyenne et d'écart-type en pourcentage par rapport aux valeurs pré-course.

Les analyses statistiques ont été réalisées par les responsables scientifiques de l'étude et le statisticien du laboratoire HP2. L'analyse statistique a été réalisée à l'aide du Statistica version 10 (Statsoft, Tulsa, OK).

La normalité des variables et l'homogénéité des variances ont été testées respectivement à l'aide des tests de Shapiro-Wilk et de Levene.

Pour la comparaison des caractéristiques mesurées avant l'épreuve de chaque groupe, différents tests ont été utilisés : des tests de Student, lorsque les conditions de répartition étaient respectées, un test non paramétrique de Mann et Whitney, dans le cas contraire a été réalisé.

Pour la comparaison des mesures de suivi, des tests t de Student ont été utilisés pour comparer les valeurs POST (évaluation de la fatigue aigue, comparaison de 2 temps de mesure PRE et POST) entre SSR et MSR, et ii) une analyse de variance à 1 facteur (temps) ANOVA a été utilisée pour les mesures répétées à J+2, J+5, et J+10 (évaluation de la récupération au cours du temps) suivi de tests post-hoc type Student-Newman-Keuls de comparaison de moyenne (conditions de normalité et d'homogénéité des échantillons étaient réunies) ; si les conditions de répartition pour l'analyse de variance n'étaient pas respectées, un test non paramétrique de Mann et Whitney était réalisé.

Les tests ont été interprétés avec un risque de première espèce α fixé à 5% en situation unilatérale.

IV. RESULTATS

1) Caractéristiques des sujets

Le flow chart de l'étude est indiqué sur la figure 11.

Sur les 54 sujets initialement volontaires, 5 ont été exclus selon les critères d'éligibilité. Parmi les 49 restants et inclus, il y a eu 15 abandons :

- 11 dans le groupe SSR (3 blessures pré-course, 1 blessure pendant la course, 2 sur troubles digestifs, 3 sur fatigue générale, et 2 sur douleurs) ;
- 4 dans le groupe MSR (1 blessure pré-course, 1 blessure pendant la course, 1 syndrome grippal, 1 sur douleurs).

Il y a eu 2 perdus de vue, 1 dans le groupe SSR, qui ne s'est pas présenté à l'évaluation post-course, et 1 pour le groupe MSR qui ne supportait pas les stimulations électriques.

Au total, 32 coureurs (5 femmes et 27 hommes ; âge : $40,7 \pm 8,6$ ans ; taille : $174,4 \pm 6,7$ cm ; poids : $70 \pm 7,7$ kg) ont donc participé à la totalité de l'étude.

Les caractéristiques des sujets sont regroupées dans le tableau 1. Les deux groupes étaient similaires. En particulier, il n'y avait pas de différence significative en terme de $VO_2\text{max}$ ($p > 0,05$).

	Groupe SSR	Groupe MSR
Nombre de sujets	17	15
Sexe	H : 94% F : 6%	H : 75% F : 25%
Age (années)	$42,9 \pm 9,5$	$38,2 \pm 7,5$
Taille (cm)	$173,9 \pm 5,9$	$175 \pm 7,7$
Poids (kg)	$69,6 \pm 8,3$	$70,5 \pm 7,0$
IMC (kg/m^2)	$22,8 \pm 2,0$	$22,9 \pm 1,9$
$VO_2\text{max}$ ($\text{ml}/\text{min}/\text{kg}$)	$56,4 \pm 6,2$	$55,2 \pm 8,5$

Tableau 1. *Caractéristiques des sujets*

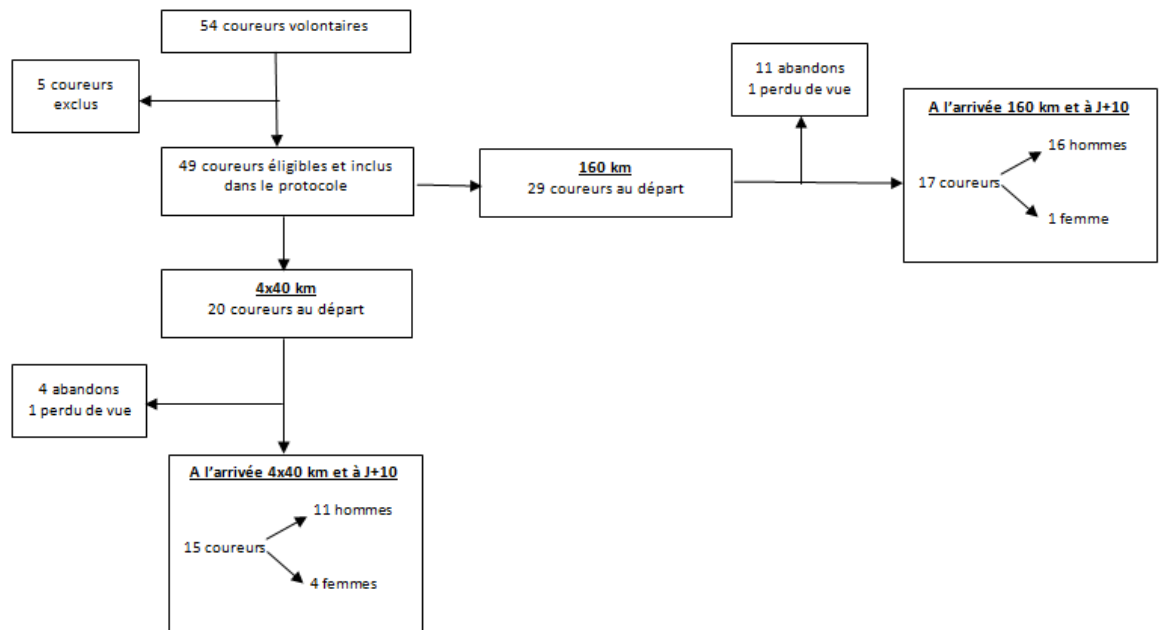


Figure 11. Flow Chart de l'étude.

2) Performances sur les deux courses

Les performances moyennes des coureurs de chaque groupe sont donnés dans le tableau 2. Par rapport au coureur le plus rapide de leur course respective, les groupes SSR et MSR présentaient des performances très similaires. Il fallait en moyenne 160 % du meilleur temps pour terminer la course.

Cependant, comme on pouvait s'y attendre, la durée totale de course a été plus importante dans le groupe SSR, d'environ 34 % soit plus de 10h de plus pour faire le même parcours, par rapport au groupe MSR ($p < 0,001$).

En comparant le temps mis par les deux groupes pour parcourir les 40 premiers km (seule partie comparable car réalisée dans le même état de « fraîcheur » pour les deux groupes) on s'aperçoit que le groupe SSR était moins rapide et affichait une durée de course déjà environ 12 % plus longue que le groupe MSR ($p < 0,05$).

	Groupe SSR	Groupe MSR
% du meilleur temps (%)	157 ± 24	160 ± 11
Temps de course total (hh:mm:ss)	43:44:42 ± 4:09:01	32:41:04 ± 5:59:05 ^{###}
Temps de course après 40 km (hh:mm:ss)	7:51:22 ± 0:53:25	7:02:33 ± 1:13:47 [#]

Tableau 2. Performances finales de course. [#] $p < 0,05$; ^{###} $p < 0,001$: Différence significative entre les 2 courses.

3) Fatigue musculaire à l'arrivée

a. Perception subjective

Dans les 2 groupes, les résultats montrent un ressenti significativement plus important de fatigue générale en post-course immédiat par rapport aux sensations pré-course de 3,3 fois plus pour le groupe MSR, et de 4 fois plus pour le groupe SSR ($p < 0,001$) sans différence significative concernant la fatigue aiguë générale entre les 2 groupes ($p > 0,05$).

	Pré (EVA)	Post (EVA)	Rapport post/pré
Groupe MSR	1,8 ± 1,3	6,0 ± 1,8***	3,3
Groupe SSR	2,0 ± 1,3	8,0 ± 2,4***	4,0

Tableau 3. Moyennes des sensations de fatigue générale évaluées par EVA (en pré et post-course immédiat) et rapports des moyennes. *** $p < 0,001$: Différence significative par rapport aux mesures de base pour le même groupe.

b. Fatigue globale (Contraction volontaire maximale)

Quelque soit la course et le groupe musculaire, les mesures montrent une réduction de la MVC, témoignant d'une fatigue globale significative, en post-course immédiat versus pré-course ($p < 0,001$).

Cependant, la comparaison des MVC en post-course immédiat entre les 2 courses ne montrent pas de différence significative de perte, ni pour l'extension du genou ni pour la flexion plantaire ($p > 0,05$).

		Pré (N)	Post (N)	% de Δ post/pré
MVC Quadriceps	Groupe MSR	694,8 ± 132,3	533,4 ± 145,6***	76 ± 10
	Groupe SSR	556,4 ± 145,8	379 ± 139,4***	68 ± 17
MVC Mollet	Groupe MSR	176,9 ± 29,2	127,5 ± 31,7***	72 ± 8
	Groupe SSR	153,6 ± 40,2	101,6 ± 31,7***	66 ± 20

Tableau 4. Moyennes des MVC pour chaque groupe musculaire (en pré et post-course immédiat) avec pourcentage de variation par rapport aux valeurs de base et comparaison des moyennes entre les 2 courses. *** $p < 0,001$.

c. Fatigue centrale (Activation volontaire)

Les mesures en post-course immédiat montrent une réduction significative de l'activation volontaire pour les 2 groupes musculaires pour le groupe SSR ($p < 0,01$) mais pas pour le groupe MSR ($p > 0,05$).

Les tests comparant la réduction de l'activation volontaire en post-course immédiat pour l'extension du genou montrent une perte significativement plus importante pour le groupe SSR que pour le groupe MSR de $-21 \pm 18\%$ vs $-5 \pm 11\%$ ($p < 0,05$).

Cependant aucune différence significative n'a été mise en évidence concernant la flexion plantaire entre le groupe SSR et le groupe MSR (respectivement de $-18 \pm 21\%$ vs $-7 \pm 14\%$; $p > 0,05$).

		Pré (%)	Post (%)	% de Δ post/pré
VA Quadriceps	Groupe MSR	89 ± 5	84 ± 11	94 ± 12
	Groupe SSR	94 ± 5	$73 \pm 18^{***}$	$78 \pm 17^{\#}$
VA Mollet	Groupe MSR	96 ± 5	89 ± 14	92 ± 13
	Groupe SSR	95 ± 9	$77 \pm 21^{**}$	81 ± 19

Tableau 5. Moyennes des VA pour chaque groupe musculaire (en pré et post-course immédiat) avec pourcentage par rapport aux valeurs de base et comparaison des moyennes entre les 2 courses.

* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$: Différence significative par rapport aux mesures de base dans le même groupe.

[#] $p < 0,05$: Différence significative au même temps donné entre les deux groupes.

d. Fatigue périphérique (Secousse musculaire simple)

Quelque soit la course et le groupe musculaire, on observe une fatigue périphérique significative, avec une diminution de l'amplitude des secousses musculaires simples en post-course immédiat versus pré-course ($p < 0,05$).

Cependant, la comparaison des secousses musculaires en post-course immédiat entre les 2 courses ne montrent pas de différence significative de perte, ni pour l'extension du genou ni pour la flexion plantaire ($p > 0,05$).

		Pré (N)	Post (N)	% de Δ post/pré
Pt Quadriceps	Groupe MSR	198,7 $\pm$ 28,6	157,9 $\pm$ 33,8*	79 $\pm$ 18
	Groupe SSR	166,5 $\pm$ 46,6	125,4 $\pm$ 45,5*	75 $\pm$ 13
Pt Mollet	Groupe MSR	37,3 $\pm$ 6,4	26,7 $\pm$ 5,9*	72 $\pm$ 14
	Groupe SSR	31,0 $\pm$ 8,1	23,5 $\pm$ 6,3*	76 $\pm$ 10

Tableau 6. Moyennes des Pt pour chaque groupe musculaire (en pré et post-course immédiat) avec pourcentage par rapport aux valeurs de base et comparaison des moyennes entre les 2 courses. * $p < 0,05$.

4) Cinétique de récupération musculaire

a. Perception subjective

En période de récupération, l'échelle EVA de quantification de la fatigue musculaire diminue significativement. A J+2, dans les 2 groupes, il persiste un ressenti significativement plus important de fatigue générale par rapport aux sensations pré-course avec une échelle EVA de 1,7 fois plus pour le groupe MSR et de 2,5 fois plus pour le groupe SSR ($p < 0,05$). Les coureurs disent ne plus ressentir de fatigue à partir de J+5 et aucune différence significative n'a été montrée ni à J+5, ni à J+10 ($p > 0,05$).

Par ailleurs, les tests ne mettent pas en évidence de différence significative de sensation de fatigue entre les 2 courses aux différents temps de récupération ($p > 0,05$), mais une tendance à se sentir moins fatigué pour les coureurs du 4 x 40 km que ceux du 160 km à J+2.

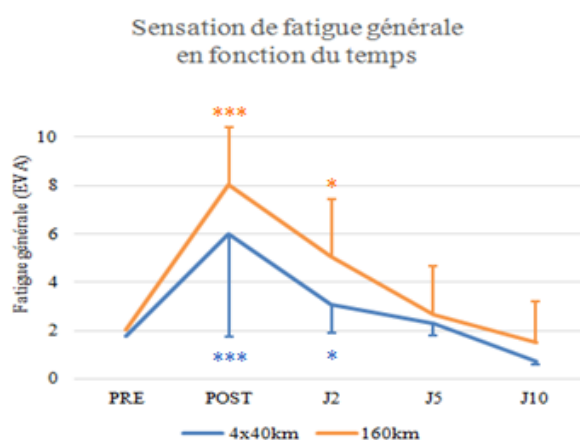


Figure 12. Evolution de l'échelle EVA, témoin de la fatigue générale dans les 2 groupes en fonction du temps. * $p < 0,05$; *** $p < 0,001$.

b. Fatigue globale (Contraction volontaire maximale)

Le tableau 7 ci-dessous rassemble les % de variations de la force maximale volontaire (MVC) par rapport à la valeur d'avant course dans les deux groupes. Les tests étudiant l'évolution de la MVC dans le temps pour la flexion plantaire montrent une différence significative par rapport aux valeurs pré-course à J+2, à J+5 et à J+10 pour le groupe MSR uniquement ($p<0,05$). Pour l'extension du genou, les tests révèlent une différence significative à J+2 et J+5 pour les 2 courses ($p<0,01$).

Par ailleurs, les tests ne retrouvent pas de différence significative aux différents temps de récupération entre les 2 courses, ni pour la flexion plantaire, ni pour l'extension du genou ($p>0,05$).

		J+2 (% de pré)	J+5 (% de pré)	J+10 (% de pré)
MVC Quadriceps	Groupe MSR	86 ± 10***	87 ± 8***	90 ± 12
	Groupe SSR	89 ± 18**	90 ± 13***	95 ± 12
MVC Mollet	Groupe MSR	91 ± 6**	92 ± 7*	95 ± 5*
	Groupe SSR	98 ± 18	102 ± 16	102 ± 14

Tableau 7. Moyennes des MVC de récupération pour chaque groupe musculaire en pourcentage par rapport aux valeurs de base et comparaison des moyennes entre les 2 courses aux différents temps. * $p<0,05$; ** $p<0,01$; *** $p<0,001$.

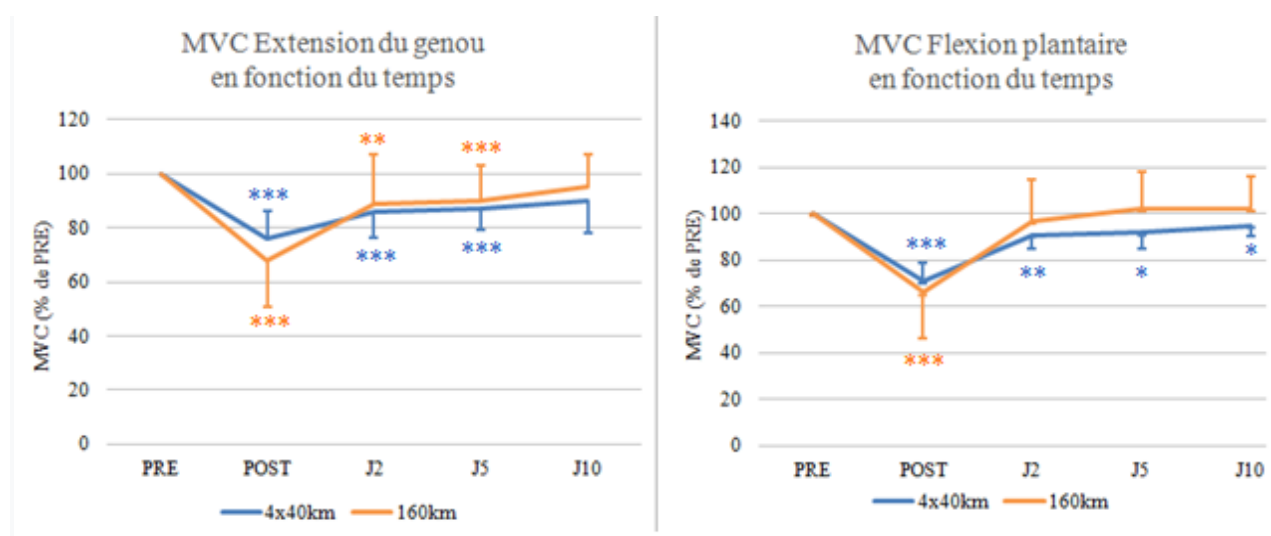


Figure 13. Comparaison de la cinétique de récupération de la MVC entre les 2 courses en fonction du temps et du groupe musculaire. * $p<0,05$; ** $p<0,01$; *** $p<0,001$.

c. Fatigue centrale (Activation volontaire)

Les tests étudiant l'évolution de l'activation volontaire dans le temps ne montrent pas de différence significative par rapport aux valeurs pré-course, quels que soient la course et le groupe musculaire étudié, que ce soit à J+2, J+5 ou J+10 ($p>0,05$).

Par ailleurs, les tests ne retrouvent pas non plus de différence significative aux différents temps de récupération entre les 2 courses, ni pour la flexion plantaire ni pour l'extension du genou ($p>0,05$).

		J+2 (% de pré)	J+5 (% de pré)	J+10 (% de pré)
VA Quadriceps	Groupe MSR	91 ± 8	92 ± 6	92 ± 8
	Groupe SSR	92 ± 12	92 ± 10	94 ± 4
VA Mollet	Groupe MSR	96 ± 8	96 ± 5	97 ± 6
	Groupe SSR	94 ± 6	95 ± 10	93 ± 7

Tableau 8. Moyennes des VA de récupération pour chaque groupe musculaire en pourcentage par rapport aux valeurs de base et comparaison des moyennes entre les 2 courses aux différent temps.

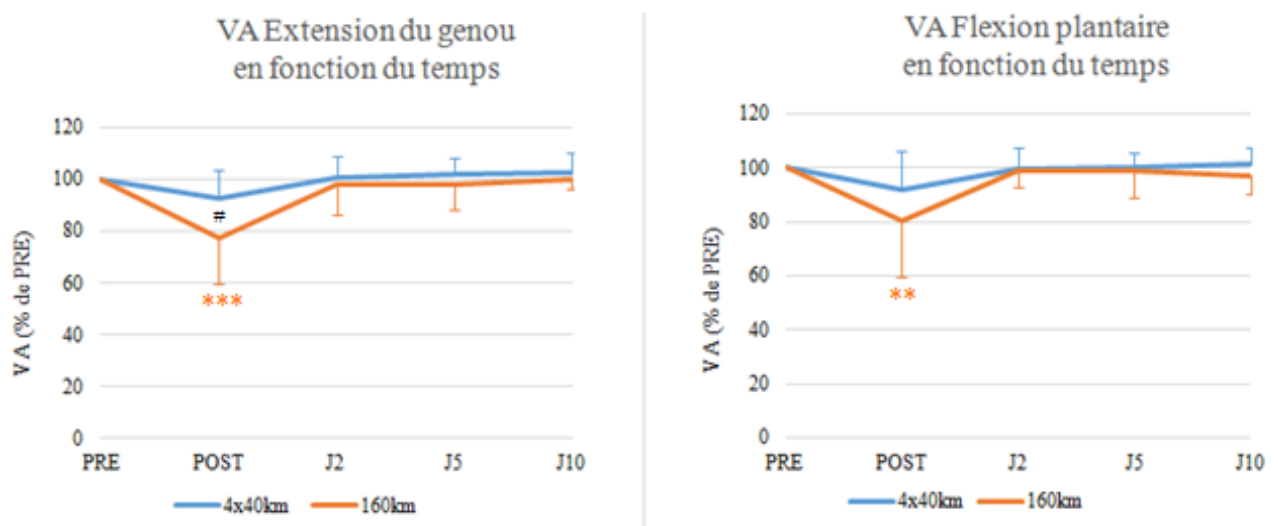


Figure 14. Comparaison de la cinétique de récupération de la VA entre les 2 courses en fonction du temps et du groupe musculaire. ** $p<0,01$; *** $p<0,001$; # $p<0,05$.

d. Fatigue périphérique (Secousse musculaire simple)

Les tests étudiant l'évolution des secousses musculaires simples dans le temps montrent des différences significatives par rapport aux valeurs pré-courses pour le groupe MSR à la fois pour l'extension du genou à J+2 et J+5 et la flexion plantaire à J+2, J+5 et J+10 ($p < 0,05$). Cependant il n'existe aucune différence significative pour le groupe SSR quels que soient le groupe musculaire et le temps de récupération ($p > 0,05$).

Par ailleurs, les tests mettent en évidence une différence significative aux différents temps de récupération entre les 2 courses pour la flexion plantaire avec une récupération plus difficile pour le groupe MSR ($p < 0,05$). Pour l'extension du genou, on observe simplement une tendance à récupérer plus difficilement pour le groupe MSR ($p > 0,05$).

		J+2 (% de pré)	J+5 (% de pré)	J+10 (% de pré)
Pt Quadriceps	Groupe MSR	87 ± 15*	85 ± 17**	97 ± 13
	Groupe SSR	91 ± 10	96 ± 18	98 ± 15
Pt Mollet	Groupe MSR	90 ± 12**	79 ± 9***	89 ± 6**
	Groupe SSR	102 ± 10 [#]	106 ± 12 [#]	104 ± 12 [#]

Tableau 9. Moyennes des Pt de récupération pour chaque groupe musculaire en pourcentage par rapport aux valeurs de base et comparaison des moyennes entre les 2 courses aux différents temps. * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; [#] $p < 0,05$.

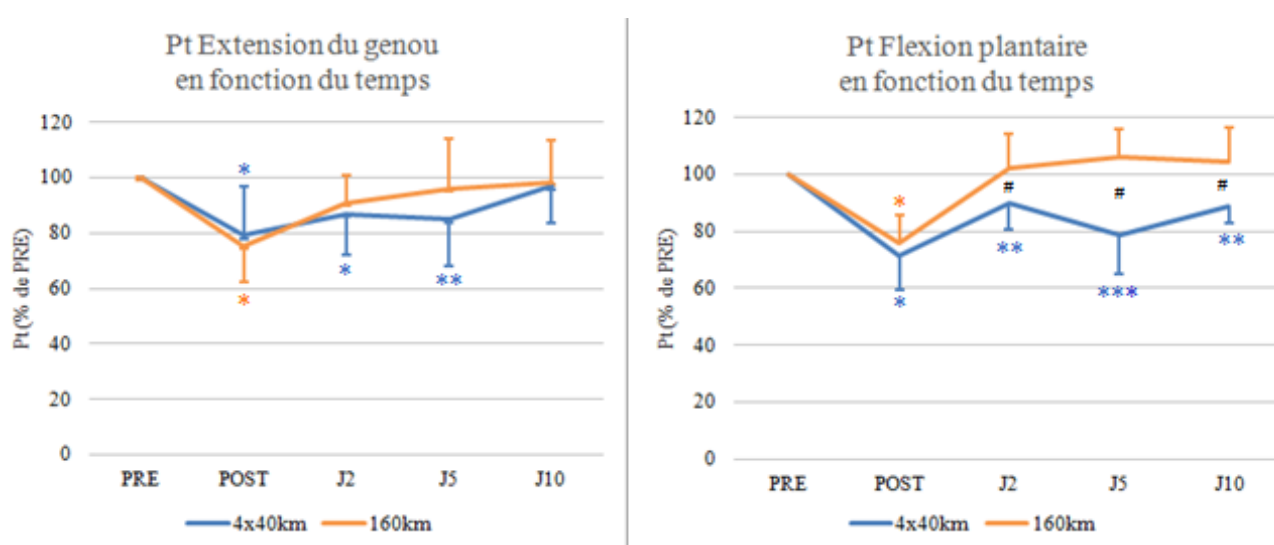


Figure 15. Comparaison de la cinétique de récupération des Pt entre les 2 courses en fonction du temps et du groupe musculaire. * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; [#] $p < 0,05$.

5) Anthropométrie

a. Poids

Les variations mesurées de poids sont identiques dans les deux groupes : pas de perte de poids significative en post-course immédiat par rapport aux valeurs de base ($p>0,05$) et pas non plus de différence significative entre les 2 groupes en post-course immédiat ($p>0,05$).

En période de récupération, on retrouve pour les 2 groupes une augmentation significative du poids à J+2 par rapport aux valeurs de base, de $0,64 \text{ kg} \pm 0,6$ pour le groupe MSR et de $0,73 \text{ kg} \pm 0,5$ pour le groupe SSR ($p<0,05$). Cependant, les résultats ne montrent pas de modification significative quel que soit le groupe ni à J+5 ni à J+10 ($p>0,05$).

Les résultats ne montrent pas non plus de différence significative concernant la variation de poids entre les 2 groupes aux différents temps de récupération ($p>0,05$).

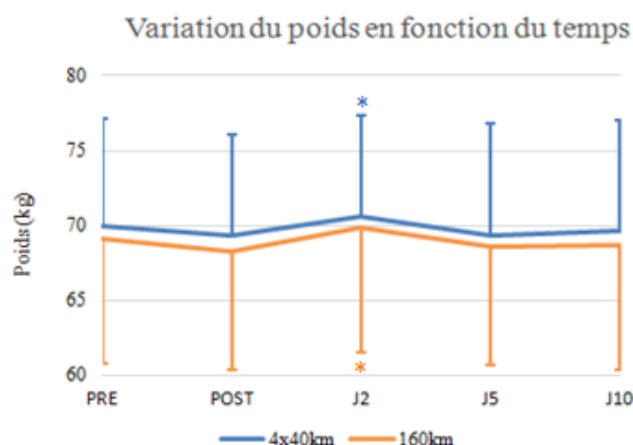


Figure 16. Evolution du poids des 2 groupes en fonction du temps. * $p<0,05$.

b. Masse grasse

Pour les 2 groupes, les résultats montrent des diminutions de masse grasse significatives en post-course immédiat par rapport aux valeurs de base, de $4,1 \% \pm 1,3$ pour le groupe MSR et de $3,1 \% \pm 0,7$ pour le groupe SSR ($p<0,001$).

Cependant, on ne note pas de différence significative concernant les variations de masse grasse entre les 2 groupes en post-course immédiat ($p>0,05$).

	Pré (%)	Post (%)	J+2 (%)	J+5 (%)	J+10 (%)
Groupe MSR	19,3 ± 4,3	15,2 ± 4,7***	14,5 ± 4,2***	17,1 ± 6,7	14,7 ± 4,2***
Groupe SSR	15,5 ± 3,2	12,4 ± 2,8***	12,2 ± 2,7***	14,9 ± 3,3	14,9 ± 3

Tableau 10. Comparaison des moyennes des masses grasses (en pré, post-course, à J+2, J+5 et J+10) entre les 2 groupes. *** $p < 0,001$.

En récupération, on retrouve pour les 2 groupes une diminution significative du pourcentage de masse grasse à J+2 par rapport aux valeurs de base, de $4,8\% \pm 1,3$ pour le groupe MSR et de $3,3\% \pm 0,7$ pour le groupe SSR ($p < 0,001$).

Par ailleurs, les résultats montrent pour les 2 groupes à J+5, la persistance d'une diminution du pourcentage de masse grasse de manière moins marquée qu'à J+2 avec un aspect de léger rebond, de $2,2\% \pm 2,1$ pour le groupe MSR et de $0,6\% \pm 0,5$ pour le groupe SSR ($p < 0,05$). Cette tendance se confirme à J+10 pour le groupe SSR, alors que pour le groupe MSR on observe une nouvelle diminution du pourcentage de masse grasse, respectivement de $0,6\% \pm 0,6$ et de $4,6\% \pm 0,9$.

On observe par contre aucune différence significative concernant la variation de masse corporelle en comparant les 2 groupes aux différents temps de récupération ($p > 0,05$).

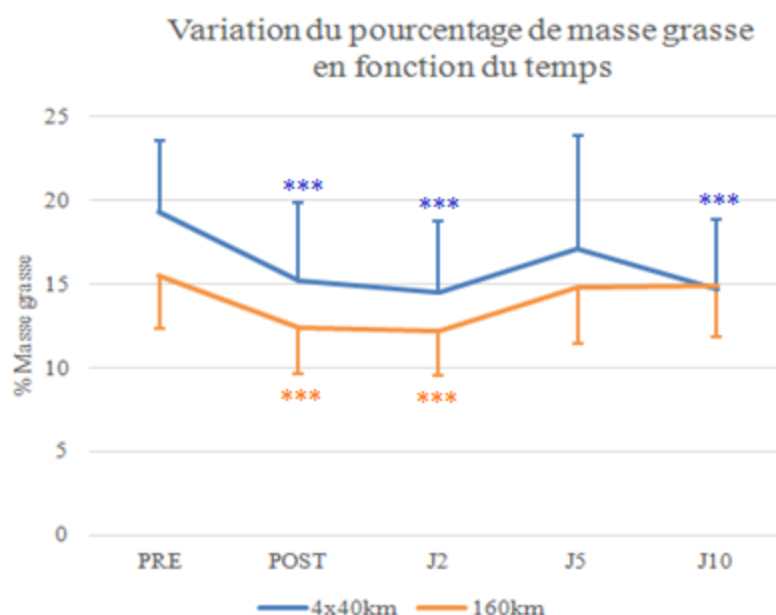


Figure 17. Evolution de la variation des pourcentages de masse grasse des 2 groupes en fonction du temps. *** $p < 0,001$.

6) Douleurs musculaires

a. Mollets

Pour les 2 groupes, les résultats montrent un ressenti significativement plus important concernant les douleurs de mollets en post-course immédiat par rapport aux sensations pré-course de 17,6 fois plus pour le groupe MSR, et de 6,4 fois plus pour le groupe SSR ($p < 0,001$) mais aucune différence de ressenti entre les deux courses ($p > 0,05$).

	Pré (EVA)	Post (EVA)	Rapport post/pré
Groupe MSR	0,3 ± 0,5	5,3 ± 1,9***	17,6
Groupe SSR	0,8 ± 1	5,1 ± 3,6***	6,4

Tableau 11. Moyennes des sensations de douleurs des mollets évaluées par EVA (entre pré et post-course immédiat) avec rapports des moyennes. *** $p < 0,001$.

En période de récupération, on note pour les 2 groupes un ressenti significativement plus important au niveau des douleurs des mollets à J+2 par rapport aux sensations pré-course de 3,7 fois plus pour le groupe MSR et de 2,8 fois plus pour le groupe SSR ($p < 0,05$).

Cependant les tests ne mettent pas en évidence de différence significative concernant les sensations de douleurs des mollets entre les 2 courses aux différents temps de récupération ($p > 0,05$).

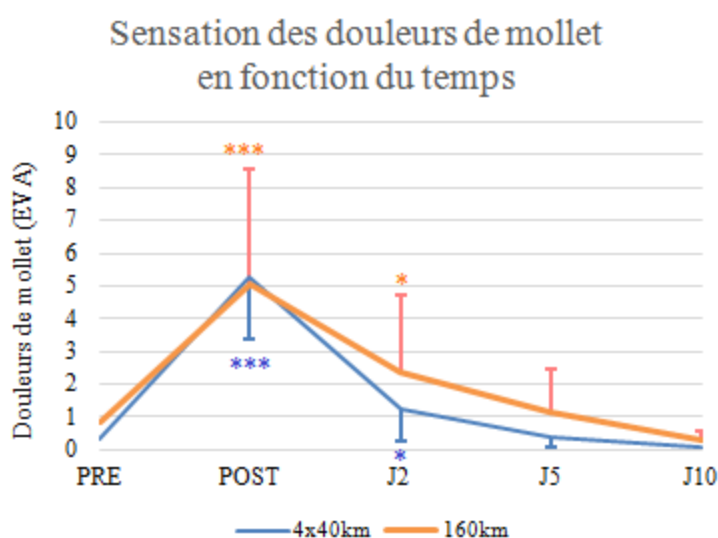


Figure 18. Evolution des sensations de douleurs des mollets des 2 groupes en fonction du temps. * $p < 0,05$; *** $p < 0,001$.

b. Quadriceps

Pour les 2 groupes, les résultats montrent un ressenti significativement plus important concernant les douleurs de cuisses en post-course immédiat par rapport aux sensations pré-course de 9,7 fois plus pour le groupe MSR, et de 9 fois plus pour le groupe SSR ($p < 0,001$).

	Pré (EVA)	Post (EVA)	Rapport post/pré
Groupe MSR	$0,6 \pm 0,9$	$5,8 \pm 1,9^{***}$	9,7
Groupe SSR	$0,7 \pm 0,9$	$6,3 \pm 2,6^{***}$	9

Tableau 12. Moyennes des sensations de douleurs des cuisses évaluées par EVA (entre pré-course et post-course immédiat) avec rapport des moyennes. *** $p < 0,001$.

En période de récupération, on note pour les 2 groupes un ressenti significativement plus important au niveau des douleurs de cuisses à J+2 par rapport aux sensations pré-course de 2,9 fois plus pour le groupe MSR et de 3,5 fois plus pour le groupe SSR ($p < 0,05$).

Cependant, les tests ne mettent pas en évidence de différence significative au niveau des sensations de douleurs de cuisses entre les 2 courses aux différents temps de récupération ($p > 0,05$).

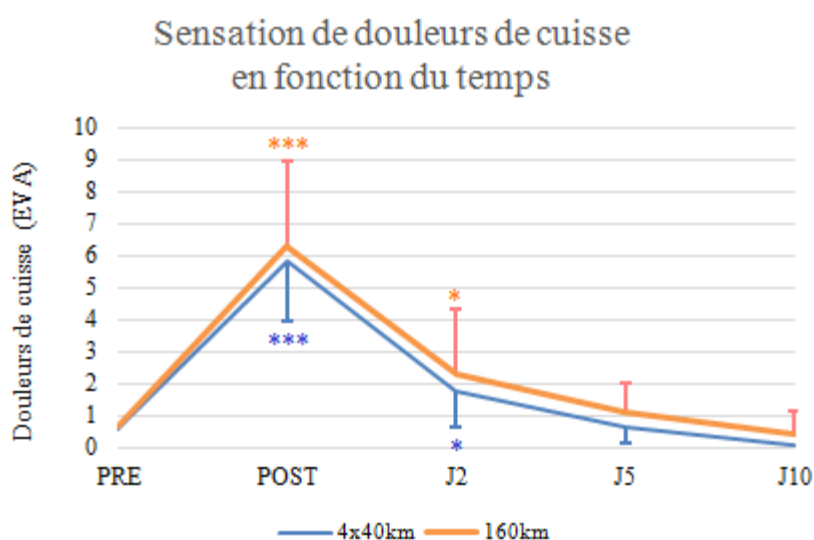


Figure 19. Evolution des sensations de douleurs des cuisses des 2 groupes en fonction du temps. * $p < 0,05$; *** $p < 0,001$.

V. DISCUSSION

L'objectif principal de cette étude était de comparer les conséquences d'un Ultra-Trail sur la fatigue neuromusculaire et la cinétique de récupération dans deux formats de course différents (une seule étape ou plusieurs étapes) sur deux groupes musculaires impliqués dans la course à pied (extenseurs du genou et fléchisseurs plantaires).

Les résultats principaux montrent une fatigue centrale plus importante chez les coureurs réalisant la distance en une fois uniquement pour le quadriceps, mais une récupération de la fatigue périphérique plus longue pour le groupe MSR concernant les deux groupes musculaires.

1) Fatigue

a. Globale

Comme précédemment rapporté par Giandolini et Millet (18,15), la perte de force musculaire augmente considérablement avec la distance et la durée de l'exercice pendant les premières heures d'effort jusqu'à atteindre un plateau. La perte de force musculaire mesurée dans notre étude sur les deux groupes musculaires était similaire aux précédents résultats pour une durée de course similaire.

Sur une distance beaucoup plus longue (Ultra-Trail de 330 km), Saugy *et al.* (19) ont étudié la force musculaire à mi-distance (c'est-à-dire 149 km) et à la fin de la course et ont rapporté une diminution de la contraction volontaire maximale environ 2 fois plus importante pour l'extension du genou et 2,5 fois plus importante pour la flexion plantaire en fin de course par rapport à la mi-course.

Dans des conditions extrêmes, les coureurs adoptent probablement une stratégie de course conservatrice pour éviter un abandon précoce, notamment en réduisant leur vitesse de course.

Grâce aux temps mesurés après la première partie de course (40km), on note que le groupe MSR parcourt cette même distance plus rapidement d'environ 50 minutes que le groupe SSR, donc à une intensité plus importante.

b. Centrale

Dans notre étude, on observe une diminution de la capacité d'activation volontaire des extenseurs du genou et des fléchisseurs plantaires à la fin de la course chez les coureurs du groupe SSR.

La diminution d'activation volontaire était d'environ 21% pour l'extension du genou et était comparable aux précédentes observations sur 110, 166 et 320 km rapportées dans d'autres études (respectivement de 22% (3), 19% (18) et 23% (19)).

Il est probable qu'à partir d'un certain niveau de fatigue globale, l'amplitude de la réduction de l'activation volontaire tend à se stabiliser.

La plus grande perte d'activation volontaire observée d'environ 33% par Martin *et al.* lors d'une étude de 24h sur tapis roulant était peut-être due à un délai plus court entre la fin de course et les tests post-épreuves (2). Nos délais moyens étaient de 24 minutes pour les tests sur les coureurs du groupe SSR et de 28 minutes pour ceux du groupe MSR.

La composante centrale de la fatigue a été décrite comme un mécanisme de protection pour limiter les dommages musculaires (23,29). Les recherches sur la stimulation magnétique trans-crânienne réalisées par Temesi *et al.* (3) ont montré que l'activation volontaire mesurée était diminuée après une distance de 110 km, cependant la contribution de la part spinale reste encore inconnue (26).

En post-course immédiat, les différences d'activation volontaire constatées entre les 2 courses pourraient être principalement dues à des différences dans l'intensité d'exercice. Une étude récente réalisée par Thomas *et al.* sur un groupe de cyclistes a montré que la fatigue centrale est accentuée au fur et à mesure de l'augmentation de la durée de l'exercice et de la diminution de l'intensité (23).

Même si notre étude a été réalisée sur du Trail-Running et sur un exercice plus long, ces résultats sont en accord avec nos données mesurées lors de la comparaison du groupe MSR (exercice plus intense) et du groupe SSR (exercice moins intense).

Une réduction de la sensibilité réflexe due aux étirements répétitifs des muscles squelettiques (réduction de la facilitation des réflex spinaux de certaines fibres afférentes) a été suggérée comme étant associée à une fatigue centrale après un exercice d'ultra-endurance (26). Nous avons suggéré qu'une récupération de cette disfacilitation entre les différentes étapes pour le groupe MSR pourrait expliquer les différences d'activation volontaire en post-immédiat entre les 2 courses. Par ailleurs, la diminution de l'activation volontaire mesurée pour le groupe MSR en post-immédiat était probablement principalement induite par la dernière étape. Il aurait été intéressant de tester les participants du groupe MSR avant le début de chaque étape pour quantifier la récupération entre les étapes et cela pourrait représenter un domaine de recherche future.

c. Périphérique

Dans le groupe SSR, on a observé une diminution significative de l'amplitude de la secousse musculaire simple immédiatement après la course pour les 2 groupes musculaires, de 25% pour l'extension du genou et de 24% pour la flexion plantaire.

Cette perte observée pour l'extension du genou est similaire avec les précédents résultats de Millet *et al.* (19) sur même distance de 160 km (-22%), plus grande que ceux de Temessi *et al.* (23) sur 110km (-14%) et plus petite que ceux de Saugy *et al.* (19) sur 320 km (-34%).

Pour la flexion plantaire, la diminution de l'amplitude de la secousse musculaire est plutôt stable entre les différentes études et ne semble pas être fonction de la distance. Une explication possible est le fait que les coureurs trouvent des stratégies de compensation de cette fatigue périphérique au niveau plantaire par des ajustements biomécaniques en adaptant la fréquence de pas, les mouvements de cheville et la pose du pied (31).

Dans le groupe MSR, malgré un temps de récupération relativement important entre les différentes étapes (environ 15 heures), les coureurs montrent une fatigue périphérique similaire pour les 2 groupes musculaires immédiatement après la course par rapport aux coureurs du groupe SSR. Cela traduit donc une fatigue plus périphérique par rapport à la fatigue neuromusculaire totale (c'est-à-dire centrale et périphérique) pour le groupe MSR.

A la différence de la composante centrale de la fatigue, la fatigue périphérique est donc plus importante sur des courses de plus courte distance mais d'intensité plus élevées (21).

En effet, Giandolini et coll (25) ont montré le développement d'une fatigue périphérique plus importante après une descente intense de 6,5 km, avec une baisse de l'amplitude de secousse musculaire d'environ 43 % pour l'extension du genou et d'environ 29 % pour la flexion plantaire. Ainsi, le niveau de fatigue périphérique et les dommages musculaires augmentent avec l'importance du dénivelé négatif et de la vitesse à laquelle la descente a été effectuée, en raison du travail de contraction excentrique imposé quadriceps.

Il semble qu'un travail excentrique répétitif soit à l'origine d'un dommage musculaire ayant pour conséquence une altération du couplage excitation/contraction avec une perte de force induite au niveau musculaire immédiatement après la course (28).

d. Prévention et blessure

La répétition des contraintes mécaniques augmente la prévalence des blessures musculo-squelettiques. Hoffman et Krishnan en 2014 l'ont mis en évidence chez les coureurs d'ultra-endurance (20,29,30). Les origines de ces blessures sont nombreuses. Parmi celles-ci, la répétition importante des chocs et des vibrations induites au niveau musculo-squelettiques peuvent potentiellement constituer un facteur de risque non négligeable. Des études récentes ont montré que la technique de pose du pied avait une incidence sur la localisation et l'intensité des contraintes appliquées au niveau du système musculo-squelettique. En effet, une thèse réalisée sur « la Gestion de l'impact et de la fatigue neuromusculaire en Trail-Running » par Marlène Giandolini a mis en évidence qu'en attaquant le sol par l'avant du pied, on augmentait la fatigue neuromusculaire aux extenseurs du genou. En revanche, en variant les patterns de pose de pied lors de la descente, on observait une diminution de la fatigue neuromusculaire des extenseurs du genou et de la flexion plantaire (20).

Même si aucune étude n'a mis en évidence de lien clair entre la fatigue et le risque de blessures dans le milieu du trail, il a clairement été démontré que c'est un facteur favorisant leur survenue, du fait d'un moins bon contrôle du mouvement et de la stabilité articulaire.

Des études complémentaires sont nécessaires afin de préciser s'il existe un lien entre la fatigue, par la pose du pied par exemple, et la fréquence des blessures en trail.

Néanmoins, en cabinet de médecine générale, lors de la rédaction d'un certificat de non contre-indication à la pratique du trail sur des courtes distances et d'intensité importante, on peut conseiller de « changer de pose de pied » régulièrement pendant la course afin de diminuer les contraintes physiologiques au niveau du système musculo-squelettique et probablement de réduire les blessures associées (20).

2) Cinétique de récupération

A notre connaissance, cette étude est seulement la deuxième étude, après Millet *et al.* (18), ayant étudié la cinétique de récupération après une course d'Ultra-Trail. C'est aussi la première étude qui a étudié la récupération sur des courses par étape.

Les coureurs du groupe SSR ont présenté une fatigue subjective plus importante après 2 jours de récupération que ceux du groupe MSR. Il n'y a pas de lien avec les douleurs ressenties au même moment au niveau du mollet. Par contre, les coureurs des 2 courses présentaient toujours des douleurs au niveau des cuisses avec un rapport de ressenti plus faible au deuxième jour de récupération.

Pour le groupe SSR, nos résultats sont cohérents avec Millet *et al.* (18), avec des pertes de contraction volontaire maximales de 10% pour l'extension du genou après 5 jours de récupération, mais aucune perte pour la flexion plantaire à la différence du groupe MSR.

Par ailleurs, les analyses statistiques n'ont pas montré de différence significative de contraction volontaire maximale entre les 2 courses, aux différents temps de récupération, que ce soit pour la flexion plantaire ou l'extension du genou. On observe cependant une tendance à une récupération plus lente de la contraction volontaire maximale pour le groupe MSR au niveau de la flexion plantaire.

Dans notre étude, la fatigue centrale, présentée comme l'un des principaux facteurs de fatigue neuromusculaire de l'extension du genou, récupère complètement après 2 jours pour les 2 groupes, en accord avec les observations précédentes (2,19,25)

Au niveau central, il existe plusieurs mécanismes qui seraient responsables de l'altération de l'excitabilité motoneuronale au cours de l'exercice, avec une influence sur le tonus des fibres nerveuses afférentes d'origine musculaire. En effet, les afférences de type III-IV, activées par des processus mécaniques ou par l'accumulation de métabolites intramusculaires pro-inflammatoires, peuvent avoir une influence facilitatrice ou inhibitrice sur l'excitabilité motoneuronale (13,20,26). Cependant, Millet et coll. (18) ont montré après un Ultra-Trail de 166 km une augmentation du processus inflammatoire, avec une augmentation de la CRP sans augmentation évidente de la fatigue centrale 2 jours après la course. Les afférences de type III-IV ne semblent donc pas être responsable de la fatigue centrale 2 jours après une course d'Ultra-Trail.

Il serait intéressant d'étudier d'autres mécanismes physiologiques pouvant expliquer cette fatigue centrale. Ces mécanismes peuvent d'ailleurs différer d'un individu à l'autre, et les programmes d'entraînement pourraient influencer ces différences et performances de courses.

Même si on n'observe pas de différence significative de fatigue périphérique liée à la perte de secousse musculaire entre les 2 groupes immédiatement après la course, la fatigue périphérique nécessite plus de temps pour récupérer pour le groupe MSR par rapport au groupe SSR en raison de l'intensité de course développée plus importante.

La différence principale entre le groupe SSR et MSR apparaît au niveau musculaire.

En effet, les coureurs du groupe MSR ont couru la course à une intensité plus élevée que les coureurs du groupe SSR, ce que signifie qu'ils développent une force musculaire plus importante en phase concentrique (ou propulsive) et des contractions excentriques plus importantes pour absorber un niveau de charge plus élevé en raison d'une vitesse de course plus importante, en particulier dans les descentes (33).

Il est bien connu qu'un exercice excentrique répétitif crée un certain dommage musculaire (31). Plusieurs auteurs ont suggéré que le temps de récupération de ces dommages était proportionnel au niveau de charge excentrique imposé au muscle (32). De tels changements de réponses évoqués peuvent être attribués à une altération du couplage excitation-contraction au niveau des sarcomères avec une baisse de la force produite par les ponts actine-myosine (14,18,33).

D'autres études seraient nécessaires pour explorer les origines précises de la persistance de la fatigue périphérique lors de la récupération de courses d'ultra-endurance, en particulier à étapes.

Les différences observées entre les 2 courses, tant sur la fatigue que sur la récupération, peuvent résulter d'une gestion différente de l'intensité de l'effort. On nomme ce phénomène le pacing (34).

Différents programmes d'entraînement sont basés sur le pacing afin d'augmenter la performance en Trail quelque soit la distance. Ces programmes basés sur l'optimisation de l'intensité maximale de course par rapport à la fréquence cardiaque permettent d'épargner les réserves en glycogène au niveau musculaire et permettent de retarder l'apparition d'une fatigue musculaire dite périphérique.

Dans une étude future, il serait intéressant d'étudier les différents programmes d'entraînement de chaque coureur par rapport à l'impact et l'influence sur la phase de récupération.

3) Anthropométrie

Les objectifs secondaires de cette étude étaient de quantifier les données anthropométriques en étudiant les variations de poids et de masse grasse.

a. Poids

Pour les 2 groupes, il n'y a pas de perte de poids significative immédiatement après la course. Ces résultats sont en accord avec une étude récente réalisée sur un Trail de 67 km visant à évaluer les variations de poids des différents coureurs (35). Cependant lors d'un exercice prolongé, il existe des pertes de poids équivalentes à des pertes hydriques qui varient en fonction des conditions climatiques. Des études réalisées sur des coureurs en laboratoire lors d'un effort de type aérobie ont montré qu'une déshydratation entraînait une réduction de la volémie avec une augmentation du travail cardiaque, une augmentation de la consommation en oxygène et une augmentation significative de la température centrale (36,37).

D'après certaines études, on considère qu'une déshydratation de 1 % (0,7 litres pour un individu de 70 kg) diminue la performance de 10% lors d'un exercice prolongé (36).

Par ailleurs en phase de récupération, on a montré pour les 2 groupes une augmentation significative du poids à J+2, de 0,64 kg pour le groupe MSR et de 0,73 kg pour le groupe SSR. Cette prise de poids en phase de récupération pourrait être attribuée au développement d'une insuffisance cardiaque transitoire après un tel effort.

Il a ainsi été largement montré que l'on pouvait observer après un effort intense et prolongé de type marathon, une dysfonction systolique et diastolique réversible du ventricule gauche entraînant des modifications aiguës de la performance globale myocardique (38,39).

Les courses d'endurance, à partir de 4 heures d'effort, ont des conséquences sur le myocarde détectables en échographie (40), on nomme ce phénomène « fatigue cardiaque induite par l'exercice » (41).

Dans le cadre de cette même étude, la fatigue et la récupération myocardique ont été étudiés. Les résultats ont montré pour les 2 courses une adaptation biphasique de la fréquence cardiaque entre le début et la fin de la course, avec une réponse cardiaque spécifique caractérisée par une augmentation progressive du remplissage diastolique immédiatement après la course, et une augmentation progressive du volume des 4 cavités du cœur jusque J+2 en période de récupération.

b. Masse grasse

Concernant la variation de masse grasse, pour les 2 groupes, on a montré des pertes significatives immédiatement après la course de 3,1 % pour le groupe SSR et de 4,1 % pour le groupe MSR. Ces pertes sont retrouvées en phase de récupération jusqu'au 10^{ème} jour.

Les épreuves d'ultra-endurance se caractérisent par une dépense énergétique particulièrement importante et une balance énergétique généralement très négative (34-37).

La filière aérobie correspond à la filière de l'endurance où les efforts sont d'une intensité faible mais d'une durée longue.

Elle permet la synthèse d'un substrat énergétique, l'adénosine triphosphate (ATP), grâce à la dégradation du glucose ou des acides gras (via la bêta-oxydation puis la glycolyse). Les substrats principaux utilisés lors d'un exercice prolongé en condition aérobie sont les hydrates de carbone (HCO) et les lipides.

Ces deux chaînes de réactions sont plus longues que la filière anaérobie et développe une puissance plus faible.

L'utilisation des différents substrats dépend de la durée de l'exercice et de l'apport exogène (gel, barre, alimentation) pendant l'exercice (38).

Le stock de lipides est potentiellement inépuisable et le pourcentage de masse grasse n'a pas d'influence sur la performance des coureurs dans les dernières études réalisées (35). En revanche, le taux d'hydrates de carbone est limité et peut être un facteur limitant à l'exercice (43). Peu de choses sont connues sur l'équilibre glycémique lors d'efforts de très longues distances en Ultra-Trail. Or ces courses de montagne s'accompagnent de dommages musculaires importants, du relargage de cytokines pro-inflammatoires et d'acides gras libres qui vont diminuer la sensibilité à l'insuline (45-47).

En 2020, l'équipe de recherche de l'UT4M va donc étudier l'évolution du taux de glucose dans le sang pendant différentes courses à l'aide d'un capteur glycémique portatif. Ceci devrait permettre d'évaluer l'impact de l'alimentation et de l'hydratation sur les performances et la fatigue.

4) Forces et limites de l'étude

Notre étude s'intéresse à un sujet en plein développement mais qui est encore peu traité dans la littérature. Nous avons choisi l'UT4M devant la multiplicité des formats de courses disponibles, notamment celui à étape. Le nombre de coureurs inscrits à la course était important ce qui permettait de recruter un nombre suffisant de coureurs.

Nos 49 coureurs au départ de la course répondaient aux critères d'éligibilité, cependant 15 coureurs ont abandonné pour différentes raisons liées la plupart du temps à des blessures ou à une fatigue générale importante. Ils ont globalement tous très bien toléré les tests de neurostimulation.

Au final nous avons 17 coureurs représentés dans le groupe SSR et 15 coureurs dans le groupe MSR. Pour garantir une puissance suffisante, il était nécessaire de recruter 30 coureurs dans le groupe SSR et 20 coureurs dans le groupe MSR.

Nous avons peu de données manquantes et le temps d'évaluation entre la fin de la course et les tests post-course était respecté. Les encouragements lors des différents tests permettaient de stimuler les coureurs sur le plan neuromusculaire de façon optimale. Notre étude présente également une très bonne validité externe, avec des résultats cohérents avec la littérature à notre disposition.

Ce travail comporte quelques limites concernant la proportion d'homme et de femmes étudiée. En effet, dans les 2 groupes nous avons plus d'hommes représentés que de femmes. Nous avons néanmoins vérifié que l'échantillon restait représentatif des « finishers » sur l'âge. Par ailleurs, les 2 balances utilisées pour mesurer le poids et le pourcentage de masse grasse étaient différents entre les 2 groupes ce qui peut expliquer des variabilités de mesures rencontrées concernant la masse grasse.

VI. CONCLUSION

Ces résultats indiquent que la nature même de la fatigue diffère en fonction du format de course.

Pour le même parcours, courir 160 km en une seule étape induit plus de fatigue centrale mais un temps de récupération de la composante périphérique plus rapide comparé à une course en plusieurs étapes.

Même si les coureurs de la course à plusieurs étapes ont mis environ 12 heures de moins sur le parcours et ont bénéficié d'environ 15 heures de récupération entre chaque étape par rapport aux coureurs à une étape, la répétition de la course à une intensité plus élevée a induit une fatigue périphérique plus importante et une récupération plus longue.

Ces données soulignent la spécificité des courses de montagne multi-étapes en ce qui concerne l'étiologie et la récupération de la fatigue neuromusculaire. Ce format constitue un modèle de course tout à fait à part que l'on pourrait assimiler à un certain état de surentraînement, avec une sollicitation de l'organisme d'une façon particulière qu'il ne faut pas sous-estimer, en particulier, en termes de récupération après la course.

Cette étude doit permettre de mieux caractériser le niveau de fatigue induit, ses différentes composantes, ainsi que sa récupération dans les jours suivant ces 2 types d'épreuve afin de fournir des éléments importants de compréhension et de prévention des contraintes physiologiques associées à ce type de pratique sportive pour aider les médecins et les physiothérapeutes à guider les athlètes et les entraîneurs.

Même si notre étude ne s'est pas intéressée spécifiquement aux blessures, ces résultats nécessitent de prévenir les coureurs d'un risque accru de blessures pendant les phases de fatigue.

D'autres études impliquant des évaluations PRE-POST pour chaque étape pourraient fournir des données supplémentaires sur les processus de récupération de fatigue induits à différentes reprises par les courses à plusieurs étapes.

THÈSE SOUTENUE PAR : Matthieu MARECHAL, Franck BOUQUET

TITRE :

LA FATIGUE NEUROMUSCULAIRE SECONDAIRE A L'ULTRA-TRAIL :
COMPARAISON DE DEUX FORMATS DE COURSE DE MÊME DISTANCE.

CONCLUSION :

Ces résultats indiquent que la nature même de la fatigue diffère en fonction du format de course.

Pour le même parcours, courir 160 km en une seule étape induit plus de fatigue centrale mais un temps de récupération de la composante périphérique plus rapide comparé à une course en plusieurs étapes.

Même si les coureurs de la course à plusieurs étapes ont mis environ 12 heures de moins sur le parcours et ont bénéficié d'environ 15 heures de récupération entre chaque étape par rapport aux coureurs à une étape, la répétition de la course à une intensité plus élevée a induit une fatigue périphérique plus importante et une récupération plus longue.

Ces données soulignent la spécificité des courses de montagne multi-étapes en ce qui concerne l'étiologie et la récupération de la fatigue neuromusculaire. Ce format constitue un modèle de course tout à fait à part que l'on pourrait assimiler à un certain état de surentraînement, avec une sollicitation de l'organisme d'une façon particulière qu'il ne faut pas sous-estimer, en particulier, en termes de récupération après la course.

Cette étude doit permettre de mieux caractériser le niveau de fatigue induit, ses différentes composantes, ainsi que sa récupération dans les jours suivant ces 2 types d'épreuve afin de fournir des éléments importants de compréhension et de prévention des contraintes physiologiques associées à ce type de pratique sportive pour aider les médecins et les physiothérapeutes à guider les athlètes et les entraîneurs.

Même si notre étude ne s'est pas intéressée spécifiquement aux blessures, ces résultats nécessitent de prévenir les coureurs d'un risque accru de blessures pendant les phases de fatigue.

D'autres études impliquant des évaluations PRE-POST pour chaque étape pourraient fournir des données supplémentaires sur les processus de récupération de fatigue induits à différentes reprises par les courses à plusieurs étapes.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER

Grenoble, le : 28/02/20

LE DOYEN



Pr. Patrice MORAND

Pour le Président
et par délégation
Le Doyen de Médecins
Pr. Patrice MORAND

LE PRÉSIDENT DE LA THÈSE
CENTRE HOSPITALIER UNIVERSITAIRE
GRENOBLE ALPES
POLE ANESTHÉSIE-REANIMATION
Professeur Pierre BOUZAT

Pr. Pierre BOUZAT

VII. BIBLIOGRAPHIE

1. Millet GY, Lepers R, Maffiuletti NA, Babault N, Martin V, Lattier G. Alterations of neuromuscular function after an ultramarathon. *J Appl Physiol* 2002;92(2):486-92.
2. Martin V, Kerhervé H, Messonnier LA, Banfi J-C, Geyssant A, Bonnefoy R, et al. Central and peripheral contributions to neuromuscular fatigue induced by a 24-h treadmill run. *J Appl Physiol* 2010;108(5):1224-33.
3. Temesi J, Rupp T, Martin V, Arnal PJ, Féasson L, Verges S, et al. Central fatigue assessed by transcranial magnetic stimulation in ultratrail running. *Med Sci Sports Exerc* 2014;46(6):1166-75.
4. Millet GY, Martin V, Lattier G, Ballay Y. Mechanisms contributing to knee extensor strength loss after prolonged running exercise. *J Appl Physiol* 2003;94(1):193-8.
5. Dawson E, George K, Shave R, Whyte G, Ball D. Does the human heart fatigue subsequent to prolonged exercise? *Sports Med Auckl NZ* 2003;33(5):365-80.
6. Lahart IM, Lane AM, Hulton A, Williams K, Godfrey R, Pedlar C, et al. Challenges in Maintaining Emotion Regulation in a Sleep and Energy Deprived State Induced by the 4800Km Ultra-Endurance Bicycle Race; The Race Across AMERICA (RAAM). *J Sports Sci Med* 2013;12(3):481-8.
7. Tam N, Coetzee DR, Ahmed S, Lamberts RP, Albertus-Kajee Y, Tucker R. Acute fatigue negatively affects risk factors for injury in trained but not well-trained habitually shod runners when running barefoot. *Eur J Sport Sci* 2017;17(9):1220-9.
8. Radin EL. Role of muscles in protecting athletes from injury. *Acta Med Scand Suppl* 1986;711:143-7.
9. Rodrigues KA, Soares RJ, Tomazini JE. The influence of fatigue in evertor muscles during lateral ankle sprain. *Foot Edinb Scotl* 2019;40:98-104.
10. Alentorn-Geli E, Myer GD, Silvers HJ, Samitier G, Romero D, Lázaro-Haro C, et al. Prevention of non-contact anterior cruciate ligament injuries in soccer

players. Part 1: Mechanisms of injury and underlying risk factors. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2009;17(7):705-29.

11. Johnston RB, Howard ME, Cawley PW, Losse GM. Effect of lower extremity muscular fatigue on motor control performance. *Med Sci Sports Exerc* 1998;30(12):1703-7.

12. Hespanhol LC, van Mechelen W, Verhagen E. Effectiveness of online tailored advice to prevent running-related injuries and promote preventive behaviour in Dutch trail runners: a pragmatic randomised controlled trial. *Br J Sports Med* 2018;52(13):851-8.

13. Ducrocq G. Influence des mécanismes de régulation de la fatigue neuromusculaire sur la performance motrice. Université Côte d'Azur, 2017.

14. Gandevia SC. Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiol Rev* 2001;81(4):1725-89.

15. Duchateau J, Enoka RM. Human motor unit recordings: origins and insight into the integrated motor system. *Brain Res* 2011;1409:42-61.

16. Merton PA. Voluntary strength and fatigue. *J Physiol* 1954;123(3):553-64.

17. Reid C. The Mechanism of Voluntary Muscular Fatigue. *Br Med J* 1927;2(3481):545-6.

18. Millet GY, Tomazin K, Verges S, Vincent C, Bonnefoy R, Boisson R-C, et al. Neuromuscular consequences of an extreme mountain ultra-marathon. *PloS One* 2011;6(2):e17059.

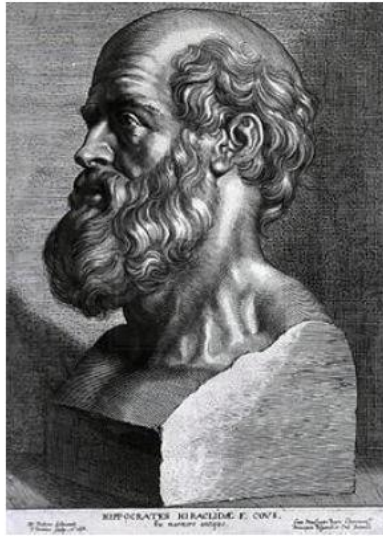
19. Saugy J, Place N, Millet GY, Degache F, Schena F, Millet GP. Alterations of Neuromuscular Function after the World's Most Challenging Mountain Ultra-Marathon. *PloS One* 2013;8(6):e65596.

20. Marlène Giandolini. Gestion de l'impact et de la fatigue neuromusculaire en trail running. Université Jean Monnet - Saint-Etienne, 2015.

21. Gauche E, Lepers R, Rabita G, Leveque J-M, Bishop D, Brisswalter J, et al. Vitamin and mineral supplementation and neuromuscular recovery after a running race. *Med Sci Sports Exerc* 2006;38(12):2110-7.
22. Rasmussen P, Secher NH, Petersen NT. Understanding central fatigue: where to go? *Exp Physiol* 2007;92(2):369-70.
23. Temesi J, Arnal PJ, Rupp T, FéAsson L, Cartier R, Gergelé L, et al. Are Females More Resistant to Extreme Neuromuscular Fatigue? *Med Sci Sports Exerc* 2015;47(7):1372-82.
24. Boccia G, Dardanello D, Zoppirolli C, Bortolan L, Cescon C, Schneebeil A, et al. Central and peripheral fatigue in knee and elbow extensor muscles after a long-distance cross-country ski race. *Scand J Med Sci Sports* 2017;27(9):945-55.
25. Giandolini M, Horvais N, Rossi J, Millet GY, Morin J-B, Samozino P. Acute and delayed peripheral and central neuromuscular alterations induced by a short and intense downhill trail run: Fatigue after a downhill trail run. *Scand J Med Sci Sports* 2016;26(11):1321-33.
26. Millet GY, Martin V, Temesi J. The role of the nervous system in neuromuscular fatigue induced by ultra-endurance exercise. *Appl Physiol Nutr Metab* 2018;43(11):1151-7.
27. Thomas K, Elmeua M, Howatson G, Goodall S. Intensity-Dependent Contribution of Neuromuscular Fatigue after Constant-Load Cycling. *Med Sci Sports Exerc* 2016;48(9):1751-60.
28. Martin V, Millet GY, Lattier G, Perrod L. Why does knee extensor muscles torque decrease after eccentric-type exercise? *J Sports Med Phys Fitness* 2005;45(2):143-51.
29. Van Mechelen W. Running injuries. A review of the epidemiological literature. *Sports Med Auckl NZ* 1992;14(5):320-35.
30. Hoffman MD, Krishnan E. Health and exercise-related medical issues among 1,212 ultramarathon runners: baseline findings from the Ultrarunners Longitudinal TRacking (ULTRA) Study. *PloS One* 2014;9(1):e83867.

31. Nosaka K, Sakamoto K, Newton M, Sacco P. The repeated bout effect of reduced-load eccentric exercise on elbow flexor muscle damage. *Eur J Appl Physiol* 2001;85(1-):34-40.
32. Nosaka K, Newton M. Difference in the magnitude of muscle damage between maximal and submaximal eccentric loading. *J Strength Cond Res* 2002;16(2):202-8.
33. Place N, Lepers R, Deley G, Millet GY. Time course of neuromuscular alterations during a prolonged running exercise. *Med Sci Sports Exerc* 2004;36(8):1347-56.
34. Le pacing en trail: pour mieux courir plus longtemps. <https://www2.u-trail.com/le-pacing/>. 2020.
35. Hoppel F, Calabria E, Pesta D, Kantner-Rumplmair W, Gnaiger E, Burtscher M. Physiological and Pathophysiological Responses to Ultramarathon Running in Non-elite Runners. *Front Physiol* 2019;10:1300.
36. Casa DJ, Stearns RL, Lopez RM, Ganio MS, McDermott BP, Walker Yeargin S, et al. Influence of Hydration on Physiological Function and Performance During Trail Running in the Heat. *J Athl Train* 2010;45(2):147-56.
37. Turkevich D, Micco A, Reeves JT. Noninvasive measurement of the decrease in left ventricular filling time during maximal exercise in normal subjects. *Am J Cardiol* 1988;62(9):650-2.
38. Oxborough D, Shave R, Middleton N, Whyte G, Forster J, George K. The impact of marathon running upon ventricular function as assessed by 2D, Doppler, and tissue-Doppler echocardiography. *Echocardiogr Mt Kisco N* 2006;23(8):635-41.
39. Shave R, Whyte G, George K. Myocardial stress after competitive exercise in professional road cyclists. *Med Sci Sports Exerc* 2004;36(4):738.
40. Nottin S, Doucende G, Schuster I, Tanguy S, Dauzat M, Obert P. Alteration in Left Ventricular Strains and Torsional Mechanics After Ultralong Duration Exercise in Athletes. *Circ Cardiovasc Imaging* 2009;2(4):323-30.

41. Maufrais C, Millet GP, Schuster I, Rupp T, Nottin S. Progressive and biphasic cardiac responses during extreme mountain ultramarathon. *Am J Physiol Heart Circ Physiol* 2016;310(10):H1340-1348.
42. Howald H. Effects of sport activities on the metabolism. *Schweiz Med Wochenschr* 1974;104(44):1535-8.
43. Coyle EF, Coggan AR, Hemmert MK, Ivy JL. Muscle glycogen utilization during prolonged strenuous exercise when fed carbohydrate. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1986;61(1):165-72.
44. Millet GY. Can Neuromuscular Fatigue Explain Running Strategies and Performance in Ultra-Marathons ? : The Flush Model. *Sports Med* 2011;41(6):489-506.
45. Kirwan JP, Hickner RC, Yarasheski KE, Kohrt WM, Wiethop BV, Holloszy JO. Eccentric exercise induces transient insulin resistance in healthy individuals. *J Appl Physiol* 1992;72(6):2197-202.
46. Asp S, Dagaard JR, Kristiansen S, Kiens B, Richter EA. Eccentric exercise decreases maximal insulin action in humans: muscle and systemic effects. *J Physiol* 1996;494(3):891-8.
47. Chow LS, Seaquist ER, Eberly LE, Mashek MT, Schimke JM, Nair KS, et al. Acute free fatty acid elevation eliminates endurance training effect on insulin sensitivity. *J Clin Endocrinol Metab* 2012;97(8):2890-7.



SERMENT D'HIPPOCRATE

En présence des Maîtres de cette Faculté, de mes chers condisciples et devant l'effigie d'HIPPOCRATE,

Je promets et je jure d'être fidèle aux lois de l'honneur et de la probité dans l'exercice de la Médecine.

Je donnerai mes soins gratuitement à l'indigent et n'exigerai jamais un salaire au dessus de mon travail. Je ne participerai à aucun partage clandestin d'honoraires.

Admis dans l'intimité des maisons, mes yeux n'y verront pas ce qui s'y passe ; ma langue taira les secrets qui me seront confiés et mon état ne servira pas à corrompre les mœurs, ni à favoriser le crime.

Je ne permettrai pas que des considérations de religion, de nation, de race, de parti ou de classe sociale viennent s'interposer entre mon devoir et mon patient.

Je garderai le respect absolu de la vie humaine.

Même sous la menace, je n'admettrai pas de faire usage de mes connaissances médicales contre les lois de l'humanité.

Respectueux et reconnaissant envers mes Maîtres, je rendrai à leurs enfants l'instruction que j'ai reçue de leurs pères.

Que les hommes m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses.

Que je sois couvert d'opprobre et méprisé de mes confrères si j'y manque.

LA FATIGUE NEUROMUSCULAIRE SECONDAIRE A L'UTRA-TRAIL :
COMPARAISON DE DEUX FORMATS DE COURSE DE MÊME DISTANCE

RÉSUMÉ : Objectif : Les courses d'Ultra-Trail comprennent 2 formats de course principaux : les courses en une seule étape, et celles en plusieurs étapes. Aucune étude n'a encore comparée la fatigue et la récupération neuromusculaire de ces 2 formats de course sur des distances et dénivelés similaires. L'objectif principal était d'évaluer la fatigue neuromusculaire et la cinétique de récupération de 2 courses d'égale distance courues en une seule étape ou en plusieurs étapes sur 4 jours consécutifs. Les objectifs secondaires étaient de quantifier certaines données anthropométriques, ainsi que les sensations de douleurs.

Méthode : 32 coureurs ont participé à l'étude dont 17 ont couru 160 km en une seule étape et 15 ont couru 40 km par jour pendant 4 jours consécutifs, sur le même parcours. Des évaluations neuromusculaires ont été réalisées avant, immédiatement après, et 2,5 et 10 jours après les courses. La fonction neuromusculaire a été évaluée à la fois sur les extenseurs du genou et les fléchisseurs plantaires, soit par des contractions volontaires, soit provoquées à l'aide d'une stimulation nerveuse électrique. **Résultats :** Les principaux résultats montrent une perte d'activation volontaire (fatigue centrale) plus importante pour les sujets de la course en une seule étape que ceux de la course à plusieurs étapes directement après la course. En récupération, les réponses après stimulations sur muscles relâchés (fatigue périphérique) ont mis plus de temps à récupérer pour les sujets de la course à étape. **Conclusion :** Courir un Ultra-Trail en plusieurs étapes induit des dommages musculaires plus prolongés, tandis que courir un Ultra-Trail en une seule étape entraîne une fatigue centrale plus importante.

MOTS CLÉS : Fatigue centrale et périphérique, Récupération neuromusculaire, Course d'ultra-endurance

FILIÈRE : Médecine Générale