



<http://portaildoc.univ-lyon1.fr>

Creative commons : Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale
- Pas de Modification 4.0 France (CC BY-NC-ND 4.0)



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>



Université Claude Bernard



Lyon 1

Institut de Formation en Masso-Kinésithérapie Pour Déficiants de la Vue

Mémoire d'initiation à la recherche en Masso-Kinésithérapie
Présenté pour l'obtention du

Diplôme d'Etat en Masso-Kinésithérapie par **Paul LLOVERAS**

**L'impact des chaussures à plaque de carbone sur l'économie
de course et la force maximale du quadriceps chez les
athlètes amateurs et de haut niveau.**

**The impact of carbon plate footwear on running economy and maximum
quadriceps strength in amateur and elite athletes**

Directeur de mémoire
CALABUIG LOPEZ Jesus

ANNEE 2024
Session 1

Membres du jury

M. BENSAFI Moustafa : Universitaire

M. JUNG Pierrick : Kinésithérapeute

M. CALABUIG-LOPEZ Jésus : Directeur de mémoire



Université Claude Bernard



Président

Frédéric FLEURY

Vice-président CA

CHEVALIER Philippe

Secteur Santé

U.F.R. de Médecine Lyon Est

Doyen

Pr. RODE Gilles

U.F.R de Médecine Lyon-Sud Charles Mérieux

Doyen

Pr PAPAREL Philippe

Département de Formation et Centre de Recherche en Biologie Humaine

Directeur

Pr SCHOTT Anne-Marie

Comité de Coordination des Etudes Médicales (CCEM)

Présidente

Pr BURILLON Carole

U.F.R d'Odontologie

Doyen

Pr. JC MAURIN

Institut des Sciences Pharmaceutiques et Biologiques

Président

M. Bernard MASSOUBRE

Institut des Sciences et Techniques de Réadaptation

Directeur

Dr Jacques LUAUTE



Institut de Formation en Masso-Kinésithérapie Pour Déficients de la Vue

Directrice ESRP IFMKDV

Nathalie RIVAUX

Responsable Pédagogique IFMKDV

Isabelle ALLEGRE

Référents d'années

Sigolène LARIVIERE

Laurence EUVERTE

Chantal CHAFFRINGEON

Référent stage

Agnès TRONCY ASK – Cycle 1

Chantal CHAFFRINGEON Cycle 2

Secrétariat Pédagogique

Patricia CONTINO

Manon TAM IM

@

CHARTRE ANTI-PLAGIAT DE LA DREETS AUVERGNE-RHÔNE-ALPES

La Direction Régionale de l'Économie, de l'Emploi, du Travail et des Solidarités délivre sous l'autorité du préfet de région les diplômes paramédicaux et du travail social.

C'est dans le but de garantir la valeur des diplômes qu'elle délivre et la qualité des dispositifs de formation qu'elle évalue, que les directives suivantes sont formulées.

Elles concernent l'ensemble des candidats devant fournir un travail écrit dans le cadre de l'obtention d'un diplôme d'État, qu'il s'agisse de formation initiale ou de parcours VAE.

La présente charte définit les règles à respecter par tout candidat, dans l'ensemble des écrits servant de support aux épreuves de certification du diplôme préparé (mémoire, travail de fin d'études, livret2).

Il est rappelé que « le plagiat consiste à reproduire un texte, une partie d'un texte, toute production littéraire ou graphique, ou des idées originales d'un auteur, sans lui en reconnaître la paternité, par des guillemets appropriés et par une indication bibliographique convenable »¹.

La **contrefaçon** (le plagiat est, en droit, une contrefaçon) est un **délit** au sens des articles L. 335-2 et L. 335-3 du code de la propriété intellectuelle.

Article 1 :

Le candidat au diplôme s'engage à encadrer par des guillemets tout texte ou partie de texte emprunté ; et à faire figurer explicitement dans l'ensemble de ses travaux les références des sources de cet emprunt. Ce référencement doit permettre au lecteur et correcteur de vérifier l'exactitude des informations rapportées par consultation des sources utilisées.

Article 2 :

Le plagiaire s'expose à des procédures disciplinaires. De plus, en application du Code de l'éducation² et du Code de la propriété intellectuelle³, il s'expose également à des poursuites et peines pénales.

Article 3 :

Tout candidat s'engage à faire figurer et à signer sur chacun de ses travaux, deuxième de couverture, cette charte dûment signée qui vaut engagement :

Je soussigné(e) : Paul LLOVERAS.....

atteste avoir pris connaissance de la charte anti-plagiat élaborée par la DREETS Auvergne-Rhône-Alpes et de m'y être conformé(e).

Je certifie avoir rédigé personnellement le contenu du livret/mémoire fourni en vue de l'obtention du diplôme suivant :

Fait à Lyon.....Le...8/09/2023 Signature

Zér 



¹ Site Université de Nantes : <http://www.univ-nantes.fr/statuts-et-chartes-usagers/dossier-plagiat-784821.kjsp>

² Article L331-3 : « les fraudes commises dans les examens et les concours publics qui ont pour objet l'acquisition d'un diplôme délivré par l'Etat sont réprimées dans les conditions fixées par la loi du 23 décembre 1901 réprimant les fraudes dans les examens et concours publics »

³ Article L122-4 du Code de la propriété intellectuelle

REMERCIEMENTS

A Mr CALABUIG-LOPEZ Jésus

Pour m'avoir suivi et encadré tout au long de la réalisation de ce travail de recherche, pour son soutien, ses conseils et sa disponibilité durant ces 2 dernières années.

A Mr BENSAFI Moustafa et à Mr Mr JUNG Pierrick

Pour leurs expertises et la lecture de ce mémoire.

A toute l'équipe pédagogique de l'IFMK-DV

Pour toutes ces années d'études et tout l'investissement pour faire de nous de bons professionnels.

A tout mes tuteurs de stage

Pour leur encadrement et leur transmission.

A mes parents et à ma famille

Pour leur soutien tout au long de ces années

GLOSSAIRE

EVA : Ethylène Vinyl Acétate

FC : Fréquence Cardiaque ;

SV1 : 1^{er} Seuil Ventilatoire ;

SV2 : 2^{ième} Seuil Ventilatoire ;

VMA : Vitesse Maximale Aérobie ;

RPE : Ressenti Perçu de l'Effort ;

VO₂max : Volume d'Oxygène Maximal ;

SPO₂ : Saturation Pulsée en Oxygène ;

HTAP : Hyper Tension Artérielle Pulmonaire ;

TABLE DES MATIERES

1	INTRODUCTION	1
1.1	SITUATION D'APPEL	1
1.2	LES CHAUSSURES	1
1.2.1	LES CHAUSSURES TRADITIONNELLES	1
1.2.1.1	LES DIFFERENTES STRUCTURES	2
1.2.1.2	LES DIFFERENTES CARACTERISTIQUES D'UNE CHAUSSURE	3
1.2.1.3	L'INDICE MINIMALISTE	3
1.2.2	LES CHAUSSURES À PLAQUE DE CARBONE	3
1.3	LA COURSE A PIED	4
1.3.1	DEFINITION	4
1.3.2	GENERALITES	4
1.4	LA FOULEE	5
1.4.1	DEFINITION	5
1.4.2	ETUDE BIOMECANIQUE	5
1.5	LE VO ₂ MAX	5
1.6	LE QUADRICEPS	6
1.6.1	ANATOMIE	6
1.6.2	BIOMECANIQUE	6
2	PROBLEMATIQUE	7
2.1	CONSTAT	7
2.2	OBJECTIFS	7
2.3	HYPOTHESE	7
3	MATERIELS ET METHODES	7
3.1	PLAN DE L'ESSAI	7
3.1.1	DESCRIPTION DU TYPE D'ESSAI RANDOMISE	7
3.1.2	MATERIELS	7
3.2	PARTICIPANTS	8
3.2.1	CRITERES D'ELIGIBILITE	8
3.2.2	LIEU ET STRUCTURE DE RECUEIL DES DONNEES	9

3.3	INTERVENTION	10
3.4	OBJECTIFS ET CRITERES DE JUGEMENT	10
3.4.1	OBJECTIFS PRINCIPAUX ET CRITERES DE JUGEMENT	10
3.4.1.1	OBJECTIFS PRINCIPAUX	10
3.4.1.2	CRITERES DE JUGEMENT PRINCIPAUX	11
3.4.2	OBJECTIFS SECONDAIRES ET CRITERES DE JUGEMENT	11
3.4.2.1	OBJECTIFS SECONDAIRES	11
3.4.2.2	CRITERES DE JUGEMENT SECONDAIRES	11
3.5	TAILLE DE L'ECHANTILLON	11
4	LES VISITES	12
4.1	CALENDRIER PREVISIONNEL	12
4.1.1	BILANS PREALABLES	12
4.1.2	CALENDRIER DES DIFFERENTS PARAMETRES A MESURER	12
4.2	DEROULEMENT DES SEANCES D'ENTRAINEMENT (DE J1 A J89)	13
4.3	SCHEMA DU DEROULEMENT DE L'ESSAI	14
5	RESULTATS ET STATISTIQUES	15
5.1	A J0	15
5.2	A J90	15
5.2.1	CORRELATION HOMME/FEMME	15
5.2.2	EVOLUTION DE LA FREQUENCE CARDIAQUE A J0 ET A J90	16
5.2.3	EVOLUTION DE LA FORCE DU QUADRICEPS CHEZ LES COUREURS	16
5.2.4	EVOLUTION DU VO ₂ MAX	17
5.2.5	EVOLUTION DE LA PRODUCTION DE LACTATES CHEZ LES ATHLETES	17
6	DISCUSSION	18
6.1	MISE EN PERSPECTIVE DES RESULTATS	18
6.2	FORCES ET LIMITES	18
6.3	PERSPECTIVES	18
7	CONCLUSION	19

RESUME

Depuis la commercialisation en 2017 des chaussures à plaque de carbone, les records en course à pied n'ont cessé d'être abaissés.

L'objectif de ce travail de recherche est d'étudier l'impact de cette nouvelle technologie sur les coureurs.

Dans ce protocole, les coureurs sont répartis en 2 groupes randomisés. Un groupe qui va s'entraîner durant 3 mois avec des chaussures à plaque de carbone, et un groupe qui va s'entraîner avec des chaussures dépourvues de cette technologie. Des tests à l'effort seront organisés en début et en fin de protocole.

Les tests à l'effort de fin de protocole vont permettre de montrer les différences d'adaptations physiologiques entre les 2 groupes d'athlètes.

N'ayant pas réalisé notre protocole expérimental, nous pouvons que suggérer les corrélations à étudier et la façon de présenter les résultats que nous aurions pu obtenir.

Il semblerait que courir avec des chaussures à plaque de carbone apporterait une économie du coût énergétique, du fait du renvoi d'énergie procuré par la semelle dotée d'une plaque de carbone.

MOTS CLES

Course à pied ; Chaussures à plaque de carbone ; VO_{2max} ; Foulée ; Lactates ;

ABSTRACT

Since the launch of carbon plate shoes in 2017, running records have continued to fall. The aim of this research is to study the impact of this new technology on runners. In this protocol, the runners are divided into two randomized groups. The treatment group will train for 3 months in shoes with carbon plate, while the control group will train in shoes without this technology. Exercise tests will be organized at the beginning and at the end of the protocol. The exercise tests at the end of the protocol will show the differences in physiological adaptations between the two groups of athletes. As our experimental protocol was not carried out, we can only suggest the correlations to be studied and the way in which we might have presented the results. It would appear that running in shoes with a carbon plate reduces energy costs due to the energy transfer provided by the sole with a carbon plate.

KEYWORDS

Running; Carbon plate shoes; VO_2 max; stride; Lactates.

1 INTRODUCTION

1.1 SITUATION D'APPEL

J'ai choisi d'orienter mon travail de recherche sur l'impact des chaussures de course à pied, à plaque de carbone, sur la consommation d'oxygène des coureurs.

Pratiquant la course à pied depuis 15 ans, je m'intéresse aux différents modèles de chaussures, et notamment à celles à plaque de carbone, qui ont fait leur apparition sur le marché et sur les stades depuis 2017. La firme américaine NIKE est la première à commercialiser ce modèle de chaussure avec la NIKE Vaporfly 4 %®, à l'occasion du projet *Breaking2* (*Breaking2*, 2016; Lapierrere, 2023a). Depuis cette commercialisation, l'usage de ce type de chaussures par des coureurs amateurs ou confirmés, n'a cessé d'augmenter et de nombreux records ont été battus. En effet, depuis 5 ans les records du monde du 5 km, du 10 km, du semi-marathon, et du marathon ont été abaissés (Alan, 2021; Lapierrere, 2023a, 2023b).

Suite à l'explosion des performances, World Athletics (la fédération internationale d'athlétisme) a décidé d'établir une réglementation de la conception de ces nouveaux modèles de chaussures à plaque de carbone, pour les compétitions sur piste et sur route (*World Athletics modifies rules governing competition shoes for elite athletes | PRESS-RELEASES | World Athletics*, 2020).

Au travers de ce travail de recherche, je souhaite vérifier l'impact de ces nouveaux modèles de chaussures sur la réduction de la dépense énergétique et sur la consommation d'oxygène des coureurs lors de la course.

(Barnes & Kilding, 2019; Guinness et al., 2020; Jones & Joubert, 2022)

1.2 LES CHAUSSURES

Les chaussures de course à pied n'ont cessé d'évoluer au cours du temps et aujourd'hui les coureurs disposent d'un vaste choix de modèles afin de répondre aux besoins spécifiques des différentes pratiques (trail, course sur piste, course sur route).

1.2.1 LES CHAUSSURES TRADITIONNELLES

On désigne par le terme chaussures traditionnelles les chaussures ne présentant pas de technologie à plaque de carbone.

1.2.1.1 LES DIFFERENTES STRUCTURES

Les chaussures sont constituées de plusieurs structures utilisant divers matériaux afin de leur conférer des propriétés (amortissantes, dynamiques...) :

- La semelle extérieure :

Elle est en contact direct avec le sol et est constituée d'une alliance de caoutchouc.

- La semelle intermédiaire :

Elle est rattachée à l'empeigne et est située entre la semelle extérieure et la semelle interne. La semelle intermédiaire permet l'amortissement et le dynamisme. Elle se compose de mousses comme l'EVA (éthylène-acétate de vinyle) ou le polyuréthane.

- La semelle interne (semelle de propreté) :

Elle est placée au-dessus de la semelle intermédiaire et permet d'éviter le contact direct du pied avec cette dernière.

- La tige :

La tige également appelée mesh ou empeigne, est la partie supérieure de la chaussure. Elle permet la ventilation, évitant ainsi l'augmentation de la température à l'intérieur de la chaussure. Elle est constituée de mailles techniques souvent sans couture, afin d'améliorer le confort en limitant les frottements pouvant être occasionnés lors de la course.

- Le contrefort :

Il est situé à l'arrière de la chaussure et permet le maintien du talon.

- L'embout :

Il est à l'avant de la chaussure et protège les orteils.

- Les renforts :

Ils forment le contour de la chaussure et permettent la stabilité latérale du pied.

- La languette :

Elle est située sous les lacets et permet d'éviter les frottements et les contacts de ces derniers avec le pied. Elle permet également de faciliter l'enfillement de la chaussure.

- Les lacets :

Ils sont placés au-dessus de la languette et permettent le serrage de la chaussure afin que cette dernière soit ajustée au pied du coureur.

(*chaussure de running*, 2014; Rault, 2018)

1.2.1.2 LES DIFFERENTES CARACTERISTIQUES D'UNE CHAUSSURE

Les chaussures se caractérisent par :

- La flexibilité :

C'est la quantification de la flexion longitudinal (avant/arrière) et de la torsion (pronation/supination) de la chaussure.

- Le poids :

Le poids des chaussures a un impact sur l'économie de course et la consommation d'oxygène.

- L'épaisseur :

C'est la mesure entre le point de contact du talon à l'intérieur de la chaussure et le point de contact au sol de la semelle extérieure sous en regard du talon.

- Les technologies de stabilité :

Ce sont les éléments intégrés à la chaussure, permettant de limiter la pronation du pied.

- Le drop :

C'est la différence entre l'épaisseur de la semelle au niveau du talon et celle au niveau de l'avant pied.

(LA CLINIQUE DU COUREUR, 2015; Ortega et al., 2021)

1.2.1.3 L'INDICE MINIMALISTE

On peut classer les chaussures en deux catégories selon leurs indices minimalistes.

L'indice minimaliste (IM) est une formule permettant de déterminer si une chaussure est plutôt maximaliste ou plutôt minimaliste, en fonction de l'épaisseur, de la flexibilité, du poids, de la présence ou non de technologies de stabilité et du drop. Plus le résultat est proche de 100%, plus la chaussure est dite minimaliste.

« La chaussure minimaliste est une chaussure interférant minimalement avec les mouvements naturels du pied, de par sa grande flexibilité, son faible dénivelé, son faible poids, sa faible épaisseur au talon, et l'absence de technologies de stabilité et de contrôle du mouvement. »

(LA CLINIQUE DU COUREUR, 2015)

1.2.2 LES CHAUSSURES À PLAQUE DE CARBONE

Les chaussures à plaque de carbone également appelées chaussure « next gen », diffèrent principalement des chaussures traditionnelles, par l'intégration d'une plaque de carbone au niveau de la semelle intermédiaire.

La semelle intermédiaire de ces chaussures se compose de mousse en Pebax, qui est un élastomère qui procure un plus grand renvoi d'énergie que l'EVA, qui constitue une partie des semelles intermédiaires des chaussures traditionnelles.

Les chaussures « next gen » ont tendance à avoir un indice minimaliste bas. Elles sont donc considérées comme maximaliste, du fait d'une épaisseur importante et d'un drop souvent élevé.

La plaque carbone permet d'apporter de la rigidité à la chaussure, mais cette innovation n'est pas la seule responsable du gain de performance. C'est en réalité l'association de la plaque carbone et de la mousse en Pebax qui est à l'origine de l'explosion des records.

(Kieseletter et al., 2022; Lapierrerie, 2023a)

1.3 LA COURSE A PIED

1.3.1 DEFINITION

« La course à pied est, avec la marche, l'un des deux modes de locomotion bipèdes de l'être humain. Caractérisée par une phase de suspension durant laquelle aucun des deux pieds ne touche le sol, elle permet un déplacement plus économe en énergie que la marche pour des vitesses allant d'environ 6 km/h à plus de 40 km/h. »

(Dicodusport, 2023)

1.3.2 GENERALITES

En 2022, la course à pied était la troisième activité sportive la plus pratiquée en France avec 12,4 millions de coureurs (*ATHLE.FR | Le Running, valeur sûre pendant la crise, 2022*).

On distingue deux types de courses :

- Les courses sur stade regroupant les disciplines de l'athlétisme (le sprint, le ½ fond, le fond, les sauts, les lancers) ;
- Les courses hors stade regroupant les courses sur routes (5 km, 10 km, semi-marathon, marathon, 100 km, ultra-marathon), les trails, les disciplines enchainées (triathlon, raids multisports) et les courses ludiques et à obstacles (Massardier & Vazquez, 2019);

1.4 LA FOULEE

1.4.1 DEFINITION

La foulée est la « *manière dont un cheval ou un coureur à pied prend appui sur le sol à chaque pas.* » (Larousse, 2024)

On distingue deux grands types de foulées :

- La foulée avec une attaque talon « *rearfootsrike* » dans laquelle le talon est le premier à rentrer en contact avec le sol. C'est le type de foulée le plus répandu ;
- La foulée avant pied (minimaliste) « *forefootsrike* » que l'on retrouve notamment chez les sprinters. Le premier point de contact au sol est situé au niveau de la tête des métatarsiens

(Biron, 2017; Brigaud, 2016).

1.4.2 ETUDE BIOMECANIQUE

La foulée désigne l'enjambée lors de la course à pied.

Une foulée en course à pied est constituée de deux grandes phases : la phase de suspension (aérienne) et la phase d'appui unipodale. La succession de ces 2 phases va constituer un cycle de course.

- La phase de suspension qui débute lorsque le pied n'est plus en contact avec le sol et qui s'achève lorsque le coureur reprend l'appui ;
- La phase d'appui comprenant trois étapes :
 - 1) L'amortissement, qui débute lorsque le pied rentre en contact avec le sol et qui se termine quand la projection de la verticale du centre de gravité se retrouve au même niveau que la projection verticale de l'appui.
 - 2) Le support, est l'étape lors de laquelle la verticale du centre de gravité du coureur est à l'aplomb de celle de l'appui.
 - 3) La poussée, qui se termine quand le pied du coureur n'est plus en contact avec le sol.

(Hanon, 2005; Lacouture et al., 2013; Leboeuf et al., 2006)

1.5 LE VO₂ MAX

« Le VO₂ max est la quantité maximale d'oxygène qu'une personne peut absorber et la valeur ne change pas malgré une augmentation de la charge de travail au fil du temps. Le VO₂ max

est exprimé en litres/min en tant que valeur absolue ou en millilitres/kg/min en tant que VO₂ max relatif. »

Le VO₂ max est un indicateur qui reflète le niveau d'endurance de l'appareil cardiorespiratoires. Il permet de quantifier la capacité aérobie et le niveau d'endurance des athlètes. C'est un marqueur de la condition physique.

Il peut se mesurer à l'aide de protocoles progressifs réalisés sur tapis de course (incrémentation de la vitesse en fonction du temps) ou sur cycloergomètre (incrémentation de la puissance en fonction du temps).

(Billat et al., 1996; Buttar et al., 2019; Fitchett, 1985; Hill et al., 2002; Nabi et al., 2015; Siconolfi et al., 1982)

1.6 LE QUADRICEPS

1.6.1 ANATOMIE

Le quadriceps est un muscle volumineux, qui s'étend de l'os coxal à la patella et au tibia. Il présente 4 muscles individuels :

- Le droit fémoral, qui s'insère au niveau de l'épine iliaque antéro-inférieure et de la face antérieure du grand trochanter, et se termine partie antérieure de la base de la patella et du tibia ;
- Le vaste intermédiaire, qui s'insère du corps antérieur du fémur et se termine partie postérieure de la base de la patella ;
- Le vaste médial, qui s'insère du corps du fémur au niveau de la lèvre médiale de la ligne âpre à la base et au bord médial de la patella et du tibia ;
- Le vaste latéral, qui s'insère au niveau de la ligne âpre du corps du fémur et de la face antérieure du grand trochanter et se termine au niveau de la base et du bord latéral de la patella et du tibia ;

(Dufour, 2023)

1.6.2 BIOMECANIQUE

Le quadriceps a une action de stabilisation de flexion de la hanche. Il assure l'extension de genou ainsi que des rotations interne et externe du fémur, via respectivement le vaste médial et le vaste latéral.

2 PROBLEMATIQUE

2.1 CONSTAT

Les équipementiers affirment que cette technologie intégrée à leurs modèles de chaussures garantie aux coureurs une économie de course engendrée par une diminution du coût énergétique.

2.2 OBJECTIFS

Au travers de ce travail de recherche, je souhaite donc vérifier cette affirmation, en comparant la consommation d'oxygène via des tests VO_2 max, corrélés à des mesures de la force maximale du quadriceps, des coureurs équipés de ces chaussures à plaque de carbone, versus celle des coureurs équipés de chaussures traditionnelles après 3 mois d'entraînement.

2.3 HYPOTHESE

- Pour courir à une même vitesse, le coût énergétique des coureurs équipés de chaussures à plaque de carbone est moindre que celui des coureurs équipés de chaussures traditionnelles.
- La diminution du coût énergétique peut entraîner une diminution de la force maximale du quadriceps chez les coureurs équipés de chaussures à plaque de carbone.

3 MATERIELS ET METHODES

3.1 PLAN DE L'ESSAI

3.1.1 DESCRIPTION DU TYPE D'ESSAI RANDOMISE

Pour vérifier cette hypothèse, nous allons mettre en place un protocole expérimental, prospectif et interventionnel, constitué de coureurs intégrés dans deux groupes via un procédé de randomisation :

- Un groupe contrôle va s'entraîner normalement pendant 3 mois avec des chaussures traditionnelles ;
- Un groupe expérimental va s'entraîner normalement pendant 3 mois comme le premier groupe, mais avec des chaussures à plaque carbone.

3.1.2 MATERIELS

Pour réaliser notre étude, nous allons avoir besoin :

- D'un tapis de course ;
- D'un appareil de mesure des échanges gazeux et de mesure de la VO₂ max Vyntus CPX™ de Vycaire Medical® (*Système de mesure de VO2 max VYNTUS CPX*, 2024).
- De paires de NIKE Vaporfly Next 4 %® ;
- De paires de chaussures traditionnelles avec un indice minimaliste compris entre 25% et 70% ;
- De ceintures cardio fréquencemètres ;
- De montres GPS ;
- D'une échelle de Borg ;
- D'un lactatomètre ;
- D'un oxymètre de pouls ;
- D'une application de recueil des données d'activités ;
- D'un logiciel de tableur ;
- D'un banc de Koch ;
- D'un logiciel d'acquisition des données Biopac® ;
- D'un dynamomètre Microfet® ;

3.2 PARTICIPANTS

3.2.1 CRITERES D'ELIGIBILITE

Pour la mise en place du protocole nous devons recruter un nombre de participants suffisant pour que les résultats obtenus aient une puissance statistique de 80% avec un niveau de confiance de 95%. Ce nombre de participants sera déterminé par le calcul de notre taille d'échantillon. Préalablement à cela, il nous faut définir les critères d'éligibilité de notre étude,

Les critères d'inclusion :

- Sexe confondu ;
- Age entre 18 ans et 40 ans ;
- Records sur 10 km <= à 38 minutes pour les hommes et <= à 42 minutes pour les femmes ;
- Coureurs amateurs et de haut niveau ;
- S'entraîner au minimum 3 fois par semaine ;
- Pratiquer la course à pied depuis au moins 3 ans ;
- Coureurs sur route en compétition ;
- Coureurs non-voyants avec leurs guides respectifs ;

Les critères de non-inclusion : les coureurs qui ne peuvent réaliser les critères de jugement :

- Coureurs ayant eu une blessure au niveau des membres inférieurs 3 mois auparavant ;
- Coureurs présentant des pathologies cardiorespiratoires (asthme instable ; hypertension artérielle pulmonaire HTAP modérée ou sévère ; insuffisance respiratoire aiguë ; insuffisance rénale sévère ; patients atteints de mucoviscidoses) ;

(*Epreuve d'effort maximale cardio-respiratoire (VO₂max) | Fiche santé HCL, 2024*)

- Coureurs amputés au niveau des membres inférieurs ;
- Coureurs présentant un appareillage au niveau des membres inférieurs (attèles releveurs, pied bot) ;

Les critères d'exclusion : les coureurs inclus dans l'essai qui devront l'abandonner pour cause de blessures apparues lors de la période expérimentale.

3.2.2 LIEU ET STRUCTURE DE RECUEIL DES DONNEES

Les tests à l'effort avec mesure de la VO₂ max et les mesures de force maximale du quadriceps seront réalisés dans un centre de médecine et de kinésithérapie du sport par deux évaluateurs :

- Un masseur-kinésithérapeute, responsable de la mise en place et du déroulement de l'intervention.

Il procédera aux différentes mesures de la force maximale du quadriceps avant les tests à l'effort afin d'éviter un biais de mesure engendré par la fatigue occasionnée par les tests réalisés sur le tapis de course.

Concernant les tests VO₂max, il devra installer les participants sur le tapis de course avec l'ensemble du matériel nécessaire pour l'obtention des différentes mesures (ceinture cardio-fréquencemètre, masque mesurant les échanges gazeux). Il gardera à portée de main le lactatomètre et l'oxymètre pour réaliser les différentes mesures à la fin de chaque palier.

Il assurera les mesures des taux de lactates durant le déroulement de l'épreuve d'effort.

Le masseur-kinésithérapeute assurera également le recueil des données de fréquence cardiaque, de saturation, de dyspnée, de RPE ;

- Un médecin du sport, chargé d'assurer la surveillance des constantes des sujets lors du déroulement des tests à l'effort.

Les résultats des différents tests seront recueillis à l'aide d'un cahier et d'un logiciel.

Les coureurs seront libres de réaliser leurs entraînements sur piste ou sur route durant la totalité de l'expérimentation.

3.3 INTERVENTION

L'expérimentation va durer 3 mois, afin de pouvoir constater les adaptations engendrées par l'entraînement.

Au cours de cette période, les deux groupes vont réaliser les mêmes séances d'entraînement.

Durant cette période, les athlètes ne devront pas dépasser un volume horaire d'entraînement hebdomadaire de 12 heures par semaine, répartie en 5 ou 6 séances. Une semaine type s'organisera autour :

- D'une séance de VMA (vitesse maximale aérobie) sur piste
- D'une séance sur piste au 2^{ième} seuil ventilatoire SV2 ou à allure course,
- D'une séance sur route ou en nature au 1^{er} seuil ventilatoire SV1,
- D'un footing en endurance fondamentale de 45 minutes à 1h30 chacun,
- D'une séance technique de course/renforcement musculaire avec des gammes athlétiques
- D'une séance de vitesse en côte.

Ces séances seront planifiées par l'entraîneur référent de l'étude. Les athlètes pourront réaliser ces séances en groupe ou individuellement.

L'expérimentation va débiter et se clôturer par un test à l'effort VO_2 max, ainsi que par des prises de lactates, de fréquence cardiaque à l'effort, de saturation et d'indice RPE, afin de mettre en évidence l'impact de ces 3 mois d'entraînement sur 2 temps de mesure (au début J0 et à 3 mois J90). Nous réaliserons également une mesure de la force maximale du quadriceps de chaque participant, au début et à la fin de la période d'expérimentation. Cette mesure devra être corrélée à la mesure de la VO_2 max, ainsi qu'à celle du taux de lactates et de la valeur du RPE (côté sur une échelle de 0 à 10 ; 0 l'effort est très supportable et 10 l'effort est insoutenable). Ces deux dernières valeurs seront donc également relevées à J0 et J90, afin de mettre en évidence l'impact d'un entraînement systématique avec des chaussures à plaque de carbone sur la consommation d'oxygène du coureur.

3.4 OBJECTIFS ET CRITERES DE JUGEMENT

3.4.1 OBJECTIFS PRINCIPAUX ET CRITERES DE JUGEMENT

3.4.1.1 OBJECTIFS PRINCIPAUX

Les principaux objectifs de notre étude seront de comparer les valeurs de la VO_2 max, et la différence de force du quadriceps en début, et fin de protocole.

3.4.1.2 CRITERES DE JUGEMENT PRINCIPAUX

Les mesures de VO_2 max seront établies par le système Vyntus CPX® et exprimées en (ml/min/kg) ; la force maximale du quadriceps par un dynamomètre en (kg.m/s²).

3.4.2 OBJECTIFS SECONDAIRES ET CRITERES DE JUGEMENT

3.4.2.1 OBJECTIFS SECONDAIRES

Les objectifs secondaires seront les différences de variation, de la fréquence cardiaque, de la dyspnée, de la saturation, l'évolution de la production de lactates lors des 3 tests à l'effort, ainsi que les différences d'allures.

3.4.2.2 CRITERES DE JUGEMENT SECONDAIRES

Les critères de jugement secondaires de notre étude seront :

- La fréquence cardiaque, mesurée en battements par minutes (bpm) par une ceinture cardio-fréquencemètre ;
- La dyspnée, évaluée par l'échelle de Borg ;
- L'évolution de la production de lactates, mesurée par un lactatomètre en mmol/L de sang ;
- La saturation, mesurée en pourcentage (%) par un oxymètre de pouls digital ;
- L'allure, définie par le tapis de course en (min/km).

3.5 TAILLE DE L'ECHANTILLON

La taille de l'échantillon correspond au plus petit nombre de participants, nécessaire pour garantir l'observation d'une différence significative entre les 2 groupes.

Pour calculer notre taille d'échantillon, nous utilisons l'outil « calculateur de taille de l'échantillon » fourni par le site internet DATATAB ; en y renseignant la valeur du nombre de coureurs en France qui est d'environ de 12,4 millions (*ATHLE.FR | Le Running, valeur sûre pendant la crise, 2022*).

La taille de l'échantillon sera donc de 386 coureurs répartis en 2 groupes de 193 coureurs.

4 LES VISITES

4.1 CALENDRIER PREVISIONNEL

4.1.1 BILANS PREALABLES

Avant d'initier le protocole expérimental, il sera nécessaire de réaliser un bilan d'admission pour chaque participant sélectionné, afin de s'assurer que ces derniers respectent les critères d'inclusion et de non-inclusion et ainsi limiter l'apparition de biais à notre étude randomisée.

Tout d'abord, les coureurs seront choisis en fonction niveau de performance qu'ils auront réalisés au cours des 12 derniers mois qui précèdent le début de l'étude : records sur 10 km \leq à 38 minutes pour les hommes et \leq à 42 minutes pour les femmes.

Puis un entretien individuel sera mis en place avec un médecin du sport afin de contrôler que l'état de santé de chacun ne présente pas de risque pour suivre notre protocole et ainsi éviter des perdus de vue.

Une fois ces paramètres vérifiés, les participants seront répartis dans 2 groupes :

- Un groupe contrôle qui sera équipé de chaussures traditionnelles sans plaque de carbone ;
- Un groupe expérimental équipé de chaussures à plaque de carbone ;

Les coureurs seront répartis dans ces 2 groupes selon un processus de randomisation, chaque groupe possède autant d'hommes que de femmes pour éviter le biais de sexe.

4.1.2 CALENDRIER DES DIFFERENTS PARAMETRES A MESURER

	BILANS D'INCLUSION (1 MOIS AVANT LE DEBUT DU PROTOCOLE)	TESTS INITIAUX (J0)	PERIODE D'ENTRAINE MENT (J1 à J89)	TESTS EN FIN DE PROTOCOLE (J90)
VERIFICATION DU NIVEAU DE PERFORMANCE RANDOMISATION	X			X
VISITE MEDICALE RANDOMISATION	X			
VO ₂ max (ml/min/kg)		X		X
FORCE DES QUADRICEPS (kg.m/s²)		X		X
FREQUENCE CARDIAQUE (bpm/min)		X		X
ALLURES DE COURSE (min/km)		X		X
TAUX DE LACTATES (mmol/L)		X		X
SPO₂ (%)				X
RPE ; DYSPNEE (ECHELLE DE BORG)				X
SEANCES D'ENTRAINEMENT		X	X	

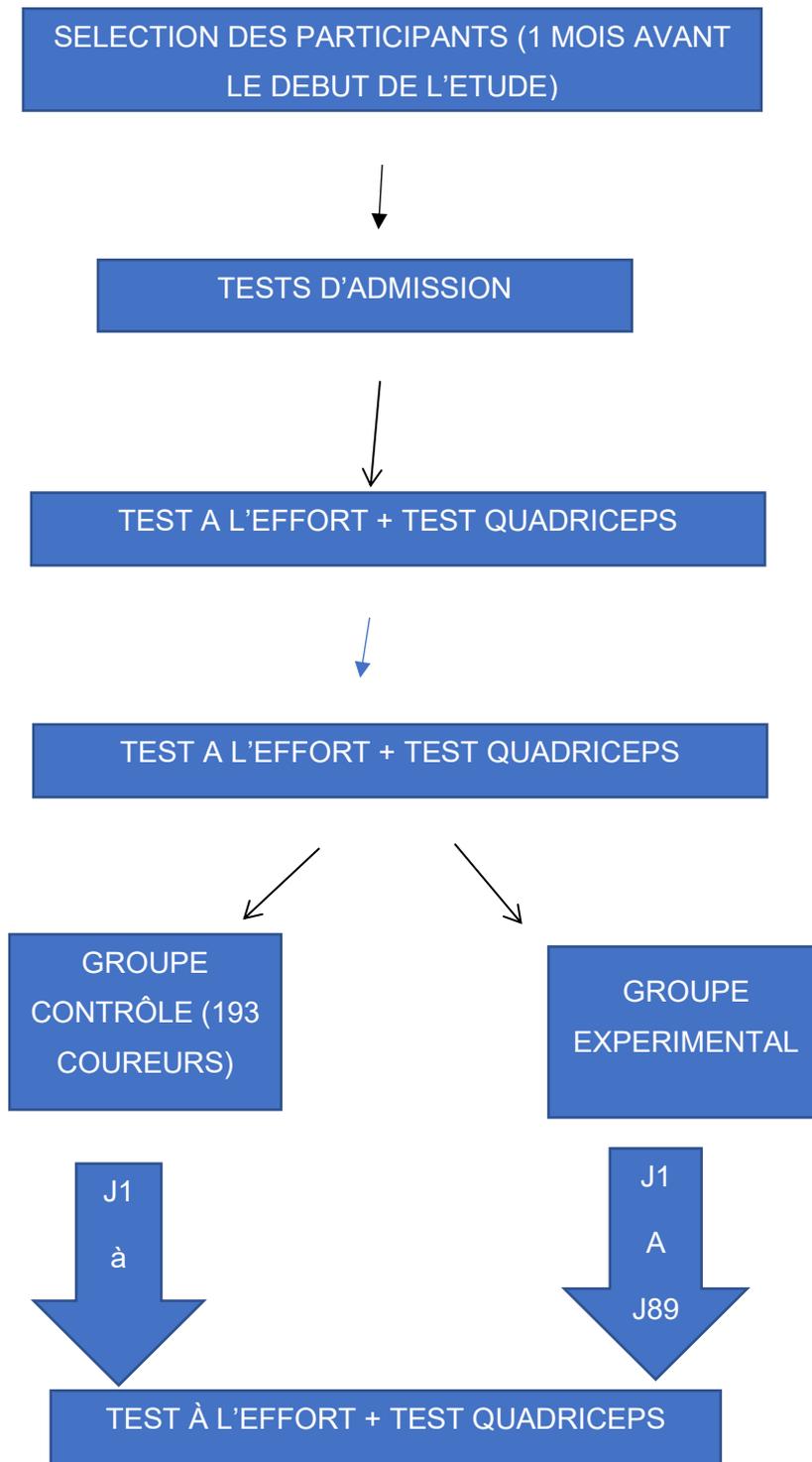
4.2 DEROULEMENT DES SEANCES D'ENTRAINEMENT (DE J1 A J89)

A partir de J1 (le lendemain des tests initiaux), les participants devront tous suivre exactement le même programme d'entraînement préalablement établi par un entraîneur d'athlétisme. Le

programme sera constitué de séances d'entraînement sur piste (séances d'allure spécifiques, de VMA, de travail de gammes athlétiques), sur route (séances, d'endurance fondamentale, de seuils, d'allures course), ainsi qu'en côtes.

Les participants seront libres de réaliser les séances d'entraînement seuls, en groupe ou en club.

4.3 SCHEMA DU DEROULEMENT DE L'ESSAI



5 RESULTATS ET STATISTIQUES

Nous n'avons pas eu la possibilité de réaliser notre protocole. De ce fait, nous pouvons que supposer les résultats que nous aurions pu obtenir.

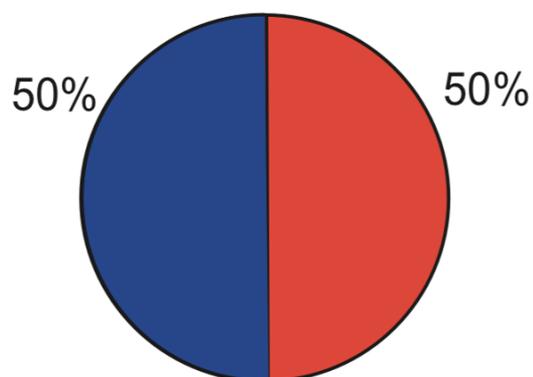
5.1 A J0

Nous supposons qu'à J0 les différentes mesures correspondront au niveau actuel des athlètes. Les résultats à J0 permettront de constituer une base de données, qu'il faudra corrélérer avec les résultats des différents tests qui seront obtenus à J90.

5.2 A J90

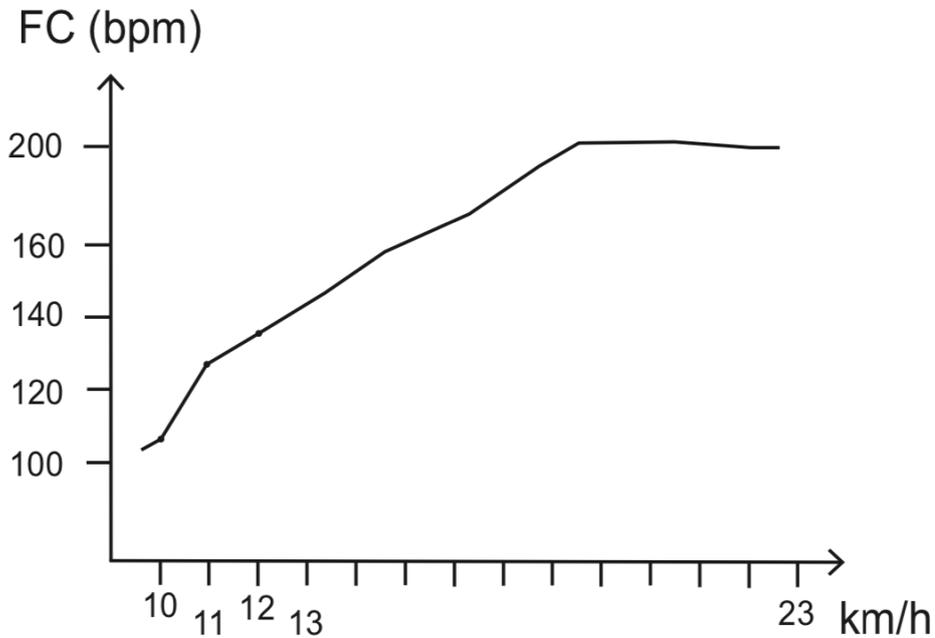
5.2.1 CORRELATION HOMME/FEMME

Nous supposons que la technologie à plaque de carbone avantage aussi bien les hommes que les femmes.



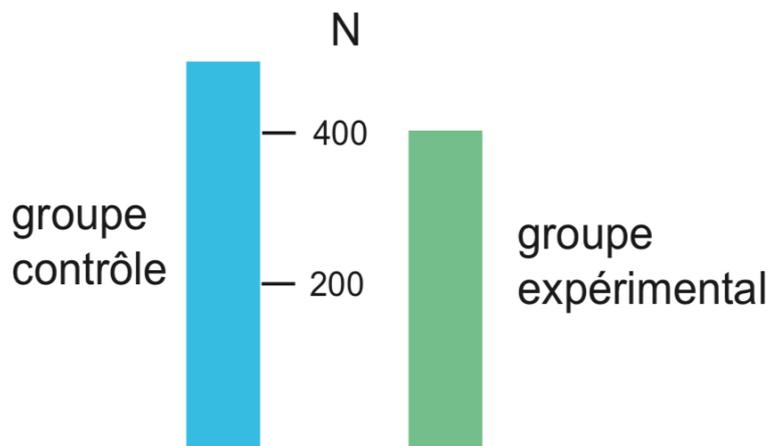
5.2.2 EVOLUTION DE LA FREQUENCE CARDIAQUE A J0 ET A J90

Il semblerait qu'il n'y ait pas de corrélation entre l'utilisation de chaussures à plaque de carbone et la fréquence cardiaque des coureurs.



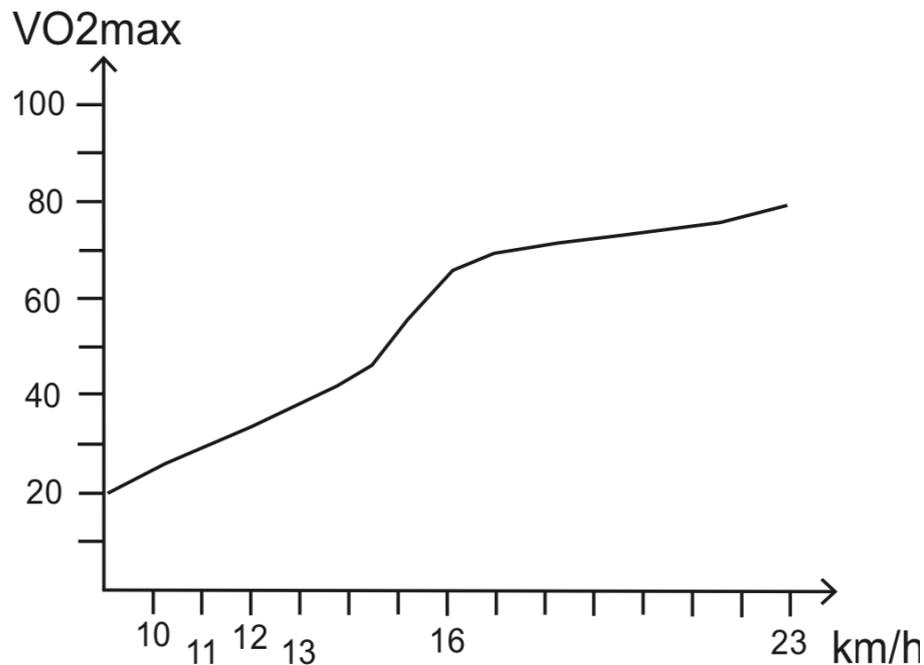
5.2.3 EVOLUTION DE LA FORCE DU QUADRICEPS CHEZ LES COUREURS

On pourra noter une baisse non significative de la force du quadriceps chez les coureurs équipés de chaussures carbone.



5.2.4 EVOLUTION DU VO₂MAX

Un entrainement systématique avec des chaussures carbone ne semble pas avoir d'influence sur le VO₂max des coureurs des 2 groupes.



5.2.5 EVOLUTION DE LA PRODUCTION DE LACTATES CHEZ LES ATHLETES

On pourrait constater un ralentissement de la production de lactates chez les coureurs équipés de chaussures à plaque de carbone par rapport au groupe contrôle.

L'hypothèse nulle H₀ : il n'y a pas de différence pour le coût énergétique entre les coureurs équipés de chaussures à plaque de carbone et ceux qui utilisent les chaussures traditionnelles puisque il n'y a pas de variations sur la fréquence cardiaques, le VO₂max.

L'hypothèse H₁ semble vérifiée, par les mesures du taux de lactates et les vitesses des courses atteintes lors des tests.

6 DISCUSSION

6.1 MISE EN PERSPECTIVE DES RESULTATS

Nous n'avons pas encore réalisé notre expérimentation et de ce fait, nous ne sommes pas en mesure de présenter les résultats de notre étude.

6.2 FORCES ET LIMITES

La sélection de l'échantillon pour la réalisation de notre expérimentation est très représentative de la population pratiquant la course à pied.

En effet, les critères d'inclusion de notre étude rassemblent des coureurs amateurs ou de haut niveau sans distinction de sexe.

De plus le choix des séances d'entraînements reflète la réalité du déroulement des séances dans les clubs d'athlétisme

Cependant, notre protocole expérimental présente plusieurs biais de réalisation :

- Le choix libre de la réalisation des séances (seul ou en groupe) ;
- Les habitudes d'entraînement des différents coureurs avant leur sélection, c'est-à-dire la nature du terrain, certains font plus de dénivelés que d'autres, tendance des foulées des coureurs (attaque du sol par le talon ou par l'avant pied) ;
- L'hygiène de vie des coureurs qui influe sur l'assimilation des entraînements et la récupération musculaire entre les séances (hydratation et alimentation, sommeil) ;
- La réalisation de protocoles de récupération ou non chez certains coureurs (massages, cryothérapie, pressothérapie).

6.3 PERSPECTIVES

En effet, l'entraînement en groupe peut favoriser le dépassement de soi et ainsi accélérer la progression des coureurs.

Dans le futur, il serait intéressant de mener un nouveau travail de recherche, afin d'étudier l'importance ou non de l'effet placebo sur les performances des coureurs. Pour cela il faudrait des chaussures identiques ayant même forme et couleur.

Il serait également pertinent de mener une étude qui mettrait en corrélation le type de foulée et le potentiel gain ou non de performance, apportée par l'usage de chaussures à plaque de carbone.

7 CONCLUSION

Notre étude avait pour objectif de démontrer ou non l'économie du coût énergétique des athlètes courant avec des chaussures à plaque de carbone, par rapport à des athlètes équipés de chaussures de course dépourvues de plaque de carbone.

Nous n'avons pas eu la possibilité de réaliser notre protocole. De ce fait, nous pouvons que supposer les résultats que nous aurions obtenus.

Nous avons émis l'hypothèse que le coût énergétique des coureurs équipés de chaussures à plaque de carbone étaient moindre que celui des coureurs chaussés sans plaque de carbone.

En effet, nous aurions pu constater une diminution de la production de lactates et des valeurs de l'échelle RPE chez les coureurs équipés de chaussures à plaque de carbone.

Néanmoins, il ne semblerait pas que les chaussures à plaque de carbone aient un impact sur la fréquence cardiaque et le VO_2 max des athlètes.

Au niveau de la force du quadriceps des coureurs, nous aurions pu constater une légère diminution de la force musculaire chez les athlètes s'étant systématiquement entraînés avec des chaussures à plaque de carbone. Cependant, cette légère baisse de force ne permet pas d'affirmer que cette nouvelle technologie, provoque une fonte musculaire chez les coureurs. En effet l'activité physique quotidienne de ces derniers permet de lutter contre ce déconditionnement physique. Cette supposée légère baisse de force musculaire, ne devrait pas entraîner une augmentation de la dépense énergétique du coureur. Elle est en effet compensée par la plaque de carbone qui restitue de l'énergie par son effet élastique.

Il semblerait donc que les chaussures à plaque de carbone permettent une économie du coût énergétique des coureurs. Cependant, nous devrions être vigilant quant à leur usage systématique ; ce type d'équipement présente une stabilité moindre que la plupart des chaussures dépourvues de plaque de carbone et peuvent être ainsi à l'origine d'une augmentation de la prévalence des entorses de cheville chez les coureurs.

BIBLIOGRAPHIE

Alan. (2021). *La plaque carbone, le début d'une forme de dopage technologique?*
<https://blog.triloop.fr/blog/la-plaque-carbone-le-debut-dune-forme-de-dopage-technologique/>

ATHLE.FR | *Le Running, valeur sûre pendant la crise.* (2022).
<https://www.athle.fr/asp.net/main.news/news.aspx?newsid=18185>

Barnes, K. R., & Kilding, A. E. (2019). A Randomized Crossover Study Investigating the Running Economy of Highly-Trained Male and Female Distance Runners in Marathon Racing Shoes versus Track Spikes. *Sports Medicine*, 49(2), 331-342. <https://doi.org/10.1007/s40279-018-1012-3>

Billat, V. L., Hill, D. W., Pinoteau, J., Petit, B., & Koralsztein, J.-P. (1996). Effect of Protocol on Determination of Velocity at $\dot{V}O_2$ max and on its Time to Exhaustion. *Archives of Physiology and Biochemistry*, 104(3), 313-321. <https://doi.org/10.1076/apab.104.3.313.12908>

Biron, P. (2017). *Incidence de l'impact du pied au sol, un facteur réducteur des blessures chez les coureurs : Prévention, éducation. Synthèse de la littérature.*
<https://kinedoc.org/work/kinedoc/39fef929-8420-4d27-ac7b-26f92917dc4f.pdf>

Breaking2. (2016). <https://www.nike.com/fr/running/breaking2>

Brigaud, F. (2016). *Guide de la foulée avec prise d'appui avant-pied* (Nouvelle éd. revue et augmentée). Éditions Désiris.

Buttar, K. K., Saboo, N., & Kacker, S. (2019). A review : Maximal oxygen uptake (VO₂ max) and its estimation methods. *International Journal of Physical Education, Sports and Health*, 6(6), 24-32.

chaussure de running : Anatomie et mots à connaître. (2014).
<https://www.wanarun.net/blog/anatomie-dune-chaussure-de-running-36778.html>

Dicodusport. (2023). *Course à pied • Dicodusport*. <https://dicodusport.fr/sports-en-c/course-a-pied/>

Dufour, M. kinésithérapeute). (2023). *Anatomie de l'appareil locomoteur*. (BU Santé Rockefeller; 4e édition.). Elsevier Masson; BU Lyon 1. <https://docelec.univ-lyon1.fr/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat06264a&AN=bul.549436&lang=fr&site=eds-live&scope=site>

Epreuve d'effort maximale cardio-respiratoire (VO2max) | Fiche santé HCL. (2024). <https://www.chu-lyon.fr/epreuve-deffort-maximale-cardio-respiratoire-vo2max#toc-contre-indications>

Étude de la reproductibilité des mesures de la force et de l'endurance du quadriceps par dynamométrie manuelle chez des patients atteints d'une BPCO. (2016). *Revue des Maladies Respiratoires*, 33, A31. <https://doi.org/10.1016/j.rmr.2015.10.639>

Fitchett, M. A. (1985). Predictability of VO2 max from submaximal cycle ergometer and bench stepping tests. *British Journal of Sports Medicine*, 19(2), 85-88.

Guinness, J., Bhattacharya, D., Chen, J., Chen, M., & Loh, A. (2020). *An Observational Study of the Effect of Nike Vaporfly Shoes on Marathon Performance* (arXiv:2002.06105). <http://arxiv.org/abs/2002.06105>

Hanon, C. (2005). Activité musculaire des membres inférieurs en course à pied sur le plat. *Staps*, 68(2), 111-124. <https://doi.org/10.3917/sta.068.0111>

Hill, D. W., Poole, D. C., & Smith, J. C. (2002). The relationship between power and the time to achieve VO2max. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 34(4), 709-714.

Jones, G., & Joubert, D. (2022). A Comparison Of Running Economy Across Seven Carbon-Plated Racing Shoes. *International Journal of Exercise Science: Conference Proceedings*, 2(14). <https://digitalcommons.wku.edu/ijesab/vol2/iss14/25>

Kiesewetter, P., Bräuer, S., Haase, R., Nitzsche, N., Mitschke, C., & Milani, T. L. (2022). Do Carbon-Plated Running Shoes with Different Characteristics Influence Physiological and Biomechanical Variables during a 10 km Treadmill Run? *Applied Sciences*, 12(15), Article 15. <https://doi.org/10.3390/app12157949>

LA CLINIQUE DU COUREUR. (2015). *Qu'est-ce que l'indice minimaliste ?*
<https://lacliniqueducoureur.com/indice-minimaliste/>

Lacouture, P., Colloud, F., Decatoire, A., & Monnet, T. (2013). Biomécanique de la course à pied. *Revue Encycloppédie Chirurgicale*, 9, 22.

Lapierriere, M. (2023a). *La plaque CARBONE : Nouvelle arme pour exploser ses chronos sur route ? (PARTIE 1/2)*. <https://lacliniqueducoureur.com/coeurs/blogue/archives/la-plaque-carbone-nouvelle-arme-pour-exploser-ses-chronos-sur-route-partie-12/>

Lapierriere, M. (2023b). *La plaque CARBONE : Nouvelle arme pour exploser ses chronos sur route ? (PARTIE 2/2)*. La Clinique Du Coureur.
<https://lacliniqueducoureur.com/coeurs/blogue/archives/la-plaque-carbone-nouvelle-arme-pour-exploser-ses-chronos-sur-route-partie-22/>

Larousse, É. (2024). *Définitions : Foulée - Dictionnaire de français Larousse*.
<https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/foul%C3%A9/34801>

Leboeuf, F., De Leluardière, F. A., Lacouture, P., Duboy, J., Leplanquais, F., & Junqua, A. (2006). Étude biomécanique de la course à pied. *Université Poitiers, France*.
[https://www.researchgate.net/profile/Fabien-](https://www.researchgate.net/profile/Fabien-Leboeuf/publication/270895850_Etude_biomecanique_de_la_course/links/570f698a08aee328dd655c4e/Etude-biomecanique-de-la-course.pdf)

[Leboeuf/publication/270895850_Etude_biomecanique_de_la_course/links/570f698a08aee328dd655c4e/Etude-biomecanique-de-la-course.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Fabien-Leboeuf/publication/270895850_Etude_biomecanique_de_la_course/links/570f698a08aee328dd655c4e/Etude-biomecanique-de-la-course.pdf)

Massardier, V., & Vazquez, H. (2019). *Les stratégies d'organisation des courses « hors stade » : Un enjeu clé pour le développement du running (17)*.
<https://www.sports.gouv.fr/sites/default/files/2023-01/note-d-analyse-n-17-les-strat-gies-d-organisation-des-courses-hors-stade-un-enjeu-cl-pour-le-d-veloppement-du-running-3292.pdf>

Nabi, T., Rafiq, N., & Qayoom, O. (2015). Assessment of cardiovascular fitness [VO₂ max] among medical students by Queens College step test. *Int j Biomed adv res*, 6(5), 418-421.

Ortega, J. A., Healey, L. A., Swinnen, W., & Hoogkamer, W. (2021). Energetics and Biomechanics of Running Footwear with Increased Longitudinal Bending Stiffness: A Narrative Review. *Sports Medicine*, 51(5), 873-894. <https://doi.org/10.1007/s40279-020-01406-5>

Pourquoi et comment évaluer l'endurance musculaire? (2010). *Revue des Maladies Respiratoires Actualités*, 2(6), 557-559. [https://doi.org/10.1016/S1877-1203\(10\)70145-2](https://doi.org/10.1016/S1877-1203(10)70145-2)

Rault, L. (2018). *Anatomie d'une chaussure de course : Tout savoir sur la composition d'une chaussure*. <https://performancerunning.fr/composition-chaussure/>

Siconolfi, S. F., Cullinane, E. M., Carleton, R. A., & Thompson, P. D. (1982).

Assessing VO₂max in epidemiologic studies: Modification of the Astrand-Rhyming test. *Medicine and science in sports and exercise*, 14(5), 335-338.

Street, W., & On, A. (1997). *Of Canada Acquisitions and Bibliographic Services*.

Système de mesure de VO₂ max VYNTUS CPX. (2024). UGAP.FR. <https://www.ugap.fr/sante-3/equipement-biomedical-547/explorations-fonctionnelles-et-therapies-17517/epreuve-d-effort-90149/ergospirometre-vo2-max-31547/systeme-de-mesure-de-vo2-max-vyntus-cpx-p3349968>

World Athletics modifies rules governing competition shoes for elite athletes | PRESS-RELEASES | World Athletics. (2020). <https://worldathletics.org/news/press-releases/modified-rules-shoes>