

Intérêt des modèles transversaux de recherche vers le sport santé

A. Delafontaine, J. Frigout, F. Loete

PLAN DU CHAPITRE

Introduction	110
Du contrôle moteur à la réadaptation : exemple de la marche humaine	110
De la gériatrie à la médecine spatiale : utilisation du modèle d'alitement pour adapter l'activité physique	112
Capteurs, systèmes de mesure physique : du laboratoire aux systèmes de dépistage et de prévention intelligents	112
De l'évaluation du <i>scoring</i> à la prévention des blessures chez le sportif	114
Conclusion	115

► **Mots-clés : modèles transversaux, recherche, système de mesure, dépistage, prévention**

Introduction

Ce chapitre a pour vocation de vous faire entrevoir, à travers plusieurs domaines de recherche fondamentaux et appliqués en lien avec le corpus des connaissances STAPS, qu'il existe des interconnexions fortes entre ces domaines, bien que parfois peu perceptible de prime abord, pouvant déboucher sur des enjeux majeurs de santé publique.

Du contrôle moteur à la réadaptation : exemple de la marche humaine

La marche est un processus neuromoteur complexe nécessitant une longue période d'apprentissage (Delafontaine, 2018).

En effet, chez l'être humain, l'analyse quantifiée de la marche (AQM) nous permet aujourd'hui de montrer qu'il nous faut, en réalité, plusieurs années d'apprentissage avant d'obtenir séparément une cinétique et une cinématique stables avec patterns moteurs matures.

La cinématique est acquise vers l'âge de 7 ans tandis que les paramètres fonctionnels (spatio-temporels) ne sont similaires à l'adulte que vers l'âge de 12 ans (Gouelle *et al.*, 2011).

L'AQM est considérée comme le standard mondial de l'évaluation locomotrice, notamment en neuro-orthopédie pédiatrique (Viehweger *et al.*, 2008). Elle permet d'orienter les décisions médico-chirurgicales et de réduire leurs coûts (DeLuca *et al.*, 1997), notamment en permettant aux chirurgiens de sélectionner le geste opératoire le plus adéquat pour une pathologie donnée.

Notre compréhension des mécanismes de la marche humaine a permis de faire évoluer les théories du contrôle moteur (exemple absence de propulsion de la jambe d'appui correspondant en réalité à processus de freinage du triceps sural; effet délétère de la thérapie manuelle sur les ajustements posturaux anticipateurs (Ditcher *et al.*, 2017); notions empiriques de vertèbres dites « pivot » pour l'équilibre et la marche qui en réalité n'en sont pas; possibilité d'avoir une sélectivité musculaire à l'examen sur table qui est en réalité totalement différente lors de la marche...).

La locomotion peut également nécessiter une période de réapprentissage comme en témoigne l'astronaute américaine Christine Koch, première femme à avoir passé le plus de temps en apesanteur dans la station spatiale internationale (328 jours dans l'ISS). Ces premiers mots, après son atterrissage dans les steppes du Kazakhstan en Asie centrale, furent : « J'ai un peu de mal à retrouver mon équilibre » et « J'ai dû me réhabituer à marcher ».

La notion de « réadaptation à la gravité terrestre » est donc fondamentale dans la rééducation de la marche. On la retrouve par exemple : en postchirurgie multisite et en postrhizotomie chez les enfants atteints de paralysie cérébrale, ou encore chez le patient ayant subi une période d'alitement prolongé en réanimation après un accident vasculaire cérébral.

L'observation, l'analyse et la compréhension des phénomènes de désadaptations neurologiques et musculo-squelettiques observables dans l'espace chez les astronautes (Sylos-Labini *et al.*, 2014) permettent la création de nouveaux modèles. Ces derniers sont transversaux et interdisciplinaires pouvant, entre autres, être corrélés avec les effets du vieillissement et de l'alitement prolongé sur le contrôle de l'équilibre postural et locomotion.

Ce processus favorise l'apport de nouvelles technologies, à but thérapeutique et/ou fonctionnelle, venant compléter la rééducation-réadaptation locomotrice, telles que :

- les exosquelettes d'entraînement à la marche avec assistance électro-mécanisée type Lokomat® (figure 9.1) permettant une réadaptation assistée avec rétro-feedback et réalité virtuelle chez le sujet hémiplégique (van Kammen *et al.*, 2019) ou chez l'enfant paralysé cérébrale (Ammann-Reiffer *et al.*, 2017);
- les exosquelettes portatifs de marche, avec intelligence artificielle intégrée, permettant notamment aux sujets paraplégiques de faciliter la réalisation d'une posture et une déambulation bipédique;
- les tapis de marche avec allègement de poids du corps;
- la stimulation magnétique transcranienne afin de réduire le freezing dans la marche du patient parkinsonien (Lee *et al.*, 2014) ou encore d'améliorer la plasticité cérébrale (Xu *et al.*, 2015).

Concernant l'optimisation des programmes d'activités physiques adaptées, le développement de technologies embarquées permet de sortir des laboratoires d'analyse du mouvement (Delafontaine, 2019) afin d'évaluer : la marche en milieu écologique (c'est-à-dire utilisation d'accéléromètre, de centrale inertielle miniaturisée, de capteurs de pression portatifs, d'« eye-tracking »; voir Matthis *et al.*, 2018), la synchronisation oculo-plantaire, les stratégies



Figure 9.1

Entraînement de la marche sur exosquelette type Lokomat avec rétro-feedback.

motrices d'enjambement d'obstacle, le placement du pied sur terrains variés, la coordination intersegmentaire des membres inférieurs...

En effet, les troubles du mouvement touchent aujourd'hui plus de 100 millions de personnes à travers le monde, présentant un risque élevé de chute à leur domicile et/ou au cours de leurs activités de la vie quotidienne.

Ces troubles sont souvent un précurseur puis un indicateur de maladies évolutives, chroniques ou encore neurodégénératives (exemple : sclérose en plaques, maladie de Parkinson, fragilité du sujet âgée, neuropathies périphériques, problèmes du pied diabétique...).

L'activité physique, notamment adaptée, joue un rôle clé de santé publique (c'est-à-dire pour rappel, 20 % des patients âgés hospitalisés pour fracture du col fémoral sur chute vont décéder à la suite de la perte locomotrice engendrée par cette atteinte). Elle permettrait, plus spécifiquement, d'apporter des bienfaits en prévention primaire (tableau 9.1), voire secondaire et tertiaire en oncologie par exemple (figure 9.2).

Le saviez-vous

- En oncologie, l'activité physique adaptée améliore significativement la santé mentale et physique des malades au cours et à la suite de leur traitement.
- Le manque d'activité physique correspond au 4^e facteur de risque des maladies non transmissibles (WHO, 2009).
- La sédentarité est un facteur de risque indépendant de l'activité physique.

Tableau 9.1. Effets positifs de l'activité physique en prévention primaire

Pathologies métaboliques
<ul style="list-style-type: none"> • Limitation prise de poids et ↘ si prise en charge nutritionnelle corrélée avec effet dose-réponse • Prévention, voir disparition, du diabète de type 2 avec effet dose-réponse
Pathologies cardiovasculaires
<ul style="list-style-type: none"> • ↘ incidence-morbidité-voir mortalité avec effet dose-réponse
Oncologie
<ul style="list-style-type: none"> • ↘ du risque avec : <ul style="list-style-type: none"> • Niveau de preuve élevé pour le cancer du sein (12 à 21 %), colon (19 %), endomètre (20 %), œsophage (21 %), vessie (15 %), estomac (19 %), rein (12 %). • Niveau de preuve modéré pour le cancer du poumon. • Niveau de preuve limité pour le cancer de la prostate et des ovaires.
Pathologies rhumatologiques
<ul style="list-style-type: none"> • ↘ douleur et ↗ fonction pour : <ul style="list-style-type: none"> • Lombalgie chronique • Arthrose des membres inférieurs • Rhumatismes inflammatoires
Pathologies psychiatriques et santé mentale
<ul style="list-style-type: none"> • ↘ risque démence • ↗ capacités cognitives • ↗ qualité de vie et sommeil • ↘ de l'anxiété et dépression

Source : Module national activité physique adaptée du DES de MPR.

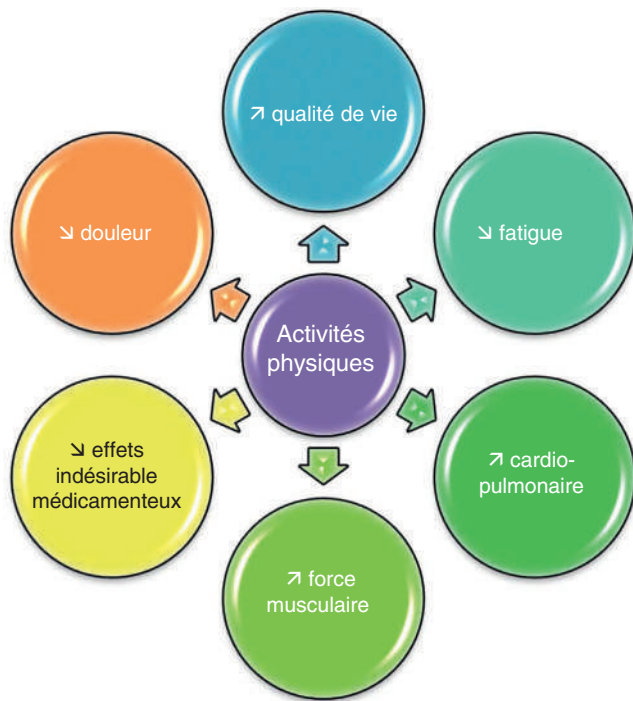


Figure 9.2

Effets bénéfiques de l'activité physique en oncologie par le biais d'exercices aérobies réalisés, d'intensité modérée à élevée et de renforcement musculaire.

De la gériatrie à la médecine spatiale : utilisation du modèle d'alitement pour adapter l'activité physique

La perte de la verticalisation du corps, ou encore de l'application des contraintes gravitaires terrestres, se retrouve dans des environnements variés. Ainsi, par exemple : un patient dans le coma et alité en réanimation, une personne âgée ne pouvant plus sortir de son lit en postopératoire, un individu présentant des troubles psychiatriques avec clinophilie, l'astronaute en apesanteur dans la station spatiale internationale sont autant de situations très différentes mais ayant pour point commun les effets de l'alitement.

Lorsque la force gravitationnelle est nulle, il est observé de nombreuses modifications dans le corps humain. Chez le cosmonaute par exemple, il est observé un aplatissement des globes oculaires, une modification de l'expression de certains gènes de l'ADN, une perte de masse musculaire et osseuse (1 à 2 % par mois avec une prédominance au niveau des jambes et des lombaires), une hypercalcémie favorisant l'apparition de calculs rénaux.

Il paraît donc indispensable de réfléchir, d'analyser et concevoir des programmes d'activités physiques adaptées en fonction des contraintes induites par le milieu dans lequel se trouve le sujet afin de limiter par exemple les effets néfastes de l'apesanteur, qu'ils soient cognitifs et/ou physiques, comme illustré précédemment.

Le saviez-vous

Chez les cosmonautes, la déformation du tissu cérébral induite par l'apesanteur peut perdurer jusqu'à sept mois après leur retour sur terre (Van Ombergen *et al.*, 2018).

Capteurs, systèmes de mesure physique : du laboratoire aux systèmes de dépistage et de prévention intelligents

Lorsque l'on parle de recherche, il est nécessaire de s'appuyer sur des données fiables, quantitatives et reproductibles. Dans le cas contraire, les théories développées et les solutions étudiées seraient purement empiriques. Que dire d'un traitement médicamenteux qui s'appuierait sur un « ressenti » du chercheur ou d'une méthode de préparation physique qui prétendrait améliorer l'endurance sans pouvoir en quantifier les bénéfices (en termes de VO_{2max} par exemple).

Quels que soient les domaines de recherche et les applications ciblées, le chercheur s'appuie sur ses armes qui sont la théorie (le modèle), la méthode et les mesures.

Ces dernières sont obtenues à l'aide de capteurs de toutes sortes, chacun ayant un usage bien précis en fonction de ce que l'on souhaite mesurer. Ils permettent de convertir une mesure physique en un signal électrique que nous pouvons exploiter dans un système ou enregistrer sous forme de séries de données. Nous en sommes entourés dans notre vie quotidienne, même si la plupart du temps nous ne nous en rendons même plus compte.

Il serait difficile ici de dresser une liste exhaustive de tous les capteurs existants mais voici les familles les plus courantes que vous pourriez rencontrer ou être amené à utiliser au travers de quelques exemples :

- les capteurs de temps permettent une mesure précise du temps écoulé : chronomètre, horloge... ;
- les capteurs de position donnent la position précise d'un objet par rapport à une référence (position linéaire ou angulaire) ;

- les capteurs de vitesse mesurent la vitesse d'un déplacement;
- les accéléromètres mesurent l'accélération selon les trois axes de l'espace;
- les capteurs de pression qui existent sous différentes formes qui permettent la mesure de pression atmosphérique, de la pression hydraulique ou de la pression mécanique;
- les capteurs de gaz donnent accès la concentration d'un gaz dans l'air ou dans un liquide (mesure O_2 , CO_2);
- les capteurs de champ électrique ou magnétique servent à mesurer les courants électriques qui parcourent notre corps *via* des électrodes... Idéal pour les applications médicales et les cardiofréquencesmètres;
- les capteurs de température : sondes, thermomètres...

Ces capteurs existent sous différentes formes en fonction de l'utilisation et des grandeurs à mesurer. L'important est de connaître leur existence afin de pouvoir s'appuyer dessus en fonction du besoin.

Leur mise en œuvre tend sur des savoirs faire de l'ingénieur mais heureusement aujourd'hui ces technologies sont suffisamment matures pour être utilisées par des profils venus de différents horizons.

Nous allons voir que l'utilisation de ces systèmes concerne un très large spectre d'applications et que leur connaissance peut vous ouvrir des voies dans les domaines de la recherche en physiologie et de l'amélioration de la performance.

Les tests en laboratoire

En laboratoire, le chercheur peut s'appuyer sur toutes les technologies existantes pour développer ses protocoles d'études et valider ses modèles. Les systèmes de mesures peuvent être très encombrants et complexes de mises en œuvre mais ce n'est pas ce qui compte ici, c'est l'acquisition la plus fine et la plus fiable de série de données dans un environnement contrôlé afin de les interpréter pour comprendre un phénomène et faire progresser la connaissance. Les données sont acquises de la manière la plus brute puis traitées par des programmes faits par le chercheur.

Un test d'effort est un exemple simple d'expérience de laboratoire : Le sujet doit produire un motif d'effort bien déterminé en termes de rythme, de durée, et d'intensité. Ses paramètres cardiaques sont mesurés avec un cardiofréquencesmètre, ses échanges gazeux avec des capteurs d'oxygène et de gaz carbonique. Sa puissance musculaire peut également être enregistrée avec un capteur de puissance (Wattmètre).

Le chercheur, en corrélant les données de plusieurs tests d'effort et d'un protocole d'entraînement peut facilement étudier et quantifier la réalité des bénéfices et sur quels aspects ils sont observés (VO_{2max} , puissance musculaire...).

Sortir du laboratoire

La miniaturisation de l'électronique a permis l'intégration de nombreux capteur dans des espaces très réduit. Un téléphone portable ou une montre connectée contiennent aujourd'hui communément un accéléromètre, des capteurs de température, de luminosité, de fréquence cardiaque... Toutes ces fonctionnalités permettent aisément d'imaginer sortir les expériences de l'environnement complexe et normé du laboratoire.

Le but est d'acquérir des données fiables sur le terrain afin d'affirmer ou d'infirmer les hypothèses de modèles en faisant sortir les patients du laboratoire.

Mais une minute ce n'est pas toujours si simple! Encore faut-il que les capteurs miniaturisés qui vous intéressent existent! Le cas échéant, il faudra se poser la question de travailler avec des ingénieurs afin de les concevoir ou de trouver des solutions adaptées.

Les systèmes de dépistage de prévention et de suivi intelligents

On peut aller encore plus loin dans l'intégration des technologies dans notre quotidien. La puissance des processeurs permet aujourd'hui d'embarquer dans un petit volume sur une personne tout le nécessaire en termes de capteur et de méthode de diagnostic.

De la surveillance et l'alerte de chute pour les personnes âgées, du contrôle de la glycémie pour les diabétiques, en passant par le gilet défibrillateur avec surveillance en temps réel pour les insuffisants cardiaques... les applications sont nombreuses.

Cependant, ce n'est que le début d'un domaine qui devrait prendre une importance croissante dans les décennies à venir avec le domaine des vêtements connectés.

Le saviez-vous

De la cosmochimie vers la maladie d'Alzheimer : les équipes de recherche de l'institut de physique du globe de Paris et de la faculté de santé de l'université Paris-Cité ont utilisé des outils, initialement dédiés à l'étude de

la formation des planètes, pour analyser le cerveau de patients atteints de la maladie d'Alzheimer. Ils ont ainsi découvert que le cerveau d'un patient atteint de cette maladie est plus riche en isotopes légers du cuivre qu'un cerveau sain (Moynier et al., 2020). Les chercheurs vont, dans un futur proche, essayer de voir si ce type de modifications pourrait être retrouvé dans le sang et/ou le liquide cébrospinal afin d'envisager la création de test de dépistage moins invasif. Cela pourrait ouvrir sur de nouvelles pistes de traitement.

Dans ce cadre, une technologie innovante type semelles plantaires connectées, comme proposé par la *start-up* française FeetMe, permet d'analyser en temps réel et en conditions de vie naturelles les paramètres spatiotemporels de marche. Cette technologie combine capteurs de pression, centrale inertielle et des algorithmes d'apprentissage permettant une analyse de la capacité fonctionnelle du patient. Elle permet un accompagnement en réadaptation et lors de l'activité physique, chez les patients atteints de troubles de la marche, par l'intermédiaire d'une plateforme interactive. Les données de marche recueillies sont disponibles instantanément et exploitables facilement notamment *via* une application smartphone.

Dans l'étude REHEARSE-FA, concernant la prévention du risque d'accident vasculaire cérébral, il est proposé le dépistage de l'arythmie cardiaque par fibrillation atriale³⁰ *via* les montres connectées type Apple Watch (Halcox et al., 2017).

Dans tous ces domaines, les technologies développées dans les domaines de l'intelligence artificielle et plus particulièrement du *machine learning* sont en plein essor. Elles permettent de s'adapter aux spécificités physiologiques de chaque patient et, par exemple, de détecter quand « ses » paramètres dérivent de « sa » normale, permettant en cela une surveillance personnalisée, d'anticiper et de prévenir des évolutions vers des pathologies plus graves.

De l'évaluation du *scoring* à la prévention des blessures chez le sportif

Effet de mode ou nécessité? L'analyse du *scoring* (fonctionnement du système des scores en situation de compétition), et plus généralement l'analyse *data* permet, dans un contexte

³⁰ À noter qu'un quart des AVC liés à une fibrillation atriale surviennent chez des patients dont l'arythmie était ignorée.

compétitif et concurrentiel, de maximiser les possibles « bénéfices marginaux », pour reprendre l'expression de Claude Onesta (Agence nationale du sport, 2020, p. 51), directeur de la cellule performance de l'Agence nationale du sport³¹.

Mais qu'est-ce qu'une *modélisation*? Il s'agit tout d'abord, pour en réaliser une, de saisir les éléments caractéristiques d'une activité et de ses règles en compétition : pour chaque sport, on nomme ces éléments la *logique interne* (Parlebas, 2005). Celle-ci précise, par exemple pour le karaté (Frigout et al., 2017, 2019), les logiques d'acteurs (combattants, arbitres, juges), de temps, d'espaces de règles et de *scoring* (points et pénalités). Son étude nous permet de proposer une modélisation de l'activité (pour s'entraîner/pour combattre en compétition). La *modélisation* propose donc, à partir des éléments de *logique interne*, une « logique organisationnelle propre » (Parlebas, 2005, p. 11) résidant dans quatre points (Parlebas, 2005, p. 16) : « Une description simplifiée, une simulation opérationnelle qui expose une dynamique de fonctionnement, un traitement objectif des données, et éventuellement une prédiction, une mise en œuvre d'expérimentations en situation de terrain ».

Dans l'exemple d'analyse du *scoring* dédiée uniquement aux pénalités en compétition de karaté présentée dans le tableau 9.2 (Frigout, 2017) se lisent deux problèmes distincts, en lien avec la prévention des blessures.

Les éléments de *scoring*, ici pour un seul sport (le karaté), révèlent combien le lien est en fait indiscutable, entre modélisation et prévention. La règle analysée et comprise donne des *modélisations* possibles pour mieux s'entraîner et performer – ici en combat. Et ce, dans une règle où les coups doivent être maîtrisés, mais où finalement porter un coup permet de gagner du temps, de déstabiliser l'adversaire, de le forcer à changer de stratégie (sur une mauvaise gestion émotionnelle et donc une mauvaise prise de décision). Et tout cela, sans que le corps arbitral soit formé à gérer un TKO (*Technical Knockout*) (hors-combat) debout (une personne devant être « comptée », comme en boxe anglaise), et puisse reprendre le combat, ni qu'aucun matériel connecté (gants, protections poings et pieds, plastrons) ne puisse détecter/enregistrer des données au service de la prévention. Ainsi, comme le présente le chapitre sur la prophylaxie (voir chapitre 4), l'entraînement, au fait de la *logique interne* et d'une *modélisation* établie, doit mettre en œuvre un travail spécifique de prévention des blessures adapté à chaque discipline sportive.

³¹ www.agencedusport.fr/sites/default/files/2022-01/ANS_HP_2021_AmbitionBleue.pdf

Tableau 9.2. Pénalités de contacts et de comportements interdits en lien avec la victoire.

Pénalités	0	1	2	3	4	Commentaires
Catégorie 1 (Contacts)	264/253 NS	45/56 NS*	12/17 NS	6/6 NS	3/0 PS	$p = 0,17$. Relation non significative avec le <i>Khi2</i> , mais relation du nombre de pénalités avec la victoire. *Sur le groupe senior international uniquement : 14/23 TS
Catégorie 2 (Comp. Interdits)	154/140 NS	155/169 NS	87/107 PS	39/69 TS	6/0 S	$p \leq 0,01$. Parmi les 6 disqualifiés, 2 le sont pour mise en danger (<i>mubobi</i>) ayant entraîné une blessure.

Le **tableau 9.2** présente, pour l'activité karaté en compétition, les observations d'éléments de scoring liés aux pénalités (contacts excessifs et comportements interdits). On notera les éléments de significativité pour les séniors internationaux avec la nécessité, pour s'associer à la victoire, de porter au moins 1 coup par combat (pour au moins 56 combattants), et la mise en danger (*mubobi*) sur les pénalités de catégorie 2 (pour au moins 2 combattants).

NS = non significatif; PS = peu significatif; S = significatif; TS = très significatif.

Les résultats présentent le nombre de combattants impliqués sur la typologie spécifiée de pénalité. Le perdant est indiqué avant le symbole /, et le vainqueur est placé après.

Et que dire d'un sport qui connaît depuis plusieurs décennies des études poussées sur sa *modélisation*, son système des scores, ses *game-books*, la violence de ses contacts physiques – le football américain, et pour lequel rien ou presque n'est fait en matière de prévention des blessures, ce qui conduit des contingents entiers de sportifs quadra ou quinquagénaires à mourir de blessures traumatiques non dépistées, ni analysées, et encore moins encadrées par un système préventif structuré (Omalu *et al.*, 2010).

Le saviez-vous

La Fédération anglaise de football vient d'interdire le jeu de tête en match pour les joueurs de moins de 12 ans. Le but est d'éviter de potentielles microlésions liées aux microtraumatismes cérébraux répétés induits par le jeu de tête sur un cerveau d'enfant en pleine croissance.

Conclusion

L'interdisciplinarité est une source d'enrichissements intellectuels et professionnels indéniable. Les différents exemples cliniques et les divers modèles transversaux de recherche décrits dans ce chapitre doivent ouvrir votre raisonnement vers un modèle cognitif « arborescent » au service de vos patients, athlètes, et de tous ceux que vous croiserez lors de votre carrière afin de leur proposer la meilleure prise en charge possible sans oublier la philosophie du « *cure and care* ».

QUIZ

QCM 1

L'apesanteur peut induire chez le cosmonaute :

- A un aplatissement des globes oculaires
- B une perte de masse osseuse de 1 à 2 % par mois
- C une augmentation de masse musculaire

QCM 2

L'activité physique :

- A entraîne une prise de poids et un diabète de type 2
- B limite le risque de développer certains cancers
- C améliore la qualité de vie du patient ayant un cancer

QCM 3

Parmi les découvertes scientifiques récentes, lesquelles sont vraies ?

- A Le tissu cérébral du cosmonaute n'est modifié par l'apesanteur
- B Le cerveau d'un patient atteint de la maladie d'Alzheimer est plus faible en isotope cuivre qu'un cerveau sain
- C La montre connectée Apple Watch a montré son efficacité dans la prévention des accidents vasculaires cérébraux d'origine cardio-embolique

QCM 4

La modélisation du score en recherche permet :

- A de maximiser les bénéfices marginaux d'une préparation sportive compétitive
- B de ne plus avoir aucun lien avec la pratique de l'activité
- C de prévenir les blessures en s'intégrant notamment dans l'analyse *data*

Bibliographie

- Agence nationale du sport. Ambition bleue, 2020. Disponible sur : www.agencedusport.fr/sites/default/files/2022-01/ANS_HP_2021_AmbitionBleue.pdf.
- Ammann-Reiffer C, Bastiaenen CHG, Meyer-Heim AD, et al. Effectiveness of robot-assisted gait training in children with cerebral palsy: a bicenter, pragmatic, randomized, cross-over trial (PeLoGAIT). *BMC Pediatr* 2017;17(1):64.
- Halcox JPJ, Wareham K, Cardew A, et al. Assessment of remote heart rhythm sampling using the alivecor heart monitor to screen for atrial fibrillation: The REHEARSE-AF study. *Circulation* 2017;136(19):1784–94.
- Delafontaine A. Locomotion humaine : marche, course. Bases fondamentales, évaluation clinique et applications thérapeutiques de l'enfant à l'adulte. Issy-les-Moulineaux: Elsevier Masson; 2018. p. 372.
- Delafontaine A. Réussir la démarche de recherche universitaire en kinésithérapie et thérapie manuelle : méthodologie. Lecture critique d'articles. Mémoire de fin d'études. Issy-les-Moulineaux: Elsevier Masson; 2019. p. 312.
- DeLuca PA, Davis RB, Ounpuu S, Rose S, Sirkin R. Alterations in surgical decision making in patients with cerebral palsy based on three-dimensional gait analysis. *J Pediatr Orthop* 1997;17(5):608–14.
- Ditcharles S, Yiou E, Delafontaine A, et al. Short-term effects of thoracic spine manipulation on the biomechanical organisation of gait initiation: A Randomized Pilot Study. *Front Hum Neurosci* 2017;30(11):343.
- Frigout J, Laporte R, Lepresle A. Modelling and scoring system in karate. *Olympika* 2017;26:73–92.
- Frigout J, Tasseel-Ponche S, Delafontaine A. Strategy and decision making in karate. *Front Psychol* 2019;10:3025.
- Gouelle A, Megrot F, Presedo A, et al. 2011. Validity of functional ambulation performance score for the evaluation of spatiotemporal parameters of children's gait. *J Mot Behav* 2011;43(2):95–100.
- Lee SY, Kim MS, Chang WH, et al. Effects of repetitive transcranial magnetic stimulation on freezing of gait in patients with Parkinsonism. *Restor Neurol Neurosci* 2014;32(6):743–53.
- Matthis JS, Yates JL, Hayhoe MM. Gaze and the control of foot placement when walking in natural terrain. *Curr Biol* 2018;28(8):1224–1233.e5.
- Moynier F, Le Borgne M, Laoud E, et al. Copper and zinc isotopic excursions in the human brain affected by Alzheimer's disease. *Alzheimers Dement* 2020;12(1), e12112.
- Omalu Bennet I, Hamilton Ronald L, Bailes J, et al. Chronic traumatic encephalopathy (CTE) in a national football league player. *J Forensic Nurs* 2010;6(1):40–6.
- Parlebas P. Modélisation dans les jeux et les sports. *Mathématiques et sciences humaines* 2005;170:11–45.
- Sylos-Labini F, Lacquaniti F, Ivanenko PY. Human locomotion under reduced gravity conditions: biomechanical and neurophysiological considerations. *Biomed Res Int* 2014;2014, 547242.
- Van Kammen K, Boonstra AM, van der Woude LHV, et al. Lokomat guided gait in hemiparetic stroke patients: the effects of training parameters on muscle activity and temporal symmetry. *Disabil Rehabil* 2019;11:1–9.
- Van Ombergen A, Jillings S, Jeurissen B, et al. 2018. Brain tissue-volume changes in cosmonauts. *N Engl J Med* 2018;379(17):1678–80.
- Viehweger E, Haumont T, de Lattre C, et al. Multidimensional outcome assessment in cerebral palsy: is it feasible and relevant? *J Pediatr Orthop* 2008;28(5):576–83.
- WHO. Global health risks: mortality and burden of disease attributable to selected major risks; 2009.
- Xu Y, Hou Q-H, Russell SD, et al. Neuroplasticity in post-stroke gait recovery and noninvasive brain stimulation. *Neural Regen Res* 2015;10(12):2072–80.