Évaluation des réponses respiratoires, musculaires et perceptuelles lors d'un test d'aptitude aérobie chez le jeune en situation d'obésité

Louis Toulouse

▶ **To cite this version:**

Louis Toulouse. Évaluation des réponses respiratoires, musculaires et perceptuelles lors d'un test d'aptitude aérobie chez le jeune en situation d'obésité. Education. Université du Littoral Côte d'Opale, 2021. Français. NNT : 2021DUNK0597 . tel-03414482

HAL Id: tel-03414482
https://theses.hal.science/tel-03414482

Submitted on 4 Nov 2021

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.

Thèse de Doctorat

Mention Sciences Humaines et Humanités
Spécialité Sciences et Techniques des Activités Physiques et sportives

Unité de Recherche Pluridisciplinaire Sport Santé et Société

ULR 7369 – Activité Physique, Muscle, Santé

présentée à ***l'Ecole Doctorale en Sciences Technologie et Santé (ED 585)***

par

Louis TOULOUSE

de l'Université du Littoral Côte d'Opale

pour obtenir le grade de Docteur de l'Université du Littoral Côte d'Opale

Evaluation des réponses respiratoires, musculaires et perceptuelles lors d'un test d'aptitude aérobie chez le jeune en situation d'obésité

Soutenue le 10 juin 2021, après avis des rapporteurs, devant le jury d'examen :

M^me^ , Pascale DUCHE, PR, Université de Toulon	**Rapporteur**
M. Fabrice PRIEUR, MCF HDR, Université d'Orléans	**Rapporteur**
M^me^ Emilie SIMONEAU, PR, UPHF	**Examinateur**
M. David THIVEL, MCF HDR, UCA	**Examinateur**
M. Rawad EL HAGE, PR, Université de Balamand	**Examinateur**
M. Jean-Michel LECERF, PR, Institut Pasteur	**Examinateur**
M. Gautier ZUNQUIN, MCF HDR, UPPA	**Directeur de thèse**
M. Hervé DEVANNE, MCF HDR, ULCO	**Co-Directeur**

Résumé

L'optimisation des bénéfices d'un programme d'activité physique adaptée sur l'aptitude aérobie est conditionnée par la capacité du test à mesurer et détecter les changements dans les paramètres que l'on souhaite investiguer, qui sont principalement la vitesse maximale aérobie (VMA) et la consommation maximale en oxygène (VO_{2max}). Or, les jeunes en surpoids atteignent difficilement un état cardiorespiratoire maximal lors des tests de marche/course d'intensité croissante, pouvant entraîner une sous-estimation de ces paramètres. L'implication des facteurs psychologiques et physiologiques dans la non-atteinte de VO_{2max} au cours d'un test de marche/course chez le jeune en surpoids restent peu clairs. L'objectif de ce travail de thèse fut ainsi d'apporter un éclairage sur les mécanismes susceptibles d'expliquer les abandons précoces lors des tests de marche/course d'intensité croissante chez le jeune en surpoids. Dans une première étude, notre travail s'est intéressé aux tests de marche ou de course en navette, qui sont les tests de terrain les plus pratiqués pour mesurer l'aptitude aérobie (VO_{2max}, VMA) en raison de leur rapport coût efficacité élevé. Nous avons supposé que la répétition d'un nombre croissant de Phases de Freinage-Réaccélérations (PFR) pouvait entraîner une augmentation exagérée du coût énergétique chez le jeune en surpoids, justifiant les abandons précoces décrits lors de ce type de test. Ainsi, nous avons mesuré VO_2 et la pénibilité de l'effort (RPE) chez 19 adolescents en surpoids de grade III lors de trois tests incrémentaux de 12 minutes par paliers successifs de 3 minutes aux allures de 3, 4, 5 et 6 $km.h^{-1}$: un protocole continu, un protocole continu comportant deux PFR par minute et un protocole intermittent 15-15. Les résultats ont indiqué que l'impact des PFR sur VO_2 et la RPE était non significatif à ces allures et que la modalité intermittente permet de diminuer le coût énergétique aérobie de 15-25%. Dans la seconde et la troisième étude, notre travail a porté sur les test de marche d'intensité croissante sur tapis roulant. La littérature indique qu'une proportion importante de jeunes en surpoids ne parvient pas à atteindre les critères définissant l'atteinte de VO_{2max} lors de ce type

de test. Pourtant, aucune étude n'a testé expérimentalement l'hypothèse selon laquelle des mécanismes musculaires pouvaient en être à l'origine. Dans notre seconde étude, nous avons mesuré conjointement les cinétiques d'oxygénation du gastrocnémien et de VO_2 chez 26 jeunes en surpoids âgés de 9-15 ans, lors d'un test de marche d'intensité croissante sur tapis roulant. Un point d'inflexion dans la désoxyhémoglobine musculaire a été observé chez 25 participants à 75-80% de VO_{2peak} et son délai d'apparition était corrélé à la durée du test. Dans notre troisième étude, nous avons mesuré l'influence du sexe, de la maturation et du grade de surpoids sur la probabilité d'atteindre 4 critères de vérification de VO_{2max} (plateau de VO_2, FC>200 bpm, RER>1.0, RPE>5/10) chez 73 jeunes en surpoids âgés de 8 à 16 ans. Les enfants en surpoids de grade II avaient davantage de probabilité d'atteindre une RPE>5/10 (« dur » sur l'échelle de Borg CR-10) et avaient un pic de ventilation maximale inférieur à ceux en surpoids de grade I. Ensemble, ces deux études suggèrent que l'inaptitude à produire un effort maximal sur tapis roulant est en partie liée à la survenue d'un déséquilibre entre la demande énergétique et le niveau d'extraction de l'O_2 au niveau du gastrocnémien, ainsi qu'à de plus faibles capacités ventilatoires. En conclusion, ce travail de thèse apporte un éclairage sur l'influence des facteurs musculaires, respiratoires et perceptuels sur l'atteinte de VO_{2max} lors d'un test de marche d'intensité croissante chez le jeune en surpoids. Pour les cliniciens souhaitant mettre en place ce type de test, nous encourageons ainsi la mise en place de stratégies destinées à 1) atténuer les sollicitations musculaires et 2) favoriser une adaptation ventilatoire optimale.

Abstract

The optimization of the benefits of an adapted physical activity program on aerobic fitness is conditioned by the ability of the test to measure and detect changes in the parameters that we wish to investigate, which are mainly maximal aerobic speed (MAS) and maximal oxygen uptake (VO_{2max}). However, youths with obesity have difficulties to reach a maximum cardiorespiratory state during walking/running tests of increasing intensity, which may lead to an underestimation of these parameters. The involvement of psychological and physiological factors in the non-achievement of VO_{2max} during a walk/run test in youths with obesity remains unclear. The objective of this thesis was to shed light on the mechanisms that may explain early dropout during walking/running tests of increasing intensity in youths with obesity. In a first study, our work focused on shuttle walking/running tests, which are the most commonly used field tests to measure aerobic fitness (VO_{2max}, VMA) because of their high cost effectiveness. We assumed that the repetition of an increasing number of Braking-Reacceleration Phases (BRS) could lead to an exaggerated increase in energy cost in youths with obesity, justifying the early dropouts often described during this type of test. Thus, we measured VO_2 and ratings of perceived exertion (RPE) in 19 grade III obesity adolescents performing three 12-minute incremental tests in successive 3-minute increments at paces of 3, 4, 5, and 6 $km.h^{-1}$: a continuous protocol, a continuous protocol with two BRPs per minute, and a 15-15 intermittent protocol. The results indicated that the impact of BRPs on VO_2 and RPE was non-significant at these paces and that the intermittent modality decreased aerobic energy cost by 15-25%. In the second and third study, our work focused on treadmill walking tests of increasing intensity. The literature indicates that a significant proportion of youths with obesity fail to reach the criteria defining the achievement of VO_{2max} during this type of test. However, no study has experimentally tested the hypothesis that muscular mechanisms could be at the origin of this. In our second study, we jointly measured gastrocnemius oxygenation and pulmonary VO_2

kinetics in 26 overweight youths aged 9 to 15 years, during a treadmill walking test of increasing intensity. A breakpoint in muscle deoxyhemoglobin was observed in 25 participants at 75-80% of VO_{2peak} and its time of onset correlated with test duration. In our third study, we measured the influence of gender, maturation, and grade of overweight on the likelihood of achieving 4 VO_{2max} verification criteria (VO_2 plateau, HR>200 bpm, RER>1.0, RPE>5/10) in 73 overweight youths aged 8 to 16 years. Overweight grade II children were more likely to achieve an RPE>5/10 ("hard" according to the Borg CR-10 scale) and had a lower peak of maximal ventilation than grade I obesity children. Together, these two studies suggest that the inability to produce maximal treadmill effort may be related to an imbalance between O_2 supply and utilization in the gastrocnemius, potentially related to lower ventilatory capacities. In conclusion, this thesis work provides new knowledge on the influence of muscular, respiratory and perceptual factors on the achievement of VO_{2max} during a walking test of increasing intensity in youths with obesity. For clinicians wishing to set up this type of test, we thus encourage the implementation of strategies intended to 1) attenuate muscular solicitations and 2) promote optimal ventilatory adaptation.

Remerciements

Mes premiers remerciements s'adressent aux jeunes de CEMHaVie, du réseau PREVAL et de l'Hôpital Maritime de Zuydcoote pour la confiance que vous m'avez accordée. Les années passées à coacher et à pratiquer des activités physiques avec eux m'ont fait grandir.

Je remercie ensuite l'ULCO et le PMCO pour m'avoir soutenu financièrement lors de ces trois années de doctorat. Je mesure la chance d'avoir pu bénéficier d'un contrat doctoral.

Je remercie tous les membres du Parcours Obésité Littoral à Dunkerque. Votre investissement pour la prise en charge du surpoids, malgré les obstacles, témoigne de votre dévouement envers vos patients ou adhérents. Je suis particulièrement reconnaissant envers le Docteur Anne Schill, chef de service pédiatrie à l'Hôpital Maritime de Zuydcoote, et Marie-Odile Vanhille, directrice du réseau PREVAL, bien que ces mots soient trop courts pour vous le témoigner.

Ensuite, je remercie sincèrement le Professeur Pascale Duché et le **Docteur Fabrice Prieur** pour avoir accepté d'être les rapporteurs de mon travail. J'espère que celui-ci sera agréable à lire et répondra à vos attentes. Je remercie également le **Docteur David Thivel** et le **Docteur Antonio Pinti** pour m'avoir conseillé dans le cadre du Comité de Suivi de Thèse. Vos expertises ont contribué à améliorer la qualité de mon travail. Je remercie le **Professeur Rawad El Hage** pour avoir accepté d'examiner mon travail lors de la soutenance.

Je remercie chaleureusement mon collègue et ami **Thierry Pezé** pour m'avoir épaulé sur toutes mes analyses statistiques et transmis ses connaissances en la matière. Tes conseils ont contribué au professionalisme de ce travail et m'ont beaucoup apporté sur le plan personnel.

Merci à l'ensemble des collègues de l'URePSSS pour les enseignements et vos conseils précieux tout au long de ma formation. A mon regret, je n'ai pas été très présent lors de la thèse compte tenu de mon travail à Dunkerque et des conditions sanitaires qui ont suivi. Je remercie en particulier le Professeur **Patrick Mucci** qui m'a apporté des solutions méthodologiques pertinentes lors de la conception de mon protocole et accordé de son temps pour me conseiller.

Je remercie ma famille, ma belle-famille et mes amis pour me permettre de passer de bons moments avec vous chaque semaine. Ces moments ont été indispensable pour mon équilibre, en particulier lors de cette dernière année. Vous m'avez appris les valeurs d'humilité, de loyauté et d'autodétermination. Je dédie en particulier ce travail à un proche dont je ne partage ni le nom, ni le sang, mais dont j'ai hérité mon intérêt pour l'éducation sportive, ma curiosité scientifique et ma philosophie de vie.

Je remercie ma fiancée **Gwendoline** pour me rendre heureux tous les jours. Ton courage, ton dévouement pour les autres et ta persévérance dans ton travail d'enseignante spécialisée m'ont donné la motivation pour donner le meilleur de moi-même.

Je remercie mes quatres petits ~~singes~~ frères **Rémi, Hugo, Tom et Elliot** - vous resterez toujours petits pour moi même si vous mesurez plus d'1m68. Plus sérieusement, vous m'avez appris ce que c'est d'être responsable des autres. Vous pourrez toujours compter sur moi.

Je remercie le **Docteur Hervé Devanne** pour avoir accepté de co-encadrer mon travail malgré nos thématiques de recherches éloignées. Tes relectures pointilleuses et ton regard extérieur m'ont permis de mieux m'adresser à des collègues non-experts. Tes conseils personnels m'ont également éclairé lorsque je devais prendre une décision.

Pour terminer, mon dernier message se destine à celui que j'ai du mal à désigner comme un simple directeur de thèse, tant il m'a apporté sur le plan universitaire et personnel. Tu as pu remarquer que ce n'est pas ma spécialité, mais je ferai ici un effort de synthèse symbolique pour te témoigner ma reconnaissance : Merci **Gautier.**

Table des matières

Liste des Abbréviations 11

Liste des Figures 12

Liste des Tableaux 16

Publications scientifiques 18

Communications orales 18

Introduction 19

Revue de la littérature 21

I. Activité Physique, Exercice et Santé chez le jeune en surpoids 22

1. Données épidémiologiques 22

2. Rôle de l'activité physique dans la prévention et la prise en charge du surpoids pédiatrique 31

II. Influence du surpoids sur les paramètres de l'aptitude maximale aérobie 41

1. Aptitude maximale aérobie 41

2. La vitesse maximale aérobie 43

3. La consommation maximale en oxygène (VO_{2max}) 46

4. Coût énergétique 52

III. Influence du surpoids sur la tolérance physiologique et psychologique à l'effort 59

1. Sur la fonction respiratoire 59

2. Sur la fonction musculaire 65

3. Sur la pénibilité de l'effort 67

Objectif général 70

Contribution personnelle 72

IV. Etude 1 73

1. Contexte scientifique 73
2. Objectifs & hypothèses 82
3. Matériel et méthode 83
4. Résultats 87
5. Discussion 90
6. Conclusion 97

V. Etude 2 99

1. Contexte scientifique 99
2. Objectifs & hypothèses 114
3. Matériel et méthode 114
4. Résultats 120
5. Discussion 123
6. Conclusion 127

VI. Etude 3 129

1. Contexte scientifique 129
2. Objectifs & hypothèses 136
3. Méthode 137
4. Résultats 139
5. Discussion 142
6. Conclusion 148

Synthèse graphique des apports et perspectives de ce travail de thèse 150

Conclusion générale 151

Bibliographie 154

Liste des Abbréviations

20-MST = Test de course en navette de 20 mètres

BP = Breakpoint (cassure)

CDG = Centre De Gravité

CE = Coût Energétique

Deoxy[heme] = Désoxyhémoglobine

$FC_{(max)}$ = Fréquence Cardiaque (maximale)

FFM = Fat-Free Mass (masse maigre)

FM = Fat-Mass (masse grasse)

IMC = Indice de Masse Corporelle

IOTF = International Obesity Task Force

NIRS = Near Infrared Spectroscopy (Spectroscopie du Proche-InfraRouge).

OMS = Organisation Mondiale de la Santé

Oxy[heme] = Oxyhémoglobine

PFR = Phase de Freinage-Relance

PHV = Peak Height Velocity (pic de croissance staturale)

RER = Rapport des Echanges Respiratoires

RPE = Rating of Perceived Exertion (perception de l'effort)

StO_2 = Saturation Tissulaire en Oxygène

SV = Seuil Ventilatoire

Total[heme] = Hémoglobine totale

VE = Ventilation Minute

VMA = Vitesse Maximale Aérobie

$VO_{2(max)}$ = Consommation (maximale) en oxygène

Liste des Figures

Figure 1 : Courbes de référence internationales pour l'IMC chez l'enfant de 2 à 18 ans par sexe proposées par l'IOTF (en noir) et par l'OMS (en gris). Figure extraite de l'article de Cole et Lobstein., 2012. Sur cette Figure, on observe que les normes de l'OMS ont tendance à classer les enfants dans une catégorie supérieure de poids pour un IMC équivalent en comparaison avec les normes IOTF jusqu'à 12-14 ans, tandis que cette tendance s'inverse jusqu'à l'âge de 18 ans. 27

Figure 2 : Rebond d'adiposité chez le garçon. En moyenne, le rebond d'adiposité se produit vers l'âge de 6 ans (ellipse verte). L'enfant fictif suivi ci-dessus présente un rebond d'adiposité précoce, survenu à l'âge de 3 ans (ellipse rouge), prédicateur du surpoids dans les années futures. 30

Figure 3 : distinction conceptuelle entre sédentarité et activité physique (Saunders et al., 2014) 36

Figure 4 : Modèle de prédiction de la performance aérobie adapté de McCormack et al. (1991), extrait du livre « L'enfant et l'activité physique : de la théorie à la pratique », chapitre 3, éditions DésIris 2014 43

Figure 5 : Représentation théorique des seuils ventilatoires. SV_1 se produit lorsque la pente de la relation VE/VO_2 augmente, signifiant une augmentation disproportionnée de la ventilation par rapport à la demande en oxygène. SV_2 correspond à une augmentation de la ventilation en vue de contrer l'acidose sanguine dû à la présence excessive d'ions H+ (Wasserman, 1986) . Certains auteurs paramètrent les exercices à haute intensité à partir du SV_2 (Rey et al., 2017). Chez l'enfant en surpoids, dû au déconditionnement, les seuils ventilatoires apparaîssent à des intensités relatives inférieures par rapport aux enfants de poids normal. 62

Figure 6 : Représentation du test de course en navette de 20 mètres (Léger et al., 1988). Le participant doit effectuer des allers-retours sur une distance de 20 mètres au rythme d'un signal sonore de plus en plus fréquent. Le palier de départ correspond à une vitesse de 8 km/h, mais peut être adapté aux capacités physiques du participant (6 ou 4 km/h). 74

Figure 7 : Evolution typique de la vitesse de marche/course de deux participants entre deux signaux sonores lors d'un test de marche/course en navette de 20 mètres. Bien que les deux participants aient respecté le délai nécessaire pour parcourir les 20 mètres sans s'arrêter, la gestion de la vitesse de course diffère entre les deux participants. 76

Figure 8 : VO_2 en fonction de la fréquence des PFR et de la vitesse de marche. La pente de la relation VO_2 / PFR augmente avec la vitesse, indiquant que le surcoût en oxygène associé aux PFR est amplifié par la vitesse (figure extraite de l'article de Hatamoto et al., 2014). 78

Figure 9 : Représentation du Spartacus test (Rossi et al., 2009). Le protocole consiste à effectuer des périodes d'exercice de 15 secondes, suivies de périodes de récupération passives de 15 secondes. La distance à parcourir à chaque période d'exercice est déterminée par le palier. La vitesse initiale s'élève à 7 $km.h^{-1}$ et augmente de 1 km.h-^{1} toutes les 3 minutes. 80

Figure 10 : Représentation schématique des trois protocoles pour 1 minute d'exercice. Abbréviations : rec = récupération passive ; C = continu (contrôle) ; C-PFR = continu avec PFR ; 15-15 = protocole intermittent. La distance entre deux points noirs correspond à un intervalle de 4,17 mètres. 84

Figure 11 : consommation en oxygène (VO_2) en fonction de la vitesse de marche et du type de protocole. Différences significatives entre le protocole 15–15 et C: * ($p < 0.05$); ** ($p < 0.01$); *** ($p < 0.001$). Différences significatives entre le protocole 15–15 et C-PFR: ° ($p < 0.05$); °° ($p < 0.01$); °°° ($p < 0.001$). 88

Figure 12 : coût énergétique aérobie (Cw) en fonction de la vitesse de marche et du type de protocole. Différences significatives entre le protocole 15–15 et C: * ($p < 0.05$); ** ($p < 0.01$); *** ($p < 0.001$). Différences significatives entre le protocole 15–15 et C-PFR: ° ($p < 0.05$); °° ($p < 0.01$); °°° ($p < 0.001$). 89

Figure 13 : pénibilité de l'effort (RPE) en fonction de la vitesse de marche et du type de protocole. Les différences observées entre les protocoles ne sont pas significatives à $p<0.05$. 90

Figure 14 : Représentation d'un protocole incrémental avec des paliers de 1 minute. C'est le type de protocole caractérisant les tests de terrain. Les paliers varient de 1 à 3 minutes. 99

Figure 15 : Représentation d'un protocole de type "rampe". Ce type de protocole a été recommandé pour mesurer finement les gaz respiratoires car il permet une adaptation progressive à l'effort (Myers et al., 1992). 100

Figure 16 : Représentation du protocole de Balke (1959). La vitesse initiale est constante (5,6 km/h) et la pente augmente de 1% à chaque minute jusqu'à ce que le participant abandonne. 101

Figure 17 :Consommation en oxygène mesurée lors des protocoles de Bruce, Ellestad et Balke chez 16 hommes âgés de 19 à 47 ans (Figure extraite de l'article de Lukaski et al., 1989). . 101

Figure 18 : Schéma du fonctionnement de la NIRS. La lumière émise par les émetteurs passe à travers le tissu, est partiellement absorbée, puis est recueillie par un photorécepteur. La distance d séparant les diodes du photorécepteur détermine la profondeur de pénétration de la lumière dans le tissu. En théorie, la profondeur de pénétration de la lumière équivaut à la moitié de la distance d. La présence de trois émetteurs permet d'obtenir un signal moyen sur trois mesures, garantissant une meilleure fiabilité de la mesure. 106

Figure 19 : Cinétiques de deoxy[heme] chez l'adulte sain (points blancs) vs. l'adulte en surpoids (points gris) lors d'un exercice incrémental de bicyclette ergométrique (extrait de l'article de Machado et al. (2017). La baseline est définie à partir de l'incrément initial. Les cinétiques de deoxy[heme] ont été exprimées en amplitude de réponse par rapport à la baseline. 108

Figure 20 : Cinétiques de deoxy[heme] mesurées au niveau du vaste latéral lors d'un ramp test sur ergocycle mené jusqu'à épuisement (Spencer et al., 2012). Les données ont été modélisées selon un pattern sigmoïde sur la figure de gauche et selon un pattern bilinéaire sur la figure de droite..... 109

Figure 21 : Cinétiques de saturation en O2 du vaste latéral (VL) et du gastrocnémien (GL) lors d'un test de réactivité hyperémique post-occlusive ,puis lors d'un exercice incrémental de marche (4 et 6 km/h) et de course (8 à 16 km/h). Les données sont représentées en pourcentage de désaturation par rapport au niveau d'oxygénation mesuré au repos (100%) (Hiroyuki et al., 2002)..... 111

Figure 22 : Cinétiques de STO_2(%) (a), oxy[heme] (b), deoxy[heme] (c) et total[heme] (d). mesurées au niveau du gastrocnémien médial lors d'un test incrémental maximal effectué sur tapis roulant. Les cercles pleins correspondent aux enfants prépubères, tandis que les cercles vides correspondent aux hommes. Figures extraites de l'article de Takagi et al. (2014). 112

Figure 23 : Cinétiques de deoxy[heme] chez un participant présentant manifestement un BPdeoxy[heme]. Sur la base d'une inspection visuelle, la portion de signal à analyser pourrait démarrer à 37% de la durée d'exercice (intervalle rouge). BPdeoxy[heme] semble se situer à ~50% de la durée totale d'exercice. Afin de déterminer le point exact où le ralentissement de deoxy[heme] est le plus marqué, des régressions bilinéaires devraient être réalisées sur la portion de signal à analyser (intervalle 37 à 100%) en testant différents points situés dans la zone d'intérêt (cercle rouge) – par exemple, entre 45 et 55%..... 118

Figure 24 : Cinétiques de deoxy[heme] (en haut à gauche), STO_2(%) (en haut à droite), total[heme] (en bas à gauche) et oxy[heme] (en bas à droite) chez le groupe VO2 plateau (noir) et le groupe non-VO_2 plateau (gris). Les données sont exprimées en pourcentage moyen de variation par rapport à la baseline ± l'écart type. 121

Figure 25 : Exemple de courbes de VO_2 chez trois sujets ayant effectué un test incrémental maximal sur tapis roulant. Le sujet bleu présente un plateau de VO_2 ; le sujet orange ne présente pas de plateau de VO_2 ; le sujet gris est un cas particulier puisqu'il ne présente pas à proprement parler de « plateau », mais est considéré comme présentant un plateau en utilisant les critères de diminution de pente. 130

Figure 26 : Taux d'atteinte des critères de vérification de VO_{2max} pour le groupe total et par degré d'obésité. Différences entre les catégories d'obésité : * ($P<0.05$). 140

Liste des Tableaux

Tableau 1 : classification de l'obésité par l'OMS (dernière consultation : 04 septembre 2020) 25

Tableau 2 : Prévalence de la surcharge pondérale et de l'obésité selon le temps passé devant un écran les jours avec école, en classe de CM2 et de troisième. 34

Tableau 3 : Performances lors du test de course en navette de 20-mètres (Léger et al., 1988) chez des enfants et adolescents en fonction de leur statut pondéral. Les performances des jeunes en surpoids sont indiquées en gras. 45

Tableau 4 : Modes d'expression de VO_{2peak} accompagnés de leur principaux avantages et limites. 49

Tableau 5 : Modélisation du CE. Dans le modèle de Workman et Armstrong (1986), la dépense liée à la stabilisation du CDG et la stabilisation du CDG /support du poids lié aux déplacements est considéré comme nulle. Malatesta et al. (2003) observent que ceci ne s'applique pas aux seniors : chez ces derniers, la stabilisation du CDG /support du poids lié aux déplacements constitue une dépense énergétique additionnelle , d'où sa présence dans le modèle ci-présent. Le CE1, CE2 et CE3 correspondent aux trois compartiments du modèle de Malatesta et al. (2003). 53

Tableau 6 : Représentation schématique du CE au cours d'un exercice de marche en fonction du statut pondéral chez le jeune en surpoids, adapté des résultats de Peyrot et al. (2009). Le CE total est comparable entre les individus de catégorie de poids différentes. Le CE net augmente (de 15 à 25%) et le CE lié à la station debout diminue chez le jeune en surpoids en comparaison avec les jeunes de poids normal. 56

Tableau 6 : Fréquence des phases de freinage-réaccélération (PFR) lors d'un test de marche/course en navette de 20 mètres en fonction du palier. 77

Tableau 7 : caractéristiques des participants (valeurs moyennes ± SD). 87

Tableau 8 : Caractéristiques cliniques et données maximales d'exercice au sein des groupes VO_{2max} et non-VO_{2max}. 122

Tableau 9 : Nombre de participants ayant atteint les critères de validation d'atteinte de VO2max. L'épuisement maximal était achevé par l'ensemble des participants, celui-ci étant un

critère d'inclusion pour cette étude. Les lignes en gras représentent correspondent à l'atteinte de VO2max (au moins 2 critères). 122

Tableau 10 : Caractéristiques cliniques, réponses cardiorespiratoires et perceptuelles des participants en fonction du degré d'obésité et du sexe. Données présentées en moyenne ± SD. Différences entre les catégories d'obésité au sein des catégories de sexe : * ($p < 0.05$); ** ($p < 0.01$); *** ($p < 0.001$). Abréviations : IMC : Indice de Masse Corporelle ; bpm : battements par minute ; FFM : masse maigre ; PHV : âge du pic de croissance statural. 141

Tableau 11 : Risques relatifs (RR) pour l'atteinte des critères de validation d'atteinte de VO2max(clin) en fonction du sexe, de la maturation et du degré d'obésité. 142

Publications scientifiques

Ce travail a fait l'objet de trois articles en 1er auteur dont 2 ont été publiés :

Toulouse, L., Baquet, G., Heyman, E., Pezé, T., Berthoin, S., Schill, A., Aron, C., & Zunquin, G. (2020). Respiratory responses and rating of perceived exertion of severely obese adolescents during continuous and intermittent graded walking protocols: Application to cardiorespiratory field tests. Journal of sports sciences, 38(9), 1009–1017. https://doi.org/10.1080/02640414.2020.1738701

Toulouse, L., Mucci, P., Pezé, T., & Zunquin, G. (2021). Influence of grade of obesity on the achievement of VO2max using an incremental treadmill test in youths. Journal of sports sciences, 1–6. Advance online publication. https://doi.org/10.1080/02640414.2021.1898093

Un troisième article est en cours de relecture chez Obesity Facts :

Toulouse, L., Mucci, P., Morel, P., Pezé, T., & Zunquin, G. (2021). Muscle deoxygenation and cardiorespiratory responses to an incremental treadmill test in youths with obesity.

Communications orales

Ce travail a fait l'objet de trois communications orales :

Meeting annuel de l'ACAPS (2020, San Francisco) – Format virtuel :
Calf Muscle Oxygenation Limits Maximal Respiratory Performance During Incremental Walking Test In Obese Children: 640 May 27 1:00 PM - 1:15 PM. July 2020, Medicine & Science in Sports & Exercise 52(7S):166-166. doi: 10.1249/01.mss.0000675272.41203.67.

Congrès de l'ACAPS (2019, Paris) :
Toulouse L, Baquet G, Heyman E, Pezé T, Berthoin S, Schill A, Aron C, Zunquin G. Respiratory responses and rating of perceived exertion of severely obese adolescents during continuous and intermittent graded walking protocols: application to cardiorespiratory field tests. 18e Congrès international de l'ACAPS, 29-31 octobre 2019, Paris

Congrès national des professionnels de l'Activité Physique Adaptée (2019, Bobigny) :
Réponses respiratoires et perception de l'effort d'adolescents obèses lors de protocoles de marche incrémentaux continus et intermittent : applications lors d'épreuves cardiorespiratoires de terrain.

Introduction

Dans les pays occidentaux, la prévalence de l'obésité pédiatrique semble se stabiliser depuis les années 2000 (ESTEBAN, 2015). En revanche, le taux d'enfants présentant une obésité abdominale a drastiquement augmenté, entraînant désormais des cas de diabète de type 2 et de stéatose hépatique non-alcoolique dès l'adolescence (Lascar et al., 2018 ; Smith et Perito., 2018). Afin de prévenir l'apparition des comorbidités dès l'enfance, la pratique régulière d'une activité physique et la lutte contre la sédentarité constituent un axe d'intervention prioritaire défini en France par le Programme National Nutrition Santé. En effet, la pratique régulière d'activités physiques - en particulier à des intensités vigoureuses - permet d'améliorer significativement l'aptitude aérobie chez l'enfant (Ortega et al., 2008). Alors que l'aptitude aérobie est un marqueur robuste de la santé avec l'IMC chez l'enfant (Stoner et al., 2019) et chez l'adulte (Barry et al., 2018), celle-ci ne cesse de diminuer chez l'enfant depuis les années 1970 (Lang et al., 2019). Dans ce contexte aggravé par les restrictions due à la pandémie de COVID-19, le développement de stratégies visant à augmenter l'aptitude aérobie des jeunes par l'activité physique représente un défi prioritaire chez les jeunes en situation d'obésité. L'un des déterminants principaux de l'aptitude aérobie est la consommation maximale en oxygène (VO_{2max}). Ce paramètre est mesurable via un test progressif effectué en laboratoire (mesure directe) ou sur le terrain (estimation) lors duquel le participant doit fournir un effort cardiorespiratoire maximal. Cependant, une proportion importante de jeunes en situation d'obésité abandonneraient précocement lors de ces tests d'aptitude aérobie, que ce soit sur le terrain (tests de type « navette ») ou en laboratoire (marche sur tapis roulant), limitant la possibilité pour les cliniciens de mesurer VO_{2max} avec précision et pouvant entraîner une sous-estimation de leurs capacités réelles. Certains facteurs psychologiques tels que l'absence de motivation sont parfois la cause principale de ces abandons précoces. Néanmoins, de nombreux individus semblent en incapacité physique de poursuivre l'effort malgré leur motivation.

Dans la première partie de ce manuscrit, une revue de la littérature est proposée en trois chapitres afin de définir les concepts clés associés à l'obésité chez l'enfant et l'adolescent, l'activité physique, l'aptitude aérobie et la santé. Cette revue décrira également les conséquences du surpoids sur les fonctions cardiorespiratoires et musculaires et sur la perception de la difficulté de l'effort.

Dans la seconde partie du manuscrit, nous vous présenterons notre contribution scientifique sous la forme de trois études s'intéressant aux facteurs susceptibles d'expliquer l'incapacité à poursuivre un test d'aptitude aérobie chez le jeune en surpoids.

Revue de la littérature

I. Activité Physique, Exercice et Santé chez le jeune en surpoids

1. Données épidémiologiques

i. Prévalence et trajectoire actuelle de l'obésité pédiatrique

L'obésité est définie par l'OMS comme une accumulation anormale ou excessive de masse grasse ayant des conséquences délétères sur la santé. L'obésité fut officiellement reconnue comme une maladie chronique en 1997.

En 2016, 39% de la population adulte mondiale était en surcharge pondérale et 13% en situation d'obésité (OMS, 2016). Chez l'enfant et l'adolescent de 5 à 19 ans, on dénombrait 340 millions d'individus en surcharge pondérale ou en situation d'obésité. En France, les données de l'étude ESTEBAN (2015) indiquaient que 49% des adultes et 17% des enfants étaient en surpoids ou obèses. Bien que l'obésité progresse de manière spectaculaire à l'échelle mondiale, l'augmentation de la prévalence a ralenti en France ces 20 dernières années, passant de +5% par année en 2003 (Obépi-Roche, 2003) à +0.5% par année en 2012 (Obépi-Roche, 2012). Chez l'enfant, l'obésité semble stagner depuis une dizaine d'année dans les pays occidentaux (Olds et al., 2011). En France, l'étude ESTEBAN (2015) donnait des prévalences comparables chez les 3-17 ans à celles recueillies lors de la précédente décennie (ESTEBAN, 2006). Selon le Professeur Tounian, cette stabilisation pourrait être liée à l'atteinte progressive du nombre maximal d'enfants pouvant potentiellement développer une obésité compte tenu du taux d'enfants y étant génétiquement prédisposés, et du fait que l'environnement obésogène ait déjà gagné la quasi-totalité du territoire. D'après cette théorie, la majorité des enfants ne développera jamais une obésité quelles que soient les conditions environnementales dans lesquelles ils se trouvent ; seuls les enfants génétiquement prédisposés à développer une obésité peuvent devenir obèses à condition que l'environnement – dit alors « obésogène » (réduction de l'activité physique, augmentation de la sédentarité, nourriture riche et abondante) - permette

cette expression phénotypique. Ainsi lorsque tout le territoire national est devenu obésogène – comme cela est le cas dans les pays industrialisés – et que le nombre d'enfants prédisposés à devenir obèses le sont devenus, la prévalence atteint progressivement un plateau. Ainsi, la prévention de l'obésité pédiatrique reposerait en grande partie sur le contrôle des facteurs environnementaux favorisant le développement de l'obésité chez les enfants susceptibles de la développer. L'enjeu serait d'atténuer l'influence des facteurs « obésogènes » au profit des facteurs environnementaux favorables au maintien d'un poids sain. Ces facteurs environnementaux peuvent être appréhendés à l'échelle des populations (régulation de la publicité pour des produits riches, aménagements urbains ...) mais aussi à l'échelle des individus (rôle de l'éducation parentale, scolaire, programmes d'éducation thérapeutiques ...). Le contrôle de ces différents facteurs fait partie des enjeux de santé publique décrits dans le 4e volet du PNNS (2019-2023).

ii. Définition de l'obésité : cas particulier des enfants

L'indicateur le plus utilisé pour déterminer la présence d'une obésité chez un individu est l'Indice de Masse Corporelle :

$$\text{IMC } (kg.m^{-2} = \text{masse (kg)} / (\text{taille (m)} * \text{taille (m)})$$

Initialement, l'utilisation de l'IMC pour caractériser la présence ou non d'une obésité repose sur le postulat selon lequel l'IMC est en relation avec le degré d'adiposité d'un individu défini par la méthode des plis cutanés (Keys, 1972). Nous verrons par la suite que ce postulat présente certaines limitations (Fletcher, 2014).

D'un point de vue historique, l'IMC est un indicateur de corpulence créé en 1871 par un statisticien belge nommé Adolphe Quetelet afin de comparer des populations. Cette dernière précision est importante car depuis, son usage a été détourné et désormais, l'IMC est utilisé

pour caractériser la corpulence d'un seul individu. Plus tard dans les années 1950-60, l'IMC, (désigné également sous le terme W/H^2) fut utilisé par des compagnies d'assurance-vie nord-américaines comme indicateur du risque d'accident cardio-vasculaire pour calculer les primes d'assurance-vie (Fletcher, 2013). Les statistiques permettaient de calculer des seuils à partir desquels une surmortalité était observée. Par exemple, au sein de la compagnie *The American Metropolitan Life Insurance Company*, le surpoids et l'obésité correspondaient respectivement à l'atteinte d'un poids relatif supérieur à 110% et 120% de l'IMC moyen observé **sur leur clientèle** (Fletcher, 2013). Ces seuils ont été depuis étudiés et comparés avec ceux obtenus via d'autres indices tels que le W/H, W/H^3 ou encore l'index de Broca (« W – H100 » : la masse corporelle à laquelle l'on soustrait notre taille en centimètres réduite de 1 mètres – cette mesure est d'ailleurs encore utilisée de manière populaire comme indicateur de corpulence chez les femmes). En 1972, Ancel Keys et son équipe observent que W/H^2 est le paramètre le mieux corrélé aux mesures de pli cutané et concluent que « bien que n'étant pas totalement satisfaisant », cet outil était un bon indicateur pour caractériser l'obésité ou non d'un individu. Le principal avantage de l'IMC était que celui-ci était relativement peu influencé par la taille, ce qui permettait de n'utiliser qu'un seul paramètre pour caractériser le niveau d'adiposité d'individus de taille différente. En 1995, l'OMS publia un rapport sur l'anthropométrie dans lequel furent adoptés les seuils de surpoids (IMC 25-29,9) et d'obésité (IMC >30), signant le début de l'utilisation massive de l'IMC en épidémiologie, deux années précédant la reconnaissance de l'obésité comme une maladie chronique en 1997.

Ainsi selon l'OMS, un adulte est considéré comme étant en surcharge pondérale lorsqu'il a un IMC supérieur à 25 $kg.m^{-2}$ et en situation d'obésité lorsque son IMC est supérieur ou égal à 30 $kg.m^{-2}$. Il existe plusieurs grades d'obésité (tableau 1), du grade I (obésité modérée) au grade III (obésité morbide).

Tableau 1 : classification de l'obésité par l'OMS (dernière consultation : 04 septembre 2020)

IMC	Définition
< 18.5	Sous-poids
18.5 – 24.9	Poids sain
25 – 29.9	Surcharge pondérale
30 – 34.9	Obésité de grade I
35 – 39.9	Obésité de grade II
> 40	Obésité de grade III

Rappelons que ces seuils de corpulence ont été définis à partir de l'observation des facteurs de risques cardiovasculaires et de la surmortalité en fonction de l'IMC sur une cohorte d'individus (à priori) représentative de la population générale (OMS, 2000). Ces repères sont donc susceptibles d'évoluer à mesure que le lien entre IMC et comorbidité se précise et/ou évolue. Les seuils actuels ont d'ailleurs été récemment remis en question en raison du manque d'informations (tabagisme, origine ethnique, catégorie d'IMC) caractérisant certaines études ayant conduit à l'établissement de ces seuils. Dans une méta-analyse de 97 études visant à éclaircir le lien entre IMC et surmortalité chez l'adulte, Flegal et al. (2013) observent que l'obésité de grade I (IMC compris entre 30 et 34.9 $kg.m^{-2}$) n'était pas significativement associée à une surmortalité et que les individus en surcharge pondérale (IMC compris entre 25 et 29.9 $kg.m^{-2}$) présentaient un taux de mortalité équivalent voire inférieur à celui des individus possédant un IMC « normal » (compris entre 18.5 et 24.9 $kg.m^{-2}$). Ce travail souligne le caractère limité de l'IMC en tant que prédicateur du risque de mortalité et démontre qu'à lui seul, l'IMC ne peut suffire à diagnostiquer un état d'obésité, au sens d'une maladie chronique. Weir & Jan (2020) soulignent également l'importance d'adapter les seuils d'IMC définissant l'obésité aux populations étudiées, notamment au leur âge et leur origine ethniques. Ces auteurs

indiquent notamment que les repères de l'OMS ne sont pas valides chez l'enfant, l'athlète, et chez les individus d'origine asiatique. Par exemple, les asiatiques pourraient être classés en surpoids si leur IMC était compris entre 23 et 24.9 $kg.m^{-2}$ et en obésité si celui-ci était supérieur à 25 $kg.m^{-2}$ (Weir & Jan, 2020). Ceci n'est pas surprenant étant donné que les données ont été essentiellement recueillies chez des individus d'origine anglo-saxonne âgés de 18 à 65 ans souscrivant à une assurance vie.

Chez les enfants et les adolescents de moins de 18 ans, la définition actuelle de l'obésité est également basée sur l'IMC. Chaque IMC calculé est reporté sur une courbe de référence situant l'enfant par rapport à ses homologues du même âge et du même sexe (de l'année où les courbes ont été établies). Les premières courbes de référence ont été établies en France par Rolland-Cachera et al. (1991), s'intéressant à l'évolution de l'IMC chez l'enfant. Depuis lors, des courbes de référence internationales ont été développées, parmi lesquelles les plus utilisées actuellement sont celles de l'International Obesity Task Force ou IOTF (Cole et Lobstein, 2012) et de l'OMS (de Onis et al., 2007), présentées sur la Figure 1. Ces courbes de références utilisent comme point de repère :

- Le 85ème centile (IOTF et OMS), définissant le surpoids de grade I
- Le 95ème (IOTF) ou 97ème (OMS) centile, définissant le surpoids de grade II
- Le 99ème centile (IOTF et OMS), définissant le surpoids de grade III

Remarque : l'utilisation du terme « surpoids de grade I, II ou III » a été recommandée afin de limiter les confusions entre « surpoids », « à risque d'obésité » ou encore « obèse de grade I, II ou III » (Rolland-Cachera et al., 2012). Afin de suivre ces recommandations, cette terminologie sera désormais employée pour désigner les stades de l'obésité chez l'enfant.

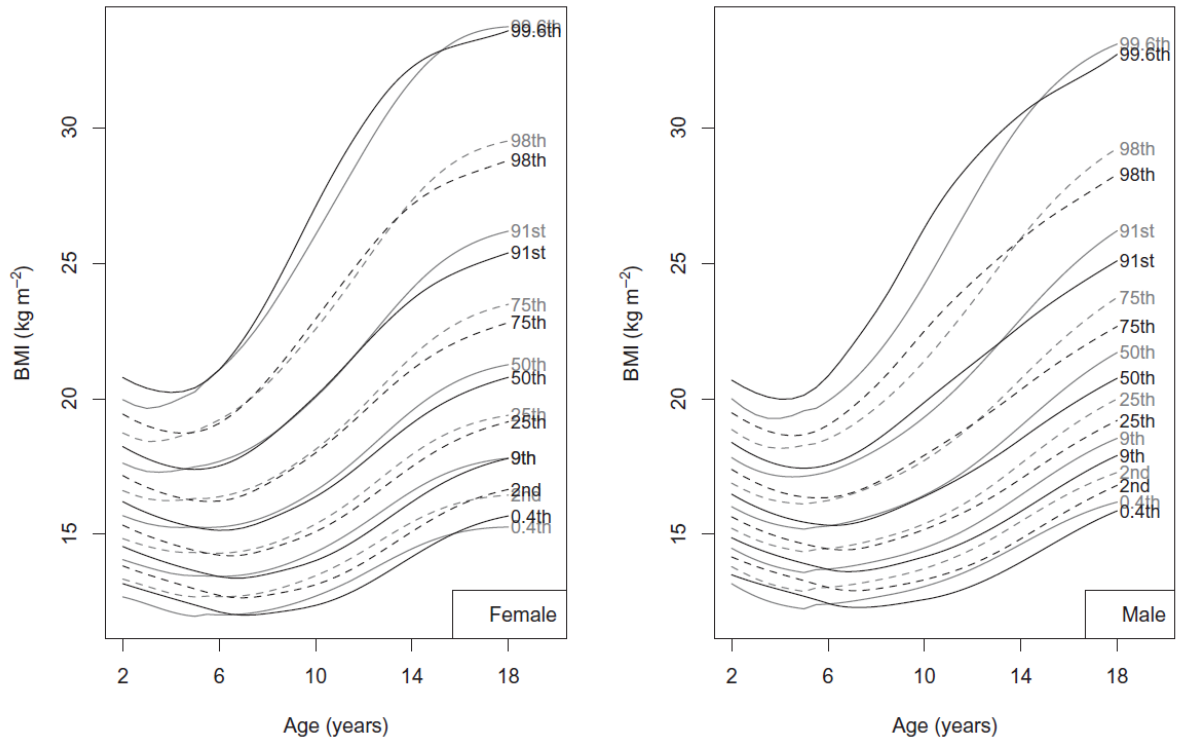


Figure 1 : Courbes de référence internationales pour l'IMC chez l'enfant de 2 à 18 ans par sexe proposées par l'IOTF (en noir) et par l'OMS (en gris). Figure extraite de l'article de Cole et Lobstein., 2012. Sur cette Figure, on observe que les normes de l'OMS ont tendance à classer les enfants dans une catégorie supérieure de poids pour un IMC équivalent en comparaison avec les normes IOTF jusqu'à 12-14 ans, tandis que cette tendance s'inverse jusqu'à l'âge de 18 ans.

Un autre indicateur dérivé des centiles est souvent utilisé en recherche scientifique pour mesurer le statut pondéral (l'IMC) chez l'enfant : le z-score. Le z-score exprime l'éloignement d'une mesure (en nombre d'écart-types) par rapport à la valeur moyenne d'un échantillon de référence. Il est compris entre -3 et 3, les valeurs extérieures à cet intervalles étant considérées comme « anormales » sur le plan statistique (pour l'IMC, ces valeurs concerneraient des obésités ou des anorexies extrêmes). Le z-score peut-être calculé à partir de la formule suivante :

$$Z = \frac{xi - \bar{x}}{s}$$

Où Z est la valeur du z-score
xi représente la mesure réalisée auprès de l'individu
$\bar{x}$ représente la valeur moyenne de l'échantillon de référence
s représente l'écart-type

Par définition, le z-score d'IMC est donc spécifique à la norme d'IMC utilisée. Il est alors fondamental de vérifier quelle est la norme à partir de laquelle un z-score d'IMC a été calculé lorsque l'on souhaite effectuer des comparaisons afin d'éviter de commettre des erreurs d'interprétation clinique ou scientifique. L'un des exemples les plus évocateurs à ce sujet est celui de la différence entre les normes d'IMC proposées par l'IOTF et celles proposées par l'OMS, illustrées sur la Figure 1. Pour un même IMC, ces deux normes semblent fournir des repères similaires (exprimés en centile ou en z-score d'IMC). Pourtant, les travaux de Kêkê et al., 2015 ont montré qu'en utilisant ces deux repères, il est possible d'aboutir à des conclusions différentes à la fois pour un individu et pour toute une population. Par exemple, la prévalence du surpoids pédiatrique (tous grades confondus) variait de 13.8 à 20% pour un groupe d'élèves français âgés de 4 à 12 ans selon que l'on classifiait l'IMC à partir des normes IOTF, OMS ou des normes françaises (Kêkê et al., 2015). Les faibles décalages observables sur les courbes de la Figure 1 peuvent ainsi avoir des conséquences majeures en épidémiologie et en clinique de l'obésité où la définition est basée sur le franchissement ou non d'un seuil d'IMC.

Pour bien interpréter les courbes d'IMC, il est nécessaire de comprendre que les données ayant permis de les établir représentent les IMC moyens d'un groupe d'enfants à priori représentatif de la population occidentale à une période donnée. Les repères choisis pour définir le surpoids chez l'enfant sont arbitraires. Par exemple, lorsque les courbes de l'OMS ont été établies, l'IMC situé au 97ème centile pour l'âge et le sexe chez l'enfant correspondait approximativement à un IMC adulte de 30 kg.m^{-2}, c'est-à-dire au seuil définissant l'obésité chez l'adulte (surpoids de grade II chez l'enfant). Pour cette raison, le 97ème centile a été choisi comme étant le seuil de définition du surpoids de grade II chez l'enfant. Ainsi, le critère de l'OMS définissant le surpoids de grade II chez l'enfant est une projection du critère utilisé chez l'adulte (de Onis et al., 2007) et ne repose pas sur de véritables preuves qu'un IMC > 97ème centile de ces courbes de l'OMS est associé à un état d'obésité au sens pathologique, c'est-à-

dire, un *excès de masse grasse ayant des conséquences délétères sur la santé* (OMS, 1997). Ces considérations scientifiques doivent toutefois être nuancées par les enjeux de santé publique et notamment la **prévention** de l'obésité pédiatrique dès le plus jeune âge par des mesures d'accompagnement socio-éducatif et d'hygiène de vie, l'objectif étant de **ne pas attendre** que l'enfant souffre de complications pour agir pour sa santé.

iii. Enjeux actuels : l'histoire de l'obésité

L'IMC présente un caractère limité lorsqu'il s'agit d'étudier le cas d'un seul individu. Dans un texte intitulé « Médecine de l'obésité : regards vers le futur » ayant fait l'objet du prix Benjamin Delessert en 2019, le Professeur Basdevant résume ces limites en indiquant que *« la référence abusive à l'IMC est toxique pour la santé. Elle enferme la pensée et l'action médicale. D'où l'IMC tient-il sa robuste popularité ? Parce qu'il est basé sur une formule et des outils (une toise et une balance) simples et crée des catégories faciles à définir. Or notre époque raffole des normes et apprécie peu la complexité. L'IMC est un outil bien fruste pour une situation multidimensionnelle et évolutive. Une médecine de précision doit aller au-delà de l'IMC. »*. Ces propos soulignent le fait que l'on ne puisse diagnostiquer un état d'obésité pour un individu sur la seule base de sa corpulence évaluée via l'IMC. C'est pourquoi de plus en plus de chercheurs et de cliniciens s'intéressent désormais à ce que l'on appelle l'*histoire* de l'obésité (Kumar et Kelly, 2017). Ce concept renvoie non seulement à la dimension physiologique de l'obésité (suivi de la corpulence sur le long terme), mais également aux autres facteurs individuels susceptibles d'expliquer le développement d'une situation favorable à une prise de poids chez un enfant ou un adulte.

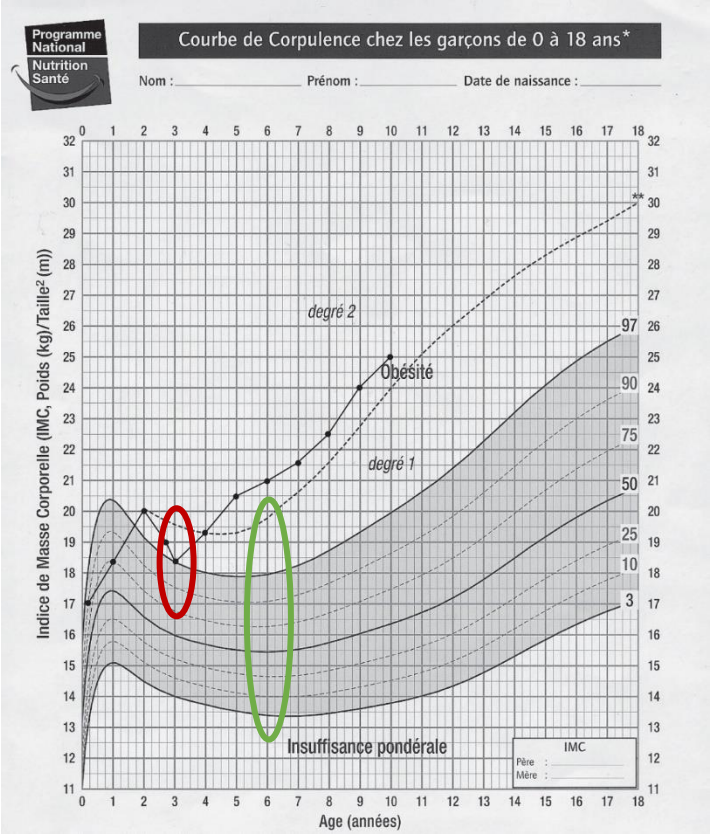


Figure 2 : Rebond d'adiposité chez le garçon. En moyenne, le rebond d'adiposité se produit vers l'âge de 6 ans (ellipse verte). L'enfant fictif suivi ci-dessus présente un rebond d'adiposité précoce, survenu à l'âge de 3 ans (ellipse rouge), prédicateur du surpoids dans les années futures.

En pédiatrie clinique, l'un des indicateurs les plus importants en matière de surveillance de l'évolution de l'IMC est l'âge auquel survient le « rebond d'adiposité ». Celui-ci correspond au début de la seconde période d'augmentation de l'IMC survenant au cours de la croissance et représenté sur la Figure 2. Le rebond d'adiposité fournit des informations sur les variations d'adiposité individuelles au cours du temps, qui permettent de mieux comprendre les spécificités du développement du surpoids et de ses complications chez un enfant (Rolland-Cachera et al., 2006). Le rebond d'adiposité se produit habituellement à l'âge de 6 ans et l'on considère qu'il est précoce s'il se produit avant l'âge de 5 ans. Selon les résultats d'études longitudinales, le rebond d'adiposité serait un prédicateur de la future adiposité de l'individu (Rolland-Cachera et al., 1984). Ces auteurs ont observé que plus le rebond d'adiposité survenait

précocement (vers l'âge de 3-4 ans), plus l'enfant était susceptible de développer une surcharge pondérale au cours de son développement.

Bien que l'IMC présente des limites, il apparaît que l'analyse de sa trajectoire au cours du temps apporte une première information « qualitative » sur l'évolution de la corpulence. Ces données doivent toutefois être mises en rapport avec l'histoire de l'enfant car l'obésité est une pathologie multifactorielle qu'il est nécessaire d'étudier sous un angle pluridisciplinaire (incluant notamment les dimensions psychologiques et sociales). En ce sens, les travaux récents portant sur l'histoire de l'obésité tels que ceux proposés par Vollrath et al. (2019) apportent de nouvelles réponses sur l'influence de l'environnement familial et du tempérament de l'enfant et sur sa trajectoire pondérale au cours des années.

L'obésité pédiatrique est une pathologie complexe et multifactorielle dont l'IMC est un reflet quantitatif. C'est pourquoi le suivi de l'enfant en surpoids ou à risque de le devenir nécessite une approche pluridisciplinaire de l'histoire de l'obésité et impose d'y répondre en y incluant des mesures d'hygiène et de santé quotidiennes telles qu'une alimentation équilibrée, la pratique régulière d'activités physiques et la réduction du temps de sédentarité (PNNS 2019-2023).

2. Rôle de l'activité physique dans la prévention et la prise en charge du surpoids pédiatrique

i. Etat des lieux sur les niveaux d'activité physique et de sédentarité chez l'enfant

En France, l'Observatoire National de l'Activité Physique et de la Sédentarité (ONAPS) recense et étudie les niveaux d'activité physique (NAP) en France depuis 2015. Avant de poursuivre, il est nécessaire de connaître les définitions de l'AP, de l'inactivité physique et de

la sédentarité adoptée par l'ONAPS, issues du rapport de 2016 de l'ANSES devenu Santé Publique France :

- **Activité Physique** : mouvement corporel produit par la contraction des muscles squelettiques en générant une dépense énergétique supérieure à la dépense énergétique de repos.
- **Inactivité Physique** : non atteinte des recommandations en AP
- **Sédentarité** : comportement en période éveillée générant une dépense énergétique inférieure ou égale à 1,5 fois la dépense énergétique de repos. Une personne est dite sédentaire lorsqu'elle consacre plus de 7h par jour à des tâches sédentaires.

Selon les dernières recommandations de l'OMS - issues des recommandations canadiennes pour le mouvement (Tremblay et al., 2016), les enfants et jeunes gens âgés de 5 à 17 ans devraient accumuler **au moins** 60 minutes par jour d'AP d'intensité modérée à soutenue, incluant des activités d'intensité soutenue au moins 3 fois par semaine. A l'heure actuelle, les derniers travaux publiés par l'OMS (Guthold et al., 2020) indiquent qu'en 2016, 81% des adolescents (77% des garçons et 84% des filles) étaient inactifs physiquement, soit plus de 4 adolescents sur 5, confirmant la tendance observée déjà en 2001. En France, les derniers résultats de l'étude ESTEBAN présentés dans le « Report Card 2020 » indiquent que seuls 28% des garçons et 18% des filles âgés de 3 à 17 ans déclarent atteindre les recommandations en matière d'AP (>60 min AP modérée à intense/jour). Plus en détail, l'étude indique que le niveau d'AP diminue de l'enfance à l'adolescence en particulier chez les filles : il est estimé que 7 adolescentes sur 10 sont inactives physiquement. Enfin, il a été observé une relation entre le statut socioéconomique des parents et les niveaux d'AP chez l'enfant. Dans le Nord de la France, Baquet et al. (2014) ont observé que les enfants issus de milieux socio-économiques

défavorisés présentaient de plus faibles niveaux d'activités physiques modérées et intenses que leurs homologues issus de milieux aisés. Ces travaux montrent l'importance d'étudier le contexte dans lequel évolue un enfant afin d'identifier et de pouvoir intervenir plus efficacement sur les facteurs ayant conduit au développement du surpoids.

Concernant les niveaux de sédentarité, nous n'avons pas connaissance de l'existence à ce jour de recommandations officielles. Plusieurs paramètres de la sédentarité peuvent être étudiés : le nombre d'épisodes sédentaires, le temps de sédentarité ou encore le nombre d'épisodes non-sédentaires entre deux périodes de sédentarité (Katzmarzyk et al., 2019). Ceci rend difficile la mise en place de recommandations au regard de l'évolution du type de sédentarité en fonction de l'âge. Il est désormais prouvé que la sédentarité - désignée auparavant sous le terme d'inactivité physique - est la cause de millions de décès dans le monde, estimés actuellement à 3,2 millions chaque année soit 6% du total des décès annuels, représentant ainsi l'un des plus hauts facteurs évitables de surmortalité toutes causes confondues (OMS, 2020).

La principale mesure du temps de sédentarité est le temps passé devant un écran (Carson et al., 2016). Selon des données objectives canadiennes recueillies entre 2007 à 2017, les enfants canadiens consacreraient 7 à 8 heures et les adolescents 9 heures par jour en moyenne à des tâches sédentaires (Prince et al., 2020). Or, les enfants passant plus de 5 heures par jour devant des écrans présenteraient un risque moyen 3 fois plus élevé de risques cardiométaboliques que les enfants y passant moins d'une heure par jour, indépendamment du niveau d'AP (Mark et Janssen, 2008). En France, l'Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail (ANSES) a récemment actualisé ses recommandations en matière de sédentarité (ANSES, 2016). Désormais, on recommande aux enfants et aux adolescents de ne pas dépasser les 2 heures passées devant un écran dans le contexte des loisirs. Actuellement, ces recommandations semblent loin d'être respectées puisqu'en moyenne, les enfants français de 6 à 17 ans passeraient 3 à 4 heures quotidiennement devant un écran, les

adolescents étant davantage concernés que les enfants (ESTEBAN 2015 ; INCA 3, 2014-2015). Ces durées ont augmenté entre 2002 et 2010 chez les adolescents en raison d'une augmentation importante du temps passé devant un ordinateur consacré à des aspects récréatifs (jeux vidéos, réseaux sociaux, séries ...) (Bucksch et al., 2016). Or, les enfants passant davantage de temps devant les écrans ont plus de chance d'être en surpoids (Tableau 2).

Tableau 2 : Prévalence de la surcharge pondérale et de l'obésité selon le temps passé devant un écran les jours avec école, en classe de CM2 et de troisième.

	Surcharge pondérale (en %)		Obésité (en %)	
Classe	**CM2**	**Troisième**	**CM2**	**Troisième**
Moins de 1 heure par jour	16,0	14,5	2,8	3,2
Entre 1 heure et 3 heures par jour	20,4	18,5	4,7	4,0
Plus de 3 heures par jour	29,5	22,5	10,2	5,9
Ensemble	**18,9**	**17,6**	**4,0**	**3,9**

Sources : DREES-DGESCO, Enquête nationale de santé auprès des élèves de CM2 (année scolaire 2007-2008) et de troisième (année scolaire 2008-2009)

La mise en évidence d'une indépendance entre les effets de la sédentarité et de l'(in)activité physique promet de nouvelles perspectives en matière de recherche en santé publique, au travers de nouveaux modèles d'individus présentés dans la Figure 3 : l'actif sédentaire, l'actif non-sédentaire, l'inactif sédentaire et l'inactif non-sédentaires.

- L'**actif sédentaire** correspond à un individu qui consacre l'essentiel de sa journée à des tâches sédentaires (principalement, travail en position assise) mais qui consacre une portion quotidienne suffisante de sa journée à des AP modérées à intense pour atteindre les recommandations hebdomadaires pour l'AP. Ce profil caractérise souvent les individus travaillant assis derrière un bureau la majeure partie de leur journée, tels que les élèves et les travailleurs du secteur tertiaire.

- L’**actif non-sédentaire** désigne l’individu qui atteint les recommandations minimales pour l’AP et qui ne consacre pas plus de 7 heures par jour à des comportements sédentaires. Ce profil correspondrait à celui d’un individu dont le métier implique de se tenir debout, de se déplacer régulièrement ou de se tenir dans des postures contraignantes (enseignants, opérateurs, techniciens, artisans...) associé à une pratique sportive régulière.
- L’**inactif sédentaire** désigne un individu n’atteignant pas les recommandations minimales pour l’AP et qui consacre la plupart de sa journée à des comportements sédentaires. Ce profil correspond à celui des élèves ou des employés de bureau ne pratiquant pas d’AP en dehors de leur journée passée assise derrière un bureau.
- L’**inactif non-sédentaire** correspond à l’individu qui consacre un temps limité à des comportements sédentaires, mais qui ne pratique pas suffisamment d’AP modérées à intenses au regard des recommandations minimales pour l’AP. Cela correspond généralement individus ayant un métier non-sédentaire (tel que décrit en second point) mais ne pratiquant pas suffisamment à des intensités modérées durant son temps libre.

Ces quatre profils devraient permettre de mieux identifier les comportements les plus néfastes pour la santé afin de proposer des recommandations optimales et adaptées au style de vie de chaque individu.

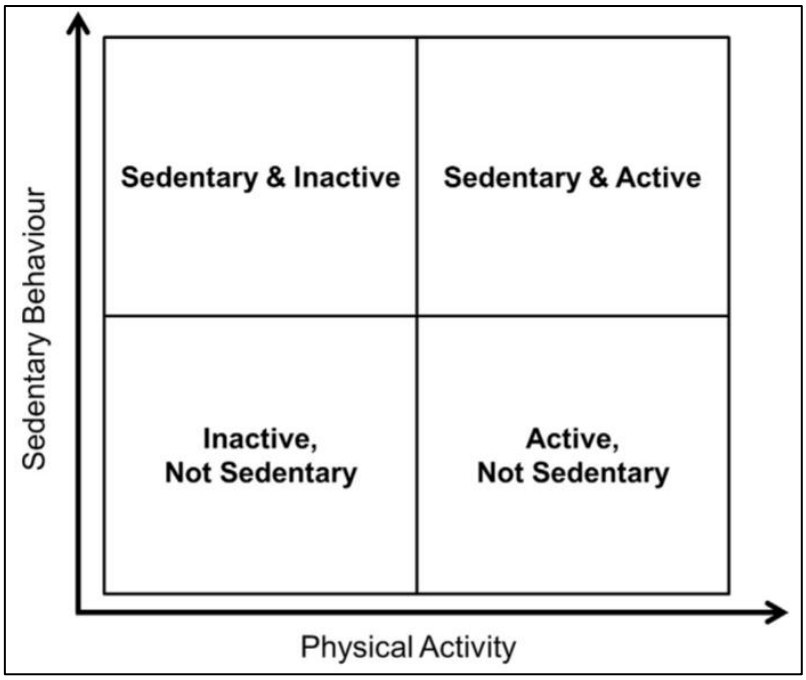


Figure 3 : distinction conceptuelle entre sédentarité et activité physique (Saunders et al., 2014)

L'augmentation des niveaux d'AP et la lutte contre la sédentarité constituent l'un des principaux axes du 4e volet du PNNS (2019-2023). Pour ce faire, il est cependant nécessaire d'éclaircir le lien direct qui associe sédentarité, inactivité physique et santé (Duclos et Thivel, 2016). En ce sens, des travaux sont actuellement en cours pour inclure la sédentarité dans les modèles théoriques permettant d'étudier la santé de l'enfance à l'âge adulte (Thivel, Chaput & Duclos, 2018). Ces travaux permettront, dans un futur proche, la mise en place d'actions visant à augmenter le niveau d'AP tout en limitant le temps consacré à des activités sédentaires.

ii. Niveaux d'activité physique, condition physique et surpoids chez les jeunes

L'American College of Sports Medecine (ACSM) définit la condition physique (ou la forme physique, en anglais « *physical fitness* ») comme un ensemble d'attributs permettant de pratiquer une AP. En matière de santé, la condition physique serait l'aptitude à effectuer des activités quotidiennes avec le plus de confort possible. Les cinq composantes de la condition

physique sont *la composition corporelle, l'endurance cardiorespiratoire, l'endurance musculaire, la force musculaire et la souplesse*. La condition physique se distingue ainsi, par définition, de l'AP qui désigne « tout mouvement corporel entraînant une dépense énergétique supérieure à la dépense énergétique de repos ». Un paramètre majeur de la condition physique en matière de santé est l'endurance cardiorespiratoire, qui désigne l'aptitude à effectuer un effort physique sur une période prolongée. Celle-ci fait référence à la notion d'aptitude aérobie, qui regroupe l'ensemble des critères discriminants de la performance de longue durée (Billat et al., 2003), du transport à l'utilisation de l'oxygène par les muscles (Poole et al., 2008).

Les principales composantes auxquelles l'on s'intéresse chez un jeune en surcharge pondérale sont la composition corporelle (en particulier, le pourcentage de masse grasse) et l'aptitude maximale aérobie qui sont deux déterminants majeurs de la santé chez l'enfant et l'adolescent (Buchan et al., 2013 ; Stoner et al., 2020). Dans cette population, les liens entre surpoids, niveaux d'AP et condition physique font l'objet de multiples études (Ruiz et al., 2006, Martinez-Gomez et al., 2010, Ortega et al., 2010, Ruiz et al., 2016, Stoner et al., 2020) visant à déterminer, par exemple, la dose et le type d'activité physique nécessaire pour améliorer la composition corporelle et l'aptitude maximale aérobie.

En Belgique, Deforche et al. (2003) ont observé que des élèves en surpoids déclaraient des niveaux d'AP comparables à ceux des élèves de poids sain. En revanche, la pratique d'activités sportives en club était significativement plus élevée chez les garçons de poids normal et les enfants en surpoids présentaient de moindres performances sur les tests d'endurance en course à pied. Cette étude ne permettait cependant pas de déterminer si la moindre participation à des activités sportives en club était la cause ou la conséquence de l'obésité (Deforche et al., 2003). Ainsi, il ne peut être affirmé que la participation à ce type d'activité est associé à un moindre risque de développer une obésité. D'autres grands projets européens (étude HELENA ; the European Youth Heart Study) ont permis de récolter de nombreuses données sur l'activité

et la condition physique des enfants et adolescents européens depuis le début des années 2000. Parmi les nombreux résultats issus de ces études, nous pouvons retenir les trois éléments suivants :

- Être physiquement actif augmenterait de 3 à 8 fois la probabilité d'atteindre les recommandations pour l'aptitude maximale aérobie chez l'adolescent (VO_{2max} supérieur à 42 et 35 $ml.min^{-1}.kg^{-1}$ pour les garçons et les filles, respectivement), indépendamment du statut pondéral (Ruiz et al., 2016).
- L'amélioration de l'aptitude maximale aérobie dépend essentiellement de la durée consacrée à la pratique d'AP vigoureuse et représente la stratégie optimale pour prévenir l'obésité – en particulier abdominale - chez les jeunes (Ruiz et al., 2006 ; Ortega et al., 2010).
- Les recommandations de l'OMS en matière d'AP (60 min AP modérée par jour incluant AP vigoureuse 3 fois par semaine) constituent un repère approprié pour limiter considérablement le risque de développer une surcharge pondérale chez le jeune (Martinez-Gomez et al., 2010).

Les présentes études apportent un éclairage sur les relations entre AP, condition physique et surpoids. Il semble que la pratique d'AP vigoureuse, à travers l'amélioration de la condition physique, soit l'une des clés permettant de prévenir ou de limiter le développement du surpoids chez les jeunes. Toutefois, le non-respect des recommandations pour l'AP n'est pas systématiquement associé au développement d'un surpoids, de même que de nombreux jeunes en surpoids atteignent pourtant les recommandations pour l'AP (Spinks et al., 2007). Ces observations soulèvent une interrogation : **en matière de santé, quelles sont les influences respectives du surpoids et de l'activité physique chez l'enfant et l'adolescent ?**

iii. Rôle des activités physiques adaptées dans la prise en charge du jeune en surpoids

Les enfants et adolescents en surpoids présentent un risque plus élevé de développer des complications cardiovasculaires, une réduction des capacités cardiorespiratoires, un risque élevé de morbidité et une surmortalité à l'âge adulte (Kumar et Kelly, 2017). Cependant, ce surpoids - tel que défini par l'OMS – n'est pas toujours associé à ces complications délétères. De nombreux individus présentant une surcharge pondérale possèdent une bonne condition physique et semblent en bonne santé. Ces individus sont couramment désignés sous l'appellation *« obèses métaboliquement sains » (*ou plus familièrement, *« fat-but-fit »).*

Au cours de la dernière décennie, de nombreuses études se sont intéressées à évaluer l'impact respectif de la condition physique et du statut pondéral sur la mortalité et les principaux marqueurs de santé cardiovasculaire tels que la pression sanguine, la cholestérolémie, la triglycéridémie, la glycémie à jeun ou encore le rapport HDL/LDL (Ruiz et al., 2009 ; Buchan et al., 2013 ; Ortega et al., 2016 ; Stoner et al., 2020). Chez l'adulte, les résultats de la méta-analyse de Barry et al. (2018) indiquent que l'aptitude maximale aérobie est le paramètre le plus déterminant en matière de santé cardiovasculaire, loin devant l'obésité. Chez l'enfant, les conclusions récentes d'une étude de cohorte menée sur 392 enfants néo-zélandais âgés de 8 à 10 ans indiquent que le niveau d'adiposité et la condition physique expliqueraient des composantes différentes du risque de maladie cardiométabolique (Stoner et al., 2020). Ces travaux supportent l'intérêt de favoriser l'augmentation de l'aptitude maximale aérobie lors des prises en charge chez ces patients (activité physique adaptée à des intensités modérées à intenses ; augmentation des niveaux d'AP quotidiens) plutôt que de viser uniquement la perte de poids. Les prises en charge doivent être ainsi pluridisciplinaires et prendre en compte l'histoire de l'obésité.

La mise en place d'un programme d'activités physiques adaptées (APA) est la voie privilégiée pour répondre à ces deux objectifs chez un jeune en surpoids (Thivel et al., 2018 ; Martin-Smith et al., 2020). L'APA permet d'améliorer efficacement les paramètres de la santé cardiométabolique (adiposité totale et abdominale ; cholestérolémie ; triglycéridémie ; glycémie ...), et représente un traitement peu coûteux et applicable sur tout un groupe d'individus. D'autre part, les interventions pluridisciplinaires basées sur l'éducation à une hygiène de vie « saine » associées à un programme d'APA sont actuellement le moyen plus efficace pour améliorer la santé des jeunes en surpoids (Quinart, 2010 ; Kumar et Kelly, 2017). Cependant, **l'efficacité d'un programme d'APA est conditionnée par la qualité des informations sur la condition physique initiale** du jeune**,** recueillies via des tests mesurant entre autres l'aptitude maximale aérobie. Outre l'obtention de repères pour comparer un même individu avant et après une prise en charge, l'identification précise de certains paramètres de la condition physique (notamment aérobie : VMA, VO_{2max}, seuils ventilatoires) permet de définir des zones cibles de travail, au sein desquelles les réponses cardiorespiratoires et métaboliques vont favoriser une meilleure oxydation des lipides (pendant et après l'effort), une meilleure adaptation cardiorespiratoire et une meilleure adhésion au protocole d'APA. Nous verrons ainsi dans le second chapitre quels sont les différents paramètres de l'aptitude maximale aérobie et comment le surpoids peut-il influencer chacun de ces paramètres.

II. Influence du surpoids sur les paramètres de l'aptitude maximale aérobie

Dans ce second chapitre, nous définirons les paramètres reliés au concept **d'aptitude maximale aérobie** et décrirons l'influence du surpoids sur ces paramètres chez les jeunes, en soulignant le décalage qui peut exister entre les modèles théoriques et la réalité clinique du surpoids.

1. Aptitude maximale aérobie

i. Définitions

L'aptitude aérobie, la consommation maximale en oxygène ou encore la puissance maximale aérobie sont des termes fréquemment employés dans la littérature scientifique. Afin de faciliter la compréhension du propos de ce chapitre, certains termes techniques et leurs abréviations sont préalablement définis ci-dessous :

- *Aptitude aérobie* : qualités physiques que possède un individu pour réaliser des exercices de longue durée.
- *Aptitude fonctionnelle aérobie* : aptitude aérobie spécifique à un exercice
- *Consommation maximale en oxygène ($\dot{V}O_{2max}$)* : quantité maximale d'oxygène que l'organisme est capable d'utiliser par unité de temps ($l.min^{-1}$ ou $ml.min^{-1}.kg^{-1}$).
- *Coût énergétique (CE)* : dépense énergétique (DE) requise pour déplacer un kilo de masse corporelle sur un mètre ($J.kg^{-1}.m^{-1}$ ou $mlO_2.kg^{-1}.m^{-1}$ selon contexte) (di Prampero et al., 1986)
- *Vitesse ou Puissance Maximale Aérobie (VMA ou PMA)* : Vitesse ou puissance minimale développée lorsque VO_{2max} est atteint.

ii. Facteurs limitant l'effort maximal aérobie

Chez l'humain, la capacité du système cardiorespiratoire (= cardiovasculaire + respiratoire) à alimenter les muscles en activité est considérée comme le principal facteur limitant l'exercice en endurance (Bassett et Howley, 2000). Cette hypothèse s'appuie notamment sur des observations expérimentales indiquant le pic de VO_2 d'un groupe musculaire en activité est largement supérieure lors d'un exercice monoarticulaire que lors d'un exercice où il est en compétition avec d'autres groupes musculaires (Richardson et al., 1999). Par conséquent, plus un groupe musculaire est en « compétition » avec d'autres groupes musculaires lors d'un exercice physique, moins ce groupe musculaire est susceptible de disposer d'une quantité élevée d'O_2 pour produire de l'ATP en raison de la redistribution du flux sanguin à l'échelle systémique – en particulier vers les organes vitaux les plus sollicités lors d'un effort aérobie (coeur, poumons).

Toutefois, cette hypothèse s'appuie sur le postulat selon lequel la fonction cardiorespiratoire est le principal déterminant de la performance aérobie. Or, certains travaux suggèrent que les individus présentant une pathologie métabolique pouvaient subir une altération de la fonction oxydative musculaire (Aucouturier et al., 2010), susceptible d'affecter l'aptitude maximale aérobie. Ces travaux sont notamment supportés par l'existence d'une forte relation entre le pic de VO_2 et le niveau d'insulino-résistance chez l'adolescent présentant un diabète de type 2 (Nadeau et al., 2009). Ces hypothèses n'ont à notre connaissance pas encore été testées expérimentalement, probablement en raison des difficultés à étudier la fonction oxydative musculaire chez le sujet jeune. Les travaux de Nadeau et al. soulignent également le lien entre les facteurs hémodynamiques et le pic de VO_2, confirmant néanmoins le rôle prédominant de la fonction cardiovasculaire sur l'aptitude maximal aérobie. Enfin, chez l'adolescent en surpoids ne présentant pas de complication métabolique, il n'a pas été observé de différence significative en ce qui concerne la capacité oxydative musculaire (Lazzer et al.,

2013), suggérant l'absence d'effet significatif de l'obésité sur ce paramètre chez l'adolescent. Au regard de la prévalence croissante des pathologies métaboliques chez l'adolescent (Lascar et al., 2018 ; Smith et Perito., 2018), l'étude combinée de l'influence des facteurs cardiorespiratoires et métaboliques sur la performance maximale aérobie constitue une perspective scientifique intéressante. Ces travaux permettraient de mieux comprendre dans quelle mesure l'altération du métabolisme oxydatif induite par les pathologies métaboliques pourraient constituer un facteur limitant la performance maximale aérobie.

2. La vitesse maximale aérobie

La VMA figure parmi les composantes de *l'aptitude aérobie*, terme parfois employé pour désigner des paramètres pourtant bien distincts tels que la VMA ou VO_{2max}. Dans un article

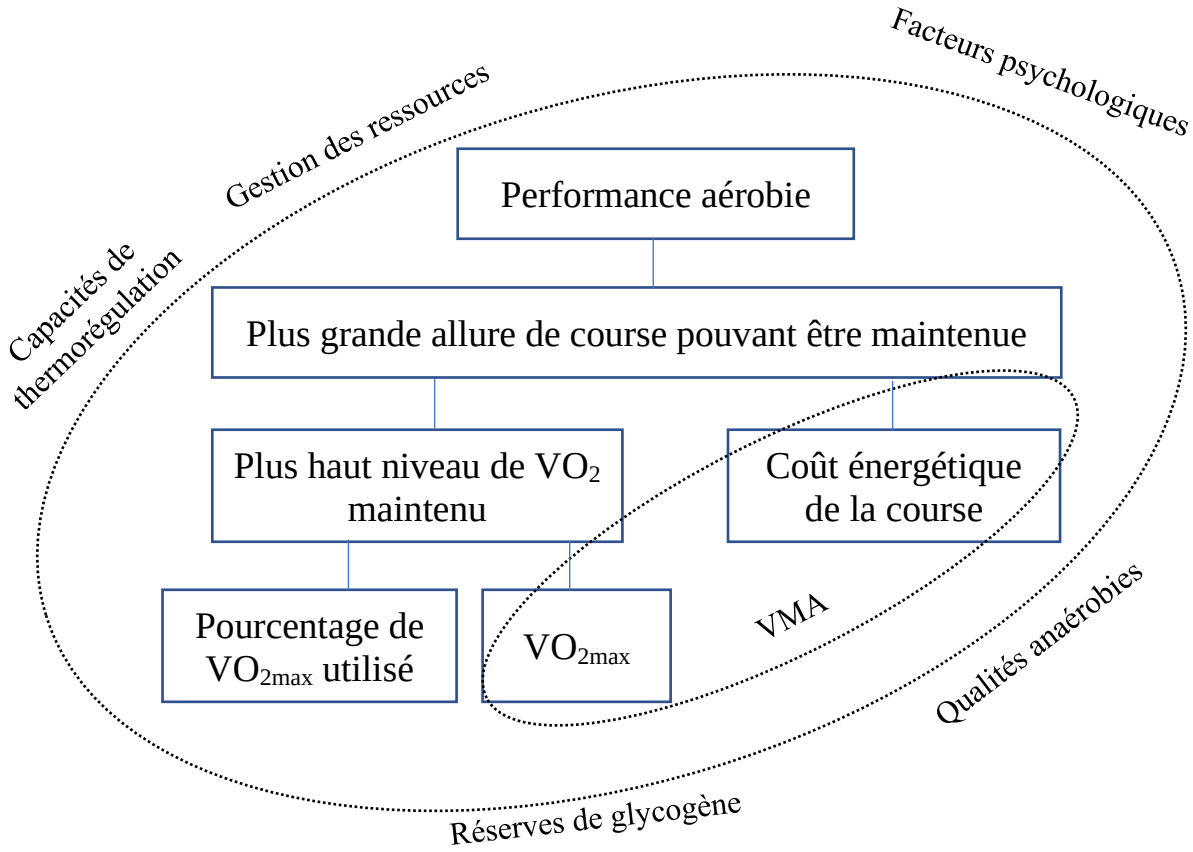


Figure 4 : Modèle de prédiction de la performance aérobie adapté de McCormack et al. (1991), extrait du livre « L'enfant et l'activité physique : de la théorie à la pratique », chapitre 3, éditions DésIris 2014

s'intéressant à la performance aérobie au cours du 1-mile walk/run test, McCormack et al. (1991) proposent un modèle de la performance aérobie lors de la marche/course, incluant entre autres la VMA, VO_{2max} et le CE (Figure 4).

Ce modèle intègre la relation entre VMA, VO_{2max} et CE proposé par di Prampero (1986) (équation 1) ainsi que d'autres déterminants majeurs de la performance aérobie (endurance anaérobie, thermorégulation ou encore les facteurs psychologiques). Selon la relation proposée par di Prampero, la VMA est égale au VO_{2max} divisé par le CE. La VMA pourrait être définie comme « l'aptitude de l'organisme à pouvoir fournir un maximum d'oxygène aux cellules en un temps donné (VO_{2max}), tout en limitant son utilisation au maximum pour pouvoir se déplacer (CE) ».

$$VMA\ (m.min^{-1}) = VO_{2max}\ (ml.kg^{-1}.min^{-1}) / CE\ (ml.kg^{-1}.m^{-1})$$

Équation 1 : relation entre VMA, VO_{2max} et CE (di Prampero (1986)).

De nombreux travaux ont montré que l'excès de poids affectait négativement la performance aérobie lors d'un test de course (Deforche et al., 2003 ; Nassis et al., 2005 ; Castro-Pinheiro et al., 2011). Pour des raisons pratiques et économiques, le dernier palier atteint lors d'un test progressif de course à pied (en particulier, le test de course en navette de 20-mètres ; Léger et al., 1988) est le paramètre le plus utilisé pour caractériser l'aptitude aérobie sur des populations d'enfants et d'adolescents (Tomkinson et al., 2019). Les enfants et les adolescents en surpoids présentent toujours des performances inférieures à celles de leurs homologues ne présentant pas d'excès de poids, quel que soit l'âge et le sexe (Deforche et al., 2003 ; Nassis et al., 2005 ; Castro-Pinheiro et al., 2011) (Tableau 3). Les données montrent que dans la catégorie des enfants les moins performants, ceux qui sont en surpoids de grade I ou plus représentent plus de 55% des effectifs (Nassis et al., 2005) alors qu'ils ne représentent que 16% des enfants appartenant à la catégorie des plus performants, soit 3 fois plus. On observe également que le

degré de surpoids (z-score d'IMC) impacte négativement la performance lors d'un test quel que soit l'âge et le sexe : les jeunes de poids normal sont plus performants que les jeunes en surpoids de grade I, eux-mêmes plus performants que les jeunes en surpoids de grade II (Castro-Pinheiro et al., 2011). Ces données indiquent également que les différences de performance entre les jeunes en surpoids et les jeunes de poids normal sont plus marquées chez les garçons que chez les filles à l'adolescence, laissant indiquer que les facteurs développementaux (en particulier, la diminution du rapport masse maigre/masse grasse) joue un rôle majeur dans la performance aérobie en course à pied.

Tableau 3 : Performances lors du test de course en navette de 20-mètres (Léger et al., 1988) chez des enfants et adolescents en fonction de leur statut pondéral. Les performances des jeunes en surpoids sont indiquées en gras.

Auteurs	**Sous-catégorie**	**Age (ans)**	**IMC ($kg.m^{-2}$)**	**Paliers complétés**
Deforche et al. (2003)	Filles	12 à 13 ans	Poids normal	4.6 ± 1.6
			Surpoids	**2.4 ± 0.9**
		14 à 15 ans	Poids normal	4.6 ± 1.7
			Surpoids	**2.6 ± 1.2**
		16 à 18 ans	Poids normal	4.5 ± 1.6
			Surpoids	**3.2 ± 1.5**
	Garçons	12 à 13 ans	Poids normal	6.6 ± 1.9
			Surpoids	**3.3 ± 1.3**
		14 à 15 ans	Poids normal	7.4 ± 2.1
			Surpoids	**4.7 ± 1.3**
		16 à 18 ans	Poids normal	8.2 ± 2.1
			Surpoids	**5.2 ± 1.5**
Nassis et al. (2005)	229 (unfit) 283 (unfit) 448 (fit) 85 (fit)	6 à 13 ans	Poids normal	2,8 ± 1,6
			Surpoids	**2,6** ± **1,7**
			Poids normal	5.9 ± 2.1
			Surpoids	**5.4** ± **1.8**
Castro-Pinheiro et al. (2011)	Filles	6 à 18 ans	Poids normal	3.6 ± 0.1
			Surpoids grade I	**2.9 ± 0.1**
			Surpoids grade II	**2.4 ± 0.2**

	Garçons		Poids normal Surpoids grade I Surpoids grade II	5.1 ± 0.1 **4.0 ± 0.1** **3.1 ± 0.2**
Fit : performance <40ème centile		Unfit : performance >60ème centile		

Selon le modèle de di Prampero (1986) (Equation 1), l'altération de la VMA induite par l'excès de poids peut-être due à une diminution de VO_{2max}, une augmentation du CE ou les deux à la fois. L'étude de l'influence de l'excès poids sur ces deux paramètres est alors nécessaire afin de mieux identifier le ou les facteurs limitant la performance aérobie et par conséquent, de définir des objectifs d'entraînement adaptés aux besoins spécifiques du jeune en surpoids. Nous développerons ces aspects dans l'étude 1 de ce travail de thèse, s'intéressant aux réponses physiologiques et perceptuelles lors des tests de type « navette ».

La VMA en tant que reflet « indirect » de la santé présente un intérêt chez le jeune en surpoids pour deux principales raisons. La première est que cette mesure intègre à la fois l'aptitude de l'organisme à produire un travail musculaire à partir du métabolisme aérobie et la composition corporelle (VO_{2max} étant rapporté à la masse corporelle dans l'équation de di Prampero). La seconde est que les jeunes présentant de bonnes performances cardiorespiratoires présentent de meilleurs niveaux d'estime de soi (Janssen et al., 2020). Par extension, l'amélioration de la VMA peut ainsi contribuer à l'amélioration de la santé non seulement dans sa dimension physique, mais également dans sa dimension psychosociale.

3. La consommation maximale en oxygène (VO_{2max})

Depuis les travaux pionniers de Hill et Lupton (1926) sur les limites du métabolisme aérobie chez le coureur, VO_{2max} est devenu (puis resté) le gold standard en physiologie de

l'exercice pour évaluer l'aptitude aérobie (Noakes, 2008). Le VO_{2max} reflète l'intégration optimale de l'utilisation, du transport et de l'apport d'oxygène par les systèmes pulmonaire et cardiovasculaires ainsi que l'utilisation de l'oxygène au niveau musculaire (Poole et al., 2008).

Depuis la fin des années 1980 et en particulier une publication de Tim Noakes en 1988 (« *Implications of exercise testing for prediction of athletic performance : a contemporary perspective* »), l'évaluation du « VO_{2max} » fait l'objet d'une controverse au sein de la communauté scientifique en raison du manque de sensibilité des critères de validation d'atteinte de VO_{2max} (Poole et al., 2008 ; Barker et al., 2014 ; Beltrami et al., 2014). Par conséquent, deux termes sont utilisés pour désigner la plus haute valeur de VO_2 mesurée lors d'un test d'aptitude aérobie : le « VO_{2max} » et le pic de VO_2 (que nous désignerons dans la suite du manuscrit sous le terme « VO_{2peak} »). Le VO_{2max} désigne la plus haute valeur de VO_2 que le système cardiorespiratoire est capable d'atteindre lors d'un exercice, vérifiée à l'aide de critères nommés « critères de validation d'atteinte de VO_{2max} » (Goran et al., 2000 ; Gutin et al., 2002 ; Breithaupt et al., 2012). Selon les publications, il est nécessaire d'atteindre 1 à 3 de ces critères afin que VO_{2max} soit validé :

- Plateau de VO_2 (critère primaire) – défini selon les recommandations actuelles par une augmentation de VO_2 inférieure (de moitié ou de deux écarts-types selon les publications) à l'augmentation attendue compte tenu de la pente VO2/travail individuelle ;
- FC >95% de la FCmax théorique (~ 195-200 bpm chez l'enfant et l'adolescent) ;
- RER > 1 à 1.1, indiquant une contribution importante du métabolisme anaérobie dans la fourniture énergétique ;
- Lactatémie >4 à 6 $mmol.L^{-1}$
- Pénibilité maximale d'effort (score maximal sur une échelle de RPE) ;

- Epuisement apparent du participant (rougeurs, incapacité manifeste à maintenir la cadence, transpiration ...).

Le VO_{2peak} désignerait quant à lui la plus haute valeur de VO_2 atteignable par un individu au cours d'un exercice mené jusqu'à épuisement et représenterait sa tolérance maximale à l'effort (Day et al., 2003). Lorsque les critères de VO_{2max} sont atteints, VO_{2peak} correspond alors à VO_{2max}. Pourtant, de nombreuses publications, en particulier dans le contexte clinique, utilisent le terme « VO_{2peak} » pour désigner à la fois des individus ayant atteint leur VO_{2max} et ceux n'ayant pas atteint leur VO_{2max}. L'absence de distinction entre ces deux termes peut ainsi conduire à des erreurs d'interprétation majeure lorsque l'on souhaite mesurer l'aptitude maximale aérobie (Poole et Jones, 2017). Pour des raisons de lisibilité, nous utiliserons le terme **« VO_{2peak} »** dans la suite de ce manuscrit pour désigner la plus haute valeur de VO_2 mesurée dans les études qu'il ait été précisé ou non si les participants ont atteint VO_{2max}.

Il existe plusieurs modes d'expression de VO_{2peak}. Ceux utilisés en pratique clinique sont présentés dans le Tableau 4. Le VO_{2peak} peut-être exprimé en valeur absolue ($l.min^{-1}$), ou être divisé par la masse corporelle – en anglais, « body mass » ($ml.kgBM^{-1}.min^{-1}$) ou la masse maigre – « fat-free mass » ($ml.kgFFM^{-1}.min^{-1}$). Exprimé en valeur absolue, VO_{2peak} ($VO_{2peakABS}$) fournit une information globale sur l'aptitude physiologique d'un organisme à utiliser de l'oxygène. Etant donné que la masse maigre est le principal déterminant de la consommation en oxygène (Vanderburgh et Katch, 1996 ; Goran et al, 2000 ; Wittekind et al., 2020), VO_{2peak} exprimé en valeur absolue peut être considéré comme un indicateur global de l'aptitude aérobie chez l'individu ayant un faible taux de masse grasse. En revanche, ce paramètre est insensible aux variations de masse grasse, ce qui lui procure un intérêt très limité en matière de suivi chez un individu en surpoids.

Tableau 4 : Modes d'expression de VO_{2peak} accompagnés de leur principaux avantages et limites.

Mode d'expression	Unité	Intérêt / Limite
VO_{2peak} absolu ($VO_{2peakABS}$)	$l.min^{-1}$ $ml.min^{-1}$	Information globale sur la quantité et la qualité de la masse musculaire / Limité chez l'individu en surpoids
VO_{2peak} divisé par la masse corporelle ($VO_{2peakBM}$)	$ml.min^{-1}.kg^{-1}$	Indicateur partiel de l'aptitude aérobie fonctionnelle / Insensible aux variations de composition corporelle
VO_{2peak} divisé par la masse maigre ($VO_{2peakFFM}$)	$ml.kgFFM^{-1}.min^{-1}$	Information qualitative sur l'aptitude musculaire / Information limitée sur l'aptitude aérobie fonctionnelle

Le VO_{2peak} divisé par la masse corporelle ($VO_{2peakBM}$), quant à lui, exprime le rapport « poids / puissance » d'un individu, fournissant une information (partielle) sur l'aptitude aérobie en particulier lors d'un exercice où le poids du corps est supporté. Le $VO_{2peakBM}$ est l'un des paramètres les plus utilisés pour mesurer l'aptitude aérobie chez le jeune en surpoids (Garcia-Hermoso et al., 2016 ; Thivel et al., 2018 ; Martin-Smith et al., 2020). Pourtant, $VO_{2peakBM}$ est limité lorsque l'on souhaite s'intéresser à l'aptitude aérobie indépendamment du poids. En effet, un individu pourrait augmenter $VO_{2peakBM}$ sans entraînement : il lui « suffirait » pour cela de préserver sa masse maigre tout en diminuant sa masse grasse. La masse corporelle serait ainsi diminuée, ce qui mathématiquement, entraînerait l'augmentation de $VO_{2peakBM}$, rendant son intérêt limité lorsque l'on souhaiter mesurer les effets de l'entraînement sur l'aptitude aérobie. Diviser VO_{2peak} par la masse corporelle pose également un problème lorsque l'on souhaite mesurer VO_{2peak} de jeunes en surpoids ayant un taux de masse grasse différente (ex : filles vs. garçons ; surpoids grade I vs grade II ...). Cette hétérogénéité est illustrée, par exemple, dans les données de Klijn et al. (2007) indiquant des taux de masse grasse s'élevant de 27 à 54% au sein d'un groupe d'adolescents en surpoids de grade III (communément appelé « obésité sévère »). Ainsi, bien qu'il présente un intérêt dans une optique de suivi de l'entraînement et/ou de la performance, $VO_{2peakBM}$ ne semble pas représenter l'outil le plus

adapté lorsque l'on s'intéresse à l'aptitude aérobie dans des populations dont le but n'est pas la performance de haut niveau.

Enfin, VO_{2peak} divisé par la masse maigre ($VO_{2peakFFM}$) reflèterait l'aptitude relative maximale du système cardiorespiratoire et musculaire à transporter et utiliser de l'oxygène. Il peut être considéré comme l'aptitude maximale de la masse musculaire et du système cardiorespiratoire à effectuer un exercice aérobie, VO_2 étant principalement influencé par la masse musculaire. Il présente l'avantage de permettre des comparaisons entre des populations de dimensions corporelles différentes, comblant les défauts de $VO_{2peakBM}$. Ce marqueur a été récemment désigné comme étant le meilleur prédicteur des risques de mortalité toute cause confondue chez l'adulte, loin devant $VO_{2peakBM}$ (Imboden et al., 2020). A notre connaissance, chez l'enfant, le lien entre $VO_{2peakFFM}$ et risque de mortalité reste peu clair car $VO_{2peakBM}$ (*« cardiorespiratory fitness »* dans les publications) reste à ce jour l'indicateur le plus utilisé pour étudier le lien entre condition physique et santé chez les jeunes (Ortega et al., 2007 ; Ruiz et al., 2009 ; Stoner et al., 2020). De futurs travaux sont ainsi nécessaire afin de déterminer si comme chez l'adulte, $VO_{2peakFFM}$ est un meilleur marqueur de santé que $VO_{2peakBM}$ chez l'enfant et l'adolescent. Enfin, contrairement à $VO_{2peakBM}$, $VO_{2peakFFM}$ ne donne que peu d'information sur la capacité individuelle à être performant lors d'un exercice nécessitant de supporter le poids étant donné que cette mesure ne tient pas compte de l'excès masse grasse. Elle ne peut donc pas être utilisée comme indicateur de performance sur le terrain. Ainsi, $VO_{2peakFFM}$ pourrait être envisagé comme une mesure de l'intégrité de la fonction cardiorespiratoire et musculaire utile à l'évaluation de la santé, complémentaire à l'évaluation de l'aptitude aérobie fonctionnelle via $VO_{2peakBM}$.

Il est difficile d'indiquer des normes pour l'âge et le sexe en ce qui concerne VO_{2peak} chez l'enfant, tant ce paramètre varie en fonction du type de test, des facteurs individuels et des critères utilisés pour vérifier que VO_{2peak} ait bien été atteint au cours du test (Thivel et

Aucouturier, 2016). Ce travail a été mené très récemment par Johansson et al. (2020) à l'aide de tests sous-maximaux réalisés sur bicyclette ergométrique. Les enfants et adolescents en surpoids présentent ainsi des $VO_{2peakBM}$ médians (50ème centile) s'élevant à :

- 30.8 ml.min^{-1}.kg^{-1} à 8 ans et 26.0 ml.min^{-1}.kg^{-1} à 14-15 ans pour les garçons
- 30.6 ml.min^{-1}.kg^{-1} à 8 ans et 25.6 ml.min^{-1}.kg^{-1} à 14-15 ans pour les filles

Ces données restent cependant spécifiques à un exercice où le poids du corps n'est pas supporté (bicyclette ergométrique). En raison des objectifs de ce travail de thèse, **nous nous intéresserons seulement aux données obtenues à l'issue d'un test de marche ou course à pied** d'intensité croissante et mené jusqu'à épuisement.

D'après la littérature, les jeunes en surpoids présentent des $VO_{2peakABS}$ comparables ou jusqu'à 25-30% supérieurs à celui des jeunes normo-pondérés en raison de leur masse maigre supérieure ou égale (Goran et al., 2000 ; Lazzer et al., 2005). En revanche, $VO_{2peakBM}$ est significativement inférieur chez les jeunes en surpoids. Chez des enfants pré pubères, Goran et al., (2000) ont observé que les enfants en surpoids présentaient des $VO_{2peakBM}$ ~28% inférieurs à celui des enfants de poids normal tandis que Marinov et al. (2002) reportent des différences de l'ordre de 13% chez des enfants de 6 à 17 ans. Chez des adolescents de 12 à 16 ans, les données de Lazzer et al. (2005) nous permettent de calculer que $VO_{2peakBM}$ diminue de près de 50% chez les garçons et 40% chez les filles en surpoids de grade II. Ces mêmes travaux suggèrent que $VO_{2peakFFM}$ ne semble pas significativement influencé par la catégorie de poids chez l'enfant. Il est important de préciser que les données présentées ne concernent pas les cas extrêmes de surcharge pondérale, peu aptes à la réalisation d'un test jusqu'à l'épuisement.

En matière de santé, certains auteurs ont proposé des seuils en-deçà desquels les risques de comorbidité augmentaient de manière conséquente. Castro-Pinheiro et al. (2017) ont suivi une cohorte d'enfants de 6 à 10 ans pendant 2 ans, et ont observé que ces enfants présentant un

VO_{2peak} inférieur à 39 pour les garçons et 37.5 $ml.min^{-1}.kg^{-1}$ pour les filles développaient en moyenne 7 fois plus de facteurs de risques cardiovasculaires (pression sanguine, HOMA-IR, cholestérolémie, HDL/LDL ...) que leurs homologues situés au-dessus de ce seuil défini. Comme le précisent ces auteurs, les seuils utilisés présentent de nombreuses limitations telles que l'absence de consensus concernant la définition de la santé cardiovasculaire chez l'enfant.

Il semblerait donc que VO_{2peak} des jeunes en surpoids soit comparable à celui des jeunes de poids normal lorsque la mesure tient compte de la masse et de la composition corporelle. Ces données supportent l'hypothèse d'un métabolisme oxydatif sain chez le jeune en surpoids (Thivel et Aucouturier, 2016). En revanche, $VO_{2peakBM}$ diminuerait de l'ordre de 10 à 50% chez le jeune en surpoids à cause de l'excès de masse grasse, justifiant en partie l'altération de la VMA induite par l'excès de poids chez l'enfant. Nous verrons dans notre étude 1 que l'excès de poids peut également affecter le coût énergétique (CE) des jeunes en surpoids.

4. Coût énergétique

Le CE exprime la quantité d'énergie nécessaire pour déplacer un kilo de masse corporelle sur une distance d'un mètre (di Prampero, 1986). Cette mesure prend en compte la DE totale, sans distinguer la DE associée au métabolisme de base (= énergie requise pour le fonctionnement de l'organisme en dehors de tout exercice) et la DE associée à l'exercice. Ainsi, les auteurs ayant mesuré le CE ont distingué ce que l'on appelle le « CE total » ou « CE brut » (*« gross metabolic cost »*) et le CE « net » (*« net metabolic cost »*) (Tableau 5) :

- **CE total** : désigne le CE dans son intégralité, incluant la DE de repos et celle associée aux contractions musculaires permettant de supporter le poids et de stabiliser le centre de gravité (CDG) au cours de la station debout et du déplacement.

- **CE net** : DE associée au déplacement du CDG, la stabilisation du CDG et le support du poids lors du déplacement. Exclut parfois la dépense associée et au support du poids et à la stabilisation du CDG lors de la station debout.

CE total ou CE brut			
CE station debout		CE net	
Dépense énergétique de repos	Stabilisation CDG + support du poids (station debout)	Stabilisation CDG + support du poids (déplacement)	Déplacement du CDG
CE_1		**CE_2**	**CE_3**

Tableau 5 : Modélisation du CE proposée par Malatesta et al. (2003). Dans le modèle de Workman et Armstrong (1986), la dépense liée à la stabilisation du CDG et la stabilisation du CDG /support du poids lié aux déplacements est considéré comme nulle. Malatesta et al. (2003) observent que ceci ne s'applique pas aux seniors : chez ces derniers, la stabilisation du CDG /support du poids lié aux déplacements constitue une dépense énergétique additionnelle , d'où sa présence dans le modèle ci-présent. Le CE1, CE2 et CE3 correspondent aux trois compartiments du modèle de Malatesta et al. (2003).

La DE de repos (appelée également « métabolisme de repos ») représenterait 50 à 70% de la dépense énergétique totale. Selon une revue systématique de la littérature (Chima et al., 2020), aucune des équations actuellement proposées ne permet une estimation précise de la DE de repos chez l'enfant (< 18 ans) : les meilleures taux de précisions s'élèveraient à 62% chez les 11-18 ans et 57% chez les 7-18 ans. Chez le jeune, le pourcentage de masse maigre, le sexe et les facteurs génétiques (~ 7%) seraient les principaux déterminants de la DE de repos, après ajustement à la quantité absolue de masse maigre (Vermorel et al., 2005). De manière intéressante, la DE de repos ne serait pas significativement différente entre les jeunes entraînés et non-entraînés lorsque l'on tient compte de la masse maigre. Par ailleurs, la croissance ne représenterait que 2 à 4% de la DE totale quotidienne, soit 1 à 3% de la DE de repos. Chez le

jeune, les conclusions de Vermorel et al. (2005) suggèrent ainsi que la meilleure stratégie pour augmenter la DE de repos semble être l'augmentation de la masse maigre.

Le modèle présenté dans le tableau 5 est dérivé d'**un modèle à trois compartiments** initialement proposé par Workman et Armstrong (1986). Dans ce modèle, le compartiment 1 (CE_1) est le métabolisme de repos ; le compartiment 2 (CE_2) est le CE relatif au maintien de l'équilibre et au support du poids pendant le déplacement ; le compartiment 3 (CE_3) est la dépense liée au déplacement du CDG vers l'avant. Ce modèle postule que la dépense nécessaire pour stabiliser le CDG et supporter le poids varie de façon négligeable entre la station debout et le déplacement, et n'est donc pas considérée dans le calcul. Pour calculer le CE liée à ces trois compartiments, on mesure VO_2 en position assise (CE_1), que l'on soustrait au VO_2 en position debout (la différence est égale au CE_2), elle-même soustraite au VO_2 au cours de l'exercice (CE total – CE_2 = CE_3).

Ce modèle initial a été modifié par Malatesta et al. (2003) qui ont observé que chez des seniors (65-80 ans), le CE_2 augmentait au cours du déplacement. Afin de calculer le coût additionnel représenté par la stabilisation du CDG et le support du poids lié au déplacement, les auteurs ont tracé la droite décrivant la relation entre vitesse de marche et le CE et reporté la valeur de CE mesurée à 0 $km.h^{-1}$. Ils ont observé que la différence entre VO_2 à 0 $km.h^{-1}$ et VO_2 mesurée lors de la station debout était non-nulle, démontrant que le modèle de Workman et Armstrong (1986) ne s'appliquait pas à toutes les populations.

Chez le jeune en surpoids, Peyrot et al. (2009) ont mené une première étude basée sur **un modèle à deux compartiments** dont l'objectif était de mesurer l'effet du surpoids sur le CE net lors d'un exercice de marche/course à pied chez l'adolescent. Leur modèle simplifié consistait à soustraire le CE associé à la station debout au CE total mesuré au cours de l'exercice [$CE\ (net)\ =\ CE\ (exercice) - CE\ (station\ debout)$]. Les résultats de cette étude ont indiqué que le CE total des jeunes en surpoids n'était pas significativement différent de

celui de jeunes de poids normal. En revanche, ces auteurs observent que le CE net était 15% supérieur chez le jeune en surpoids à la vitesse de marche spontanée (~ 4 $km.h^{-1}$). Cette différence s'accentuait avec la vitesse, s'élevant en moyenne à 25% pour des vitesses comprises entre 0,75 et 1,5 $m.s^{-1}$ (2,7 et 5,4 $km.h^{-1}$). Des analyses accélérométriques additionnelles ont mis en évidence un déplacement médio-latéral du CDG deux fois plus élevé chez le jeune en surpoids, justifiant l'augmentation du CE net entre les deux groupes. Cette augmentation était potentialisée par la vitesse, justifiant par ailleurs l'écart croissant entre les deux groupes (normo-pondéré vs. surpoids), de 15 à 25%. Le CE associé à la station debout était quant à lui significativement inférieur chez le sujet en surpoids, s'expliquant par un taux de masse maigre proportionnellement moins élevé par rapport au sujet normo-pondéré (Tableau 6). Cette dernière observation rappelle l'influence du mode d'expression de VO_2 sur le résultat d'une étude confrontant des individus de compositions corporelles différentes.

En reprenant le modèle proposé par Malatesta et al. (2003), Peyrot et al. (2012) ont étudié les effets d'un entraînement de trois mois sur le CE d'adolescents en surpoids. Les résultats observés à partir de ce modèle ont indiqué qu'après trois mois d'entraînement, le CE brut ne variait pas significativement. Le CE_1 augmente significativement en raison d'une diminution de la masse grasse de 15%, impliquant l'augmentation du rapport masse maigre/masse grasse. Le CE_2 quant à lui diminue significativement (-9%) en lien avec une meilleure stabilité et un poids mieux supporté lors des déplacements (diminution du CE_2), et non une diminution des contractions musculaires requises pour le mouvement du CDG (CE_3 non significativement différent). Les auteurs en concluent alors que le CE_3 ne serait pas impacté par l'obésité, et que seule une augmentation du CE_2 expliquerait l'augmentation du CE chez les personnes en surpoids. L'augmentation du CE_1 observée suite à l'entraînement correspond d'autre part aux résultats observés lors de la précédente étude (Peyrot et al. (2009)), où une masse corporelle moins élevée était associée avec une augmentation du CE_1.

L'influence des variations de poids sur le CE a été également étudiée par Rosenbaum et al. (2003). Ces auteurs ont comparé *l'efficience mécanique nette* (comparable au CE net, mais sur ergocycle) entre deux groupes après une intervention visant pour l'un à prendre 10% de poids, et pour l'autre à perdre 10% de poids. Les résultats montrent une diminution de l'efficience mécanique pour le groupe « prise de poids » et une augmentation pour le groupe « perte de poids », mais ces variations ne seraient significatives qu'à de faibles intensités d'exercice : celles-ci disparaîssaient progressivement avec l'augmentation de l'intensité de celui-ci. Cette étude soutient l'hypothèse que **même lors d'une activité où le poids n'est pas supporté, l'efficience musculaire diminuerait avec la prise de poids lors d'exercices de faible intensité, pouvant expliquer en partie les difficultés à réaliser de simples activités de la vie quotidienne chez l'individu en surpoids**.

Poids normal

CE total	
CE station debout	CE net

Surpoids

CE total	
CE station debout	CE net

Tableau 6 : Représentation schématique du CE au cours d'un exercice de marche en fonction du statut pondéral chez le jeune en surpoids, adapté des résultats de Peyrot et al. (2009). Le CE total est comparable entre les individus de catégorie de poids différentes. Le CE net augmente (de 15 à 25%) et le CE lié à la station debout diminue chez le jeune en surpoids en comparaison avec les jeunes de poids normal.

Hunter et al. (2008) ont mesuré les effets de deux interventions visant à perdre du poids sur le CE de 66 femmes pré-ménopausées et en surpoids ; seule l'une des deux interventions comprenait un programme d'activités physiques. Ils ont constaté alors que pour une même perte de poids, **la diminution du CE n'était significative que pour le groupe ayant participé à un entraînement**. Récemment, Delextrat et al. (2015) ont rapporté que le CE associé à une activité

de marche diminuait de 10 à 20% malgré une diminution de la masse grasse de 1,4 à 2,1%, suggérant que l'entraînement expliquerait davantage les variations de CE que la composition corporelle. Les hypothèses émises par ces auteurs pour expliquer les résultats sont une augmentation de la force musculaire induisant une moindre activation musculaire locale pour un effort donné, ainsi qu'une diminution des co-contractions permettant de renforcer la stabilité lors du mouvement. Ces travaux supportent l'intérêt d'un programme d'entraînement pour la réalisation des activités quotidiennes chez des jeunes en surpoids malgré une perte de poids peu significative.

Les travaux cités montrent que l'excès de poids entraîne **une augmentation du CE** associé à la stabilisation et au support du poids. Cette augmentation est liée à la perte de stabilité dynamique entraînant une augmentation des contractions musculaires isométriques (Peyrot et al., 2012). Par ailleurs, l'excès de poids entraînerait **une diminution de l'efficience musculaire**, d'autant plus significative que l'intensité de l'exercice est faible (Rosenbaum et al., 2003), justifiant entre autres l'augmentation du CE. L'analyse du CE a ainsi révélé l'existence d'une plus grande instabilité du centre de gravité au cours de la marche, en partie compensée par une augmentation de l'activité musculaire visant à stabiliser le mouvement et réduire le risque de blessures.

La connaissance de chacun des paramètres de l'aptitude aérobie (VMA, VO_{2max}, CE) est déterminante lorsque l'on souhaite identifier les facteurs limitant la poursuite d'un effort prolongé. Nous avons vu que $VO_{2max/peak}$ n'était pas significativement altéré chez le jeune en surpoids mais que l'augmentation de l'instabilité au cours de la marche induite par l'excès de poids pouvait entraîner une suractivation musculaire. Les travaux présentés dans la seconde partie de ce chapitre soutiennent l'hypothèse que les contraintes musculaires induites par l'excès de poids sont l'une des principales causes d'abandons prématurés lors d'un test de marche/course à pied chez le jeune en surpoids.

III. Influence du surpoids sur la tolérance physiologique et psychologique à l'effort

Avant de choisir le protocole le plus adapté pour mesurer VO_{2max}, il est nécessaire d'avoir une vision élargie des conséquences du surpoids à l'exercice. Dans cette partie, nous allons aborder les limitations physiologiques, biomécaniques et psychologiques présentes lors d'un exercice maximal nécessitant de supporter l'excès de poids chez le jeune.

1. Sur la fonction respiratoire

Chez l'adulte, les conséquences du surpoids sur la fonction respiratoire sont difficiles à établir en raison de l'implication des effets de l'âge, du déconditionnement et d'autres facteurs confondants tels que le tabagisme, l'hypertension et l'asthme sur les réponses respiratoires (Bokov et Delcaux, 2019). Chez l'enfant, l'asthme serait le principal facteur confondant (Bokov et Delcaux, 2019). Les effets décrits dans cette partie concerneront uniquement les jeunes en surpoids ne présentant (à priori) aucune complication associée.

Cliniquement, l'étude des effets du surpoids sur la fonction respiratoire renvoie à la notion de « **dyspnée** ». Celle-ci est définie comme étant une gêne respiratoire anormale vécue par un individu, se distinguant de l'essoufflement physiologique (Bokov et Delcaux, 2019). Ce terme ne désigne pas une pathologie, mais un phénomène complexe ayant de nombreux déterminants physiologiques et/ou psychologiques, pouvant se produire à l'effort et au repos. Bien que les mécanismes expliquant l'apparition de la dyspnée d'effort restent peu clairs chez l'enfant, il est établi que sa prévalence était supérieure chez le jeune en surpoids (Lang et al, 2015). L'une des pathologies les plus fréquentes pouvant entraîner une dyspnée d'effort est **l'asthme d'effort,** défini comme une crise d'asthme (bronchoconstriction) provoqué par l'exercice (Dinh-Xuan et Lockhart, 1988). De récents travaux (Lang et al., 2018) ont apporté

un éclairage sur le lien entre surpoids et asthme d'effort chez l'enfant. Selon ces travaux, environ 25% des cas d'asthmes chez l'enfant seraient causés par la présence du surpoids. S'appuyant sur ces données et d'autres études, Rastogi (2018) suggèrent que l'adiposité abdominale pourrait expliquer en grande partie la survenue de l'asthme d'origine non-allergique chez le jeune en surpoids. Selon cet auteur, l'asthme serait l'une des conséquences de l'inflammation systématique présente chez les jeunes en surpoids possédant des niveaux élevés d'adiposité abdominale. Ces découvertes soulignent le caractère délétère du tissu adipeux abdominal dès l'enfance.

Une autre conséquence respiratoire du surpoids est le **syndrome d'apnées obstructives du sommeil (SAOS)**. Le SAOS est une pathologie qui se caractérise par l'arrêt de la respiration pendant de courtes périodes au cours du sommeil. Sa prévalence serait 4 à 5 fois plus élevée chez l'enfant en surpoids en comparaison avec les enfants normo-pondérés (Redline et al., 1999). Evans et al. (2014) ont étudié les réponses cardiorespiratoires d'enfants selon qu'ils présentent ou non un SAOS et un surpoids. Leurs résultats indiquent que les enfants atteints de SAOS présentent un VO_{2peak} inférieur aux enfants non-atteints de SAOS, qu'ils soient normo-pondérés ou en surpoids. Selon les auteurs de l'étude, la diminution de VO_{2peak} chez l'enfant atteint de SAOS serait liée à une altération de la fonction cardiovasculaire et/ou mitochondriale induite par la répétition des hypoxies nocturnes. Ce travail montre qu'indépendamment du surpoids, le SAOS est associé à une diminution de l'aptitude aérobie, s'ajoutant aux difficultés déjà présentes dues à l'excès de poids.

En clinique, l'examen permettant de caractériser l'altération de la fonction pulmonaire est l'Evaluation Fonctionnelle Respiratoire (EFR). Celle-ci consiste à effectuer une évaluation spirométrique suivie d'un test d'aptitude aérobie. Les EFR révèlent que les jeunes en surpoids présentent une diminution de la Ventilation Volontaire Maximale (VVM) et une diminution du Volume de Réserve Expiratoire (VRE), au repos comme à l'exercice (Mendelson et al., 2012 ;

Gibson et al., 2014 ; Faria et al., 2014). Selon ces auteurs, ces données montrent que les jeunes en surpoids ventilent à de plus faibles volumes pulmonaires. Cette stratégie compensatoire leur permettrait de limiter le surcoût respiratoire dû à la contrainte mécanique exercée par le tissu adipeux thoracique. En effet, la présence de tissu adipeux intra-thoracique diminue l'espace utilisé par le diaphragme pour créer une dépression et diminue la compliance pulmonaire.

Malgré cette stratégie ventilatoire, Mendelson et al. (2016) observent que de plus faibles volumes pulmonaires à l'exercice sont associés à un VO_{2peak} inférieur mesuré sur ergocycle chez le jeune en surpoids. Par ailleurs, les données de Faria et al. (2014) suggèrent que le sexe influence la relation entre surpoids et fonction respiratoire chez les adolescents. Selon ces auteurs, chez les garçons, le surpoids est associé à une diminution du Volume Expiratoire Forcé en 1 seconde (VEF_1) alors que cela n'est pas le cas chez les filles. D'autres paramètres comme la Capacité Vitale Forcée (CVF) et la VVM semblent également davantage affectés chez le garçon. Enfin, Inselma et al. (1993) rapportent une diminution de la capacité de diffusion pulmonaire (DLCO) possiblement induite par la présence de tissus adipeux au niveau thoracique. Chez l'adulte, les altérations ventilatoires décrites ci-dessus seraient liées à la localisation abdominale de l'excès de tissu adipeux (Zavorsky et al., 2007). Par conséquent, il peut être supposé que les mêmes mécanismes se produisent chez l'enfant et l'adolescent, renforçant l'hypothèse d'un lien entre l'asthme d'effort et la répartition androïde du tissu adipeux chez ces derniers (Rastogi et al, 2018).

Au cours de l'effort, plusieurs indicateurs permettent d'apprécier la fonction respiratoire. Parmi ces indicateurs, on s'intéressera principalement à la ventilation-minute (VE, en $l.min^{-1}$), aux seuils ventilatoires (SV_1 et SV_2) et aux équivalents respiratoires (VE/VO_2 et VE/VCO_2). VE reflète le volume d'air inspiré (ou expiré) dans les poumons à chaque minute ; les seuils ventilatoires (SV_1 et SV_2) sont des indicateurs d'effort au-delà desquels la ventilation augmente disproportionnellement par rapport aux besoins, entraînant une cassure dans la courbe

VE/intensité (Figure 7). Les équivalents respiratoires (VE/VO_2 et VE/VCO_2) reflètent la capacité d'un individu à réaliser des échanges gazeux avec un niveau de ventilation donné (cela correspondrait à l'efficience ventilatoire).

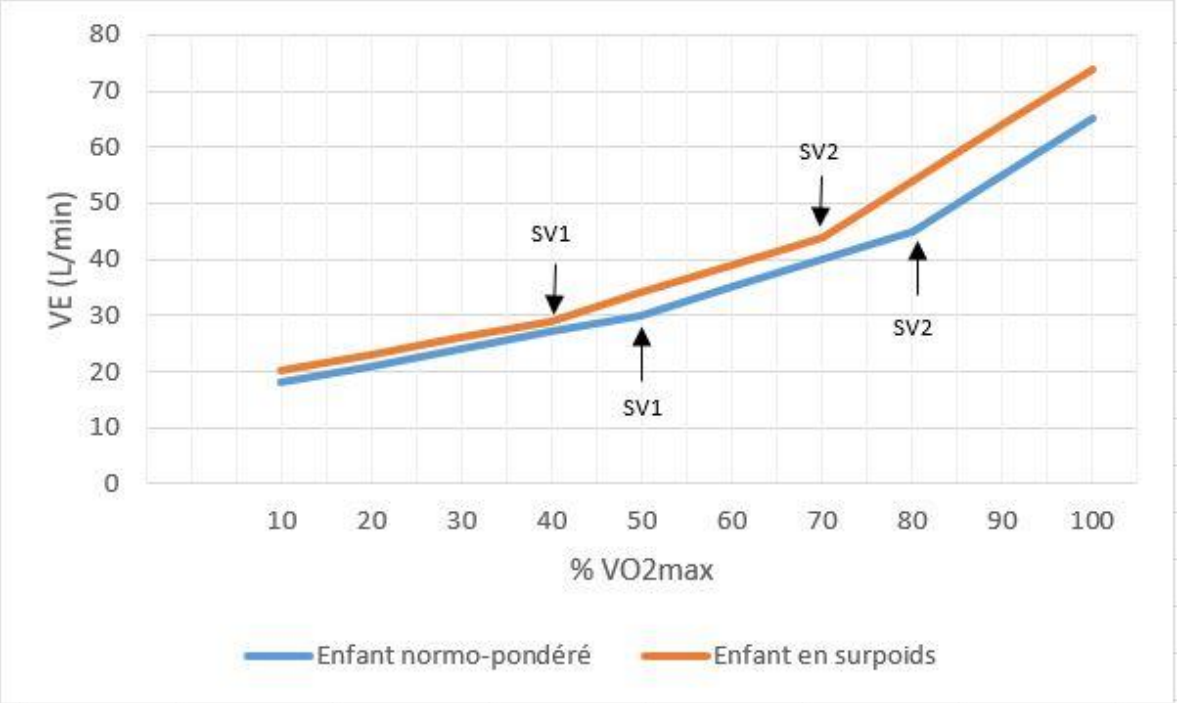


Figure 5 : Représentation théorique des seuils ventilatoires. SV_1 se produit lorsque la pente de la relation VE/VO_2 augmente, signifiant une augmentation disproportionnée de la ventilation par rapport à la demande en oxygène. SV_2 correspond à une augmentation de la ventilation en vue de contrer l'acidose sanguine dû à la présence excessive d'ions H+ (Wasserman, 1986) . Certains auteurs paramètrent les exercices à haute intensité à partir du SV_2 (Rey et al., 2017). Chez l'enfant en surpoids, dû au déconditionnement, les seuils ventilatoires apparaîssent à des intensités relatives inférieures par rapport aux enfants de poids normal.

Chez le jeune en surpoids, VE tend à suivre le même pattern que chez l'enfant de poids normal (Zanconato et al., 1989) : lors d'un test incrémental réalisé sur tapis roulant, VE augmente jusqu'à l'arrêt de l'effort. Chez l'adulte en surpoids de grade III, VE atteint un plateau lors de ce même type de test, contrairement aux adultes en surpoids de grade II ou de poids normal (Chif et al., 2015). Les auteurs concluent qu'à partir d'un certain grade de surpoids, celui-ci pourrait entraîner l'apparition de limitations ventilatoire lors d'un exercice incrémental maximal chez l'adulte. Chez le jeune en surpoids, les cinétiques de VE au cours d'un exercice

incrémental de marche demandent à être étudiées.

La littérature ne comporte que très peu de données en ce qui concerne le SV_1 chez le jeune en surpoids. En effet, son identification s'avère complexe lorsque l'exercice démarre à un pourcentage élevé de VO_{2peak} (Myers et Bellin, 2000). C'est le cas chez un jeune en surpoids qui utilise une proportion importante de sa VO_{2peak} dès la période d'échauffement (e.g. : 35±8% de VO_{2peak} lors d'un exercice de pédalage à vide) (Norman et al., 2005). Zanconato et al., 1989 ont mesuré le SV_1 chez des enfants en surpoids lors d'un test maximal réalisé sur tapis roulant. Dans cette étude, le SV_1 ne serait pas significativement influencé par l'excès de poids chez l'enfant lorsque celui-ci est exprimé en % VO_{2peak}. En revanche, le SV_2 surviendrait à un pourcentage inférieur de VO_{2peak} chez le jeune en surpoids (Maciejczyk et al., 2013), traduisant une hyperventilation précoce au cours de l'effort. Les mécanismes expliquant la diminution du SV_2 pourraient être associés à une altération de la mécanique respiratoire induite par l'excès adipeux au niveau thoracique (Inselma et al., 1993)

Enfin les jeunes en surpoids présenteraient un rapport VE/VCO_2 diminué en comparaison avec leurs homologues normo-pondérés traduisant une moindre efficience ventilatoire (Inselma et al., 1993 ; Prado et al., 2009). Le rapport VE/VO_2 quant à lui ne semble pas affecté par le surpoids (Maciejczyk et al., 2013). Les auteurs précisent en outre que ces altérations pourraient être davantage liées au déconditionnement qu'au surpoids, justifiant le rôle central de l'activité physique dans l'amélioration des capacités respiratoires chez l'enfant. Concernant la régulation centrale de la ventilation, de récentes découvertes indiquent que la leptine stimulerait la ventilation et par conséquent, qu'une déficience de cette hormone entraînerait une altération du chémoréflexe respiratoire central (Bassi et al., 2016). La résistance à la leptine présente chez l'individu en surpoids pourrait expliquer en partie l'existence de limitations ventilatoires à l'exercice. Actuellement, les études sur le contrôle central de la

ventilation se limitent toutefois à des modèles animaux et n'ont pas été reproduites chez l'humain.

En ce qui concerne la fonction cardiaque, aucune étude ne mentionne l'existence de limitations cardiaques au cours d'un test d'aptitude aérobie chez le jeune en surpoids. Au contraire, ces derniers ont tendance à atteindre des FC éloignées des valeurs maximales lors d'un test d'aptitude aérobie, s'élevant à 80-90% de la valeur maximale théorique (Gutin et al., 2002 ; Thivel et al., 2017). Une étude récente a par ailleurs observé que les enfants en surpoids ont été capables d'atteindre des FC 4% plus élevées lors d'un jeu sportif qu'à l'issue d'un test d'aptitude aérobie sur tapis roulant (Bernsten et al., 2019). D'après ces données et le constat scientifique que seule une minorité de jeunes en surpoids est capable d'atteindre une FC >95% de la valeur maximale théorique à l'issu d'un test sur tapis roulant, il peut être supposé que ces derniers abandonnent aux tests d'aptitude aérobie en dépit d'un niveau de sollicitation cardiorespiratoire sous-maximal.

Les effets délétères de l'excès de poids sur la fonction cardiorespiratoire chez l'enfant et l'adolescent se situeraient surtout au niveau respiratoire. Les travaux cités nous permettent d'affirmer que :

- La répartition abdominale du tissu adipeux (rapport tout de taille / tour de hanche) prédit davantage l'apparition de limitations respiratoires que l'excès de poids mesuré via l'IMC ;
- Les complications respiratoires les plus avancées ne se manifestent qu'à partir d'un certain degré de surpoids (~ grade III), tandis que la plupart des complications respiratoires à l'exercice semblent associées au déconditionnement dû au faible niveau d'activité physique ;
- VO_{2max} semble peu limité par des facteurs ventilatoires ;
- Une minorité de jeunes en surpoids est capable d'atteindre une FC >95%.

Chez l'enfant et l'adolescent, le surpoids n'affecterait que peu la fonction respiratoire ou cardiaque. Dans ce contexte, il est peu probable que les limitations constatées lors de certains tests d'aptitude aérobie (tels que le test de course en navette) soient d'origine respiratoire ou cardiaque. Il semblerait alors que d'autres facteurs tels que les facteurs musculaires soient à l'origine des abandons précoces constatés chez les jeunes en surpoids.

2. Sur la fonction musculaire

Les performances musculaires mesurées via des tests de terrain (e.g. : tests de pompes, saut vertical) sont globalement inférieures chez les jeunes en surpoids, excepté la force de préhension (Castro-Pinheiro et al., 2009 ; Martinez-Lopez et al., 2018 ; Mendoza-Munoz et al, 2020). Néanmoins, ces données masquent des disparités individuelles importantes et ne fournissent que peu d'indications sur l'origine des moindres performances. Seuls certains cas particuliers de surpoids sont identifiés comme étant la cause directe d'une sévère hypotonie musculaire, tels que le syndrome de Prader-Willi. Ici, nous nous intéresserons aux mécanismes musculaires potentiellement impliqués permettant d'expliquer l'abandon précoce lors d'un test de marche ou de course à pied chez le jeune en surpoids.

L'un des signes cliniques les plus évocateurs des limitations musculaires est la fatigue musculaire. Celle-ci est définie par Vollestad (1997) comme « la réduction de la capacité maximale musculaire à générer un travail induite par l'exercice ». Selon Gandevia (2001), la fatigue peut avoir une origine centrale (~ liée au système nerveux) et/ou périphérique (~ liée au muscle). Les mécanismes centraux concerneraient la commande motrice volontaire agoniste et antagoniste, mesurables lors d'une tâche de contraction maximale volontaire (CMV). Les mécanismes périphériques concerneraient la contractilité musculaire et le couple-excitation

contraction, mesurables grâce à la stimulation électrique transcrânienne (TMS) (Patikas et al., 2018). Les recherches effectuées chez l'enfant sain montrent que 1) les enfants prépubères sont davantage limités par des facteurs d'origine centrale alors que les adultes sont davantage limités par des facteurs périphériques 2) les enfants sont comparables à des adultes entraînés concernant leur aptitude à répéter des exercices à haute intensité (Ratel et al., 2015).

Ratel et al., 2006 suggèrent que les limitations musculaires sont à l'origine des faibles performances aérobies de jeunes en surpoids lors d'exercices à haute intensité. Ces limitations seraient en partie dues à une diminution de l'efficience motrice et l'apparition précoce de la fatigue musculaire. Garcia-Vicencio et al. (2015) ont testé cette hypothèse en mesurant la fatigue centrale et périphérique lors d'un exercice d'extension de la cuisse entre des adolescents en surpoids de grade II et des adolescentes de poids normal. Ils ont observé une fatigabilité musculaire précoce chez les adolescentes en surpoids, supportant les hypothèses émises par Ratel et al., 2006. Par ailleurs, la fatigue musculaire semblait davantage causée par des mécanismes périphériques chez l'adolescente en surpoids, tandis que les mécanismes centraux étaient davantage impliqués chez l'adolescente de poids normal. L'amplitude initiale de la Contraction Maximale Volontaire (CMV) était supérieure chez les adolescentes en surpoids. Ils estiment alors que la production d'une force de contraction initiale plus élevée chez ces dernières est la principale cause de leur plus grande fatigabilité par rapport auurs homologues de poids normal – en dehors de toute anomalie métabolique susceptible d'affecter le métabolisme oxydatif. Ce mécanisme paradoxal serait dû à une augmentation de la pression intramusculaire entraînant une diminution de la perfusion musculaire (et donc de l'apport d'O_2 / élimination de métabolites) lors de l'exercice (Wigmore et al., 2006). Sur le plan anatomique, la décroissance plus rapide de la CMV serait associée à une prédominance du taux de fibres musculaires de type II (moins endurantes) au sein des muscles des membres inférieurs (Hamada et al., 2003). Toutefois en l'absence de biopsies musculaires, le lien entre typologie musculaire

et fatigabilité précoce n'a pu être vérifié expérimentalement chez l'adolescente en surpoids. Par ailleurs, les résultats de Garcia-Vicencio et al. (2015) n'ont pas été testés lors d'un exercice de terrain tel que la marche ou la course à pied.

D'autres auteurs ont mesuré l'activité musculaire de jeunes en surpoids lors d'un exercice de marche. Blakemore et al. (2013) rapportent une suractivation des gastrocnémiens (constituant deux des trois muscles du triceps sural avec le soléaire) et des muscles stabilisateurs de la cheville lors de la marche en comparaison avec des jeunes de poids normal. Cette suractivation compenserait le manque de stabilité des jeunes en surpoids, ces derniers étant caractérisés par un faible contrôle postural (Nantel et al., 2006). Ces observations sont en concordance avec les hypothèses de Peyrot et al. (2009) qui attribuaient l'augmentation du CE lors de la marche à la présence excessive de co-contractions musculaires destinées à stabiliser les articulations (réduisant par conséquence le déplacement médio-latéral du CDG).

Bien que les déterminants physiologiques de la fatigue musculaire restent encore difficiles à éclaircir à ce jour dans cette population, la littérature actuelle suggère que les jeunes en surpoids sont caractérisés par une fatigabilité précoce et un recrutement musculaire excessif visant à stabiliser le déplacement. L'exploration des réponses musculaires au cours de différents exercices en condition « libre » semble constituer l'une des pistes actuelles permettant de mieux identifier les mécanismes physiologiques associés à la fatigabilité précoce des jeunes en surpoids (Garcia-Vicencio et al., 2015).

3. Sur la pénibilité de l'effort

La pénibilité de l'effort se définit par les sentiments d'effort, de contrainte, d'inconfort et de fatigue, qu'un individu éprouve durant un exercice (Coquart et al., 2009). Marinov et al. (2002) ont comparé le degré de pénibilité d'effort à la fin d'un test réalisé sur tapis roulant entre

des enfants en surpoids et des enfants normo-pondérés, en utilisant l'échelle catégorielle de Borg en 10 items (Borg, 1982). Cette échelle évalue la sensation de dyspnée de 1 (« pas du tout ») à 10 (« maximal »). Ils observent que les enfants en surpoids présentent des scores supérieurs aux enfants normo-pondérés (6.2±1.2 vs. 5.2±1.1, respectivement). Selon Marinov et al. (2002), la pénibilité accrue de l'effort serait liée à la plus grande contribution du métabolisme anaérobie lors de l'effort chez l'enfant en surpoids, objectivée par l'apparition précoce du SV1 par rapport à l'enfant normo-pondéré. La surproduction de CO_2 entraînerait une augmentation de la ventilation pour un niveau d'effort donné, accentuant la sensation d'inconfort respiratoire. Malgré ces observations, les auteurs rapportent des valeurs maximales < 7/10, présageant que la pénibilité de l'effort n'a pas limité la poursuite du test dans cette étude. Chez des adolescents en surpoids, Thivel et al. (2016) ont observé qu'à 55% de VO_{2peak}, un exercice réalisé sur tapis roulant était associé à un plus haut niveau de pénibilité de l'effort qu'un exercice réalisé sur ergocycle tandis qu'à 75% de VO_{2peak}, l'inverse se produisait. Ce travail présage que chez l'adolescent en surpoids, le passage d'une intensité légère à modérée est associé à une augmentation plus brutale de la pénibilité de l'effort lors d'un exercice où le poids du corps est supporté. Toutefois, les valeurs restaient relativement faibles (entre 4 et 5/10) tendant à indiquer que l'effort était relativement bien toléré chez des adolescents en surpoids à ces intensités Thivel et al. (2016).

Les mécanismes physiologiques expliquant que les jeunes en surpoids parviennent difficilement à atteindre les critères de validation d'atteinte de VO_{2max} lors d'un test maximal progressif peuvent se situer au niveau ventilatoire et musculaire. La pénibilité accrue de l'effort pourrait également jouer un rôle et limiter la poursuite d'un test avant d'avoir atteint VO_{2max}, bien que les données disponibles ne soient pas favorables à cette hypothèse. Les études ayant mesuré la ventilation (Zanconato et al., 1989 ; Mendelson et al., 2012) et l'effort perçu

(Marinov et al., 2002) lors d'un test incrémental maximal sur tapis roulant chez le jeune en surpoids sont toutefois restreintes. Par ailleurs, aucune étude n'a mesuré les réponses musculaires lors d'un exercice d'intensité croissante. Ainsi, l'influence respective des facteurs physiologiques et psychologiques - en association avec la pénibilité de l'effort - sur les abandons précoces lors d'un test incrémental maximal chez le jeune en surpoids restent à éclaircir.

Objectif général

Chez l'enfant, l'aptitude aérobie et le degré d'adiposité seraient les paramètres cliniques les plus importants en matière de santé. Toutefois, l'évaluation de l'aptitude aérobie (dont VO_{2max} et la VMA sont les principaux indicateurs) s'avère complexe chez les jeunes en surpoids en raison de la difficulté à discerner les effets du déconditionnement de ceux de l'excès de poids et de contraintes méthodologiques liées à la pratique des tests d'endurance.

Les principaux tests utilisés pour mesurer VO_{2max} chez le jeune en surpoids sont les exercices de marche avec inclinaison sur tapis roulant ou les tests de marche/course en navette de 20 mètres (20-MST). Lors de ces deux types de protocoles, une proportion élevée des jeunes en surpoids semble être en incapacité physique d'achever le test. L'objectif global de ce travail de thèse fut ainsi d'apporter de nouvelles connaissances utiles à la compréhension des mécanismes pouvant interférer avec la validation d'un test d'aptitude aérobie chez le jeune en surpoids.

La première étude concerne les tests de marche course en navette, lors desquels la répétition d'un nombre croissant de phases de freinage-réaccélération (PFR) pourrait entraîner une augmentation excessive du coût énergétique et par conséquent, un recours disproportionné au métabolisme anaérobie. Nous nous sommes demandés si les PFR caractérisant les tests de type navette pouvaient être associées à un surcoût énergétique excessif chez le jeune en situation d'obésité, expliquant ainsi leurs difficultés.

Les seconde et troisième études concernent les tests de marche sur tapis roulant, lors desquels l'inclinaison du tapis accentuerait le travail du gastrocnémien de façon disproportionnée chez les jeunes en surpoids, alors que ce groupe musculaire est déjà sursollicité pour préserver la stabilité articulaire. Dans la seconde étude, nous avons voulu tester l'hypothèse selon laquelle des mécanismes à l'échelle musculaire pouvaient limiter la

performance aérobie des jeunes en surpoids (Ratel et al., 2006) en identifiant des points d'inflexion (« breakpoints ») dans la désoxyhémoglobine au niveau du gastrocnémien. Dans la troisième étude, nous avons inclus davantage d'individus afin de mesurer l'influence du sexe, de la maturation et du degré de surpoids sur la probabilité d'atteindre VO_{2max} lors d'un test de marche sur tapis roulant. Ce travail a permis de mieux identifier les caractéristiques associée à une plus grande probabilité de produire un effort cardiorespiratoire maximal lors de ce type de test, et d'identifier les mécanismes sous-jacents potentiellement impliqués.

Ensemble, ces données apporteront des nouvelles connaissances utiles à la compréhesion des mécanismes pouvant interférer avec la validation d'un test d'aptitude aérobie chez le jeune en situation d'obésité.

Contribution personnelle

IV. Etude 1

La première étude de ce travail de thèse a fait l'objet d'une publication scientifique dans Journal of Sport Science en Mars 2020. Celle-ci est disponible en accès libre via le lien suivant : https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02509042.

Toulouse L, Baquet G, Heyman E, Pezé T, Berthoin S, Schill A, Aron C, Zunquin G. Respiratory responses and rating of perceived exertion of severely obese adolescents during continuous and intermittent graded walking protocols: Application to cardiorespiratory field tests. J Sports Sci. 2020 May;38(9):1009-1017. doi: 10.1080/02640414.2020.1738701. Epub 2020 Mar 11. PMID: 32160828.

1. Contexte scientifique

En raison de leur praticité et du coût financier des tests de laboratoires, les cliniciens estiment généralement VO_{2max} à partir de tests de terrain (Quinart et al., 2014). Les premières épreuves de terrain validées chez l'enfant sont le test de course en navette de 20m (20-MST ; Léger et al., 1988) (Figure 6) et le test de marche/course sur 1 km (1-MRT) validé par Cureton et al. (1995). Ces deux tests ont été récemment décrits comme étant les tests de terrain les plus appropriés pour estimer VO_{2peak} chez l'enfant (Batista et al., 2017). Nous nous intéresserons en particulier au 20-MST puisqu'il s'agit d'un test incrémental, contrairement au 1-MRT qui est un test où le participant doit parcourir une distance fixe le plus rapidement possible.

i. Les tests de marche/course en navette

Le 20-MST est un test de course en navette maximal et continu comportant des phases de freinage-relance (PFR), et dont l'intensité augmente à raison de 0,5 $km.h^{-1}$ toutes les minutes. Ce test reste la référence internationale en matière d'évaluation de la condition physique chez l'enfant (Lang et al., 2018), étant largement pratiqué dans le milieu scolaire. Le test permet

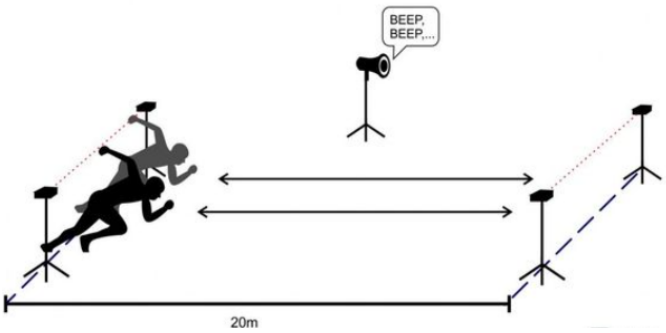


Figure 6 : Représentation du test de course en navette de 20 mètres (Léger et al., 1988). Le participant doit effectuer des allers-retours sur une distance de 20 mètres au rythme d'un signal sonore de plus en plus fréquent. Le palier de départ correspond à une vitesse de 8 km/h, mais peut être adapté aux capacités physiques du participant (6 ou 4 km/h).

également d'estimer VO_{2max} via des équations proposées par l'auteur lui-même ou d'autres auteurs, à partir de la vitesse maximale atteinte lors du test (Vmax), l'âge et le sexe (0 pour les garçons et 1 pour les filles) :

Equation de Léger et al. (1988) :

$$VO2max = 31.025 + 3.238 * Vmax - 3.248 * âge + 0.1536 * Vmax * âge$$

Equation proposée par Barnett et al. (1993), actuellement recommandée (Batista et al., 2017) :

$$VO2max = 24.2 - 5.0 * sexe - 0.8 * âge + 3.4 * Vmax$$

Chez le jeune en surpoids, les chercheurs ont commencé à s'interroger à partir des années 2000 quant à la validité du 20-MST. En effet, la littérature indique que quel que soit l'âge et le sexe, les performances observées chez les enfants en surpoids sont significativement inférieures par rapport aux enfants non-obèses (Deforche et al., 2003 ; Nassis et al., 2005 ; Bovet et al., 2007 ; Castro-Pinheiro et al., 2011 ; Moran et al., 2017). Ces études suggèrent que les jeunes en surpoids seraient désavantagés lors du 20-MST. Il y a deux principales explications à cela : **la vitesse du premier palier et la présence de phases de freinage réaccélération.**

Problématique 1 : la vitesse initiale

Le protocole original du 20-MST impose une vitesse de départ s'élevant à 8 $km.h^{-1}$. Il est évident que cette vitesse de départ, en l'absence de récupération, est trop élevée pour des jeunes en surpoids, dont la VMA n'excède parfois pas une allure de marche rapide (Klijn et al., 2007). Dès le début du test, une grande partie de ces derniers sont contraints de réaliser un effort à une intensité d'exercice supra-maximale, justifiant leur incapacité à maintenir l'effort plus de deux minutes (Moran et al., 2017). Pour contrer cette limitation, plusieurs auteurs ont proposé l'utilisation d'une version adaptée du 20-MST pour rendre ce type de test plus accessible aux jeunes en surpoids. L'une de ces versions est le *« Modified Shuttle Test »* (MST), utilisée par Klijn et al. (2007) chez l'adolescent en surpoids de grade III. Ce protocole conçu initialement pour des patients atteints de mucoviscidose consiste à effectuer des aller et retours sur une distance de 10 mètres. La vitesse démarre à une allure de 0,5 $m.s^{-1}$ (1,8 $km.h^{-1}$) et la vitesse augmente de 0,17 $m.s^{-1}$ (~ 0,6 $km.h^{-1}$) par minute, soit 0,5 $m.s^{-1}$ toutes les trois minutes. Selon les résultats de leur étude (Klijn et al., 2007), la distance parcourue lors du MST était corrélée au VO_{2peak} ($r = 0.79$, $p<0.001$) mesuré via un test incrémental sur ergomètre. Plus tard, Quinart et al. (2014) ont validé le test de marche/course navette adapté de 20 mètres (TMNA-20), une autre version adaptée du 20-MST. Ces auteurs ont ajouté 10 paliers supplémentaires préalablement au palier de départ du protocole original, permettant un départ à 4 $km.h^{-1}$, une vitesse adaptée aux capacités des jeunes en surpoids. Le VO_{2peak} est calculé à partir d'une équation incluant la vitesse maximale atteinte lors du test, l'âge, le sexe et l'IMC :

$$VO2\,\max = 19.66 + 2.21 * Vmax + 0.05 * âge + 2.08 * sexe - 0.38 * IMC$$

Cette équation permettrait de prédire VO_{2peak} chez l'adolescent en surpoids avec une marge d'erreur réduite (< 3 $ml.min^{-1}.kg^{-1}$) grâce à l'inclusion de l'IMC dans l'équation.

L'application de ce correctif souligne néanmoins le rôle déterminant de la corpulence dans la prédiction de VO_{2peak} lors d'un test de course en navette. L'excès de poids altère ainsi inévitablement VO_{2peak} mesuré lors de ce type de test, même lorsque le protocole semble adapté aux allures de déplacement des jeunes en surpoids.

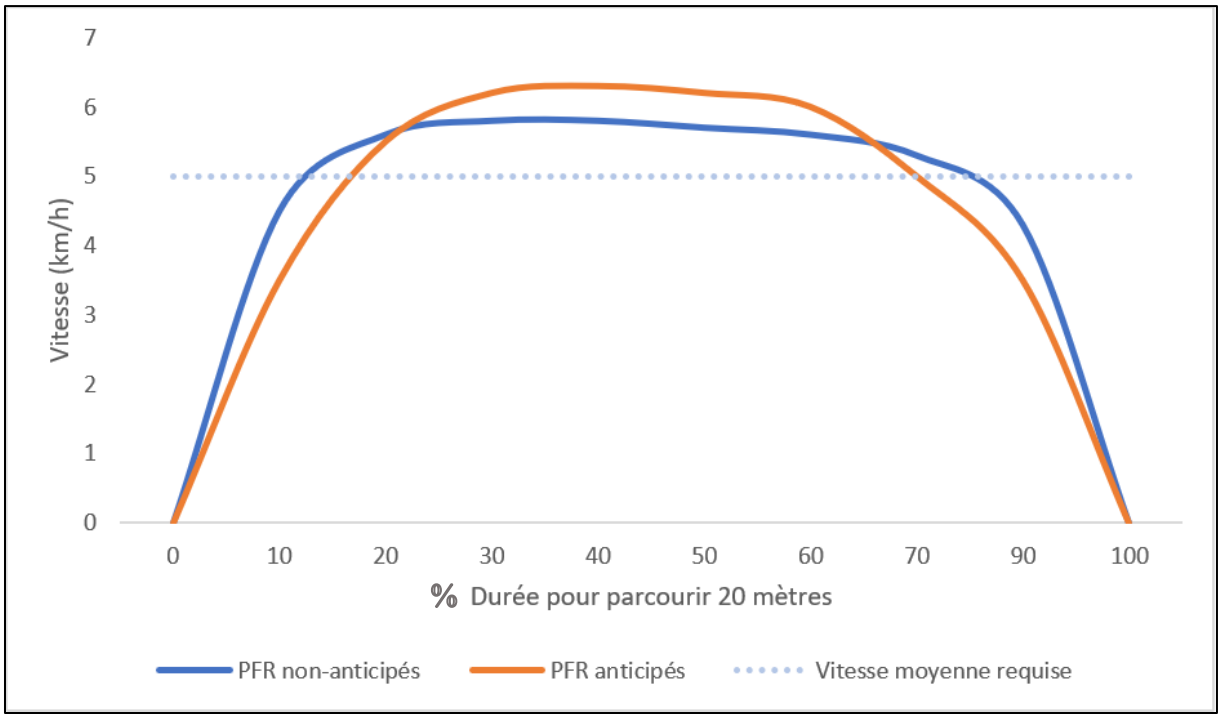


Figure 7 : Evolution typique de la vitesse de marche/course de deux participants entre deux signaux sonores lors d'un test de marche/course en navette de 20 mètres. Bien que les deux participants aient respecté le délai nécessaire pour parcourir les 20 mètres sans s'arrêter, la gestion de la vitesse de course diffère entre les deux participants.

Problématique 2 : les phases de freinage-réaccélération

La seconde contrainte majeure associée aux tests de course en navette est la répétition fréquente de **phases de freinage-réaccélération (PFR)**. En effet, sur les 20 mètres parcourus à chaque trajet lors du test, la vitesse n'est pas régulière : elle augmente en tout début de trajet, se stabilise, puis diminue à la fin du trajet. Afin de respecter l'allure moyenne sur 20 mètres imposée par les signaux sonores, le participant doit ainsi atteindre un pic de vitesse plus élevé afin d'avoir le temps de freiner et accélérer (Figure 7). D'autre part, la vitesse maximale à maintenir sur la portion intermédiaire dépend de la durée que le participant s'accorde pour

freiner et réaccélérer : plus le temps nécessaire pour freiner-réaccérer est élevé, plus le participant est contraint de gagner du temps en atteignant une vitesse de course élevée sur la portion intermédiaire des 20 mètres.

Chaque participant utilise une stratégie dépendant de ses aptitudes motrices, de sa connaissance de soi, de la perception de ses capacités physiques et de la connaissance du test. Par conséquent, un participant peu expérimenté dans ce type d'exercice sera désavantagé en comparaison avec un participant spécifiquement entraîné pour ce type d'exercice, tels que les pratiquants de sports collectifs (Buchheit et al., 2011 ; Hatamoto et al. (2014)). Par ailleurs, la distance à parcourir étant fixée à 20 mètres, le nombre de PFR augmente proportionnellement avec la vitesse (Tableau 7), accentuant potentiellement les contraintes associées à ces PFR.

Palier (km/h)	4	5	6	7	8
Nombre de PFR par minute	3,4	4,3	5,1	5,9	6,7

Tableau 7 : Fréquence des phases de freinage-réaccélération (PFR) lors d'un test de marche/course en navette de 20 mètres en fonction du palier.

Malgré une allure moyenne équivalente, il a été démontré que la présence des PFR se traduisait par une augmentation de la demande énergétique. Chez le sportif, il a été observé que la lactatémie de fin de test était significativement plus élevée à l'issue du 20-MST en comparaison avec un test incrémental linéaire, alors que VO_{2peak} était comparable entre les tests (Ahmaidi et al. 1992). Cela signifierait que la contribution du métabolisme anaérobie est supérieure lors d'un test de type navette, traduisant une augmentation des besoins énergétiques. Chez le footballeur de haut niveau, Hatamoto et al. (2014) ont calculé le coût en oxygène additionnel associée aux PFR pour des vitesses comprises entre 3 et 8 $km.h^{-1}$. Ils observent que le surcoût en oxygène est proportionnel à la fréquence des PFR et que l'impact énergétique des

PFR est majoré par la vitesse (Figure 8). Cette étude montre que même pour des faibles vitesses (marche) chez un footballeur, l'impact énergétique des PFR devient significatif à partir d'une certaine vitesse et/ou fréquence de PFR. Selon les données de ces auteurs, le surcoût en oxygène associé aux PFR s'élèverait entre 40 et 50% pour une fréquence de 13 PFR par minute (vitesses associées comprises entre 3 et 8 $km.h^{-1}$) Ces vitesses sont comparables aux vitesses atteintes lors du TMNA-20 chez des jeunes en surpoids (Quinart et al., 2014). En se basant sur ce modèle, linéaire, le surcoût en oxygène associé aux PFR à 8 km.h-1 lors du test navette pourrait s'élever à 20-25% chez un footballeur, puisque le nombre de PFR s'élève à 6,7 par minute pour ce palier (Tableau 7).

L'extrapolation des données à partir d'un modèle linéaire présente certaines limitations. D'abord, Hatamoto et al. (2014) précisent que la modélisation quadratique était celle qui

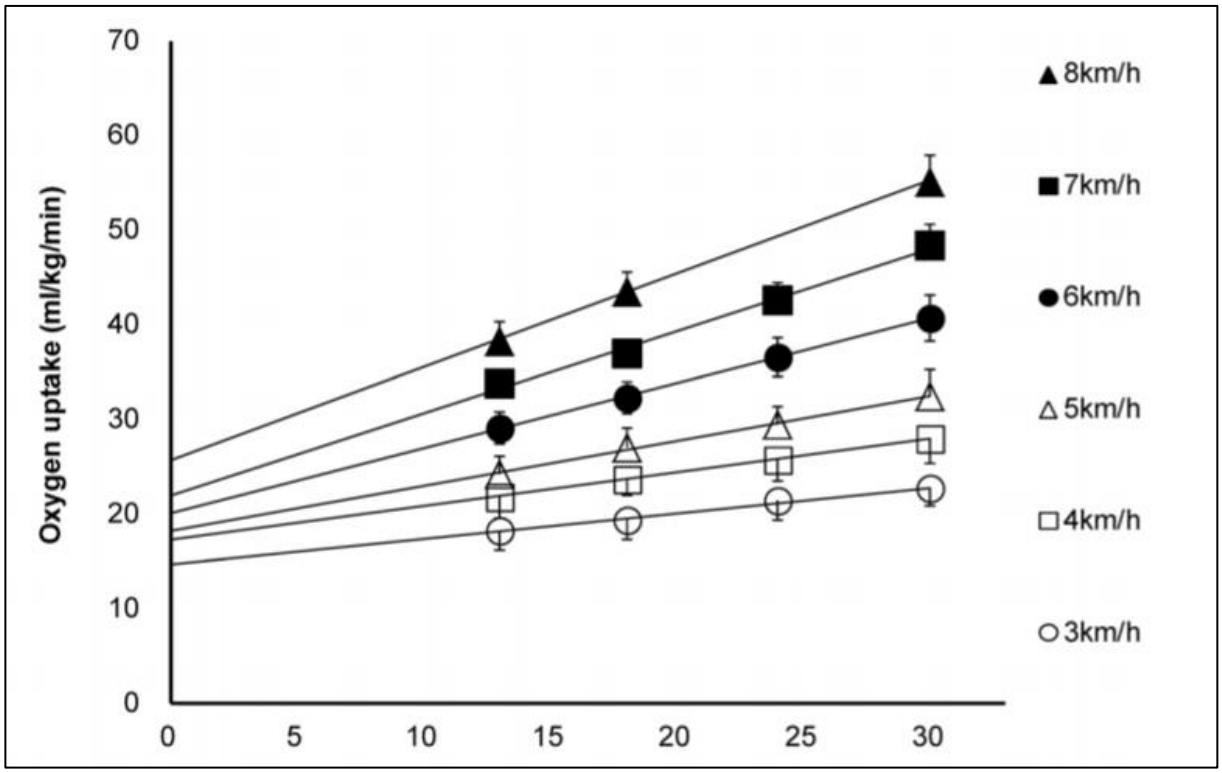


Figure 8 : VO_2 en fonction de la fréquence des PFR et de la vitesse de marche. La pente de la relation VO_2 / PFR augmente avec la vitesse, indiquant que le surcoût en oxygène associé aux PFR est amplifié par la vitesse (figure extraite de l'article de Hatamoto et al., 2014).

décrivait le mieux le surcoût énergétique associé aux PFR. Du point de vue mathématique, la modélisation quadratique (typiquement de forme $f(x) = ax^2$) implique que l'augmentation de la variable expliquée (VO_2 associé aux PFR) s'accentue avec l'augmentation variable explicative (fréquence des PFR). Cela signifie ici que le plus le nombre de PFR par minute était élevé, plus le surcoût énergétique associé à une PFR était important. Ensuite, un modèle s'appuyant sur VO_2 pourrait sous-estimer l'impact énergétique total des PFR puisque VO_2 ne reflète que la fourniture énergétique à partir des processus aérobies. Or, la contribution anaérobie pourrait constituer une part significative du surcoût énergétique associé aux PFR. Enfin, ces données s'appliquent à des athlètes entraînés pour ce type d'exercice ; les auteurs estiment que le surcoût associé aux PFR est plus important chez des individus inhabitués à ce type d'effort.

Compte tenu des conséquences négatives de l'excès de poids sur le CE (Peyrot et al, 2009) et les qualités motrices (Gentier et al., 2013) des enfants et adolescents, il peut être supposé que le surcoût énergétique associé aux PFR puisse expliquer les faibles performances lors d'un test de type navette chez un jeune en surpoids – bien que ces derniers puissent atteindre une fréquence cardiaque (FC) supérieure à 185 bpm à la fin du 20-MST (Voss et Sandercock., 2009). En effet, l'augmentation brutale de la demande énergétique induite par les PFR pourrait créer un décalage trop élevé entre la demande énergétique et l'apport en O_2 et entraîner une performance aérobie sous-optimale pour ce public, **y compris lorsque la vitesse de départ est adaptée à leurs capacités**. Toutefois, le surcoût énergétique associé aux PFR n'a pas encore été mesuré chez un jeune en surpoids.

ii. Le test intermittent 15-15 « test Spartacus »

Afin de contourner les multiples contraintes associées aux tests navettes, certains auteurs se sont intéressés à l'utilisation d'un test intermittent pour évaluer l'aptitude aérobie chez l'enfant et l'adolescent. Ainsi, un test intermittent appelé « test Spartacus » (SpT) fut

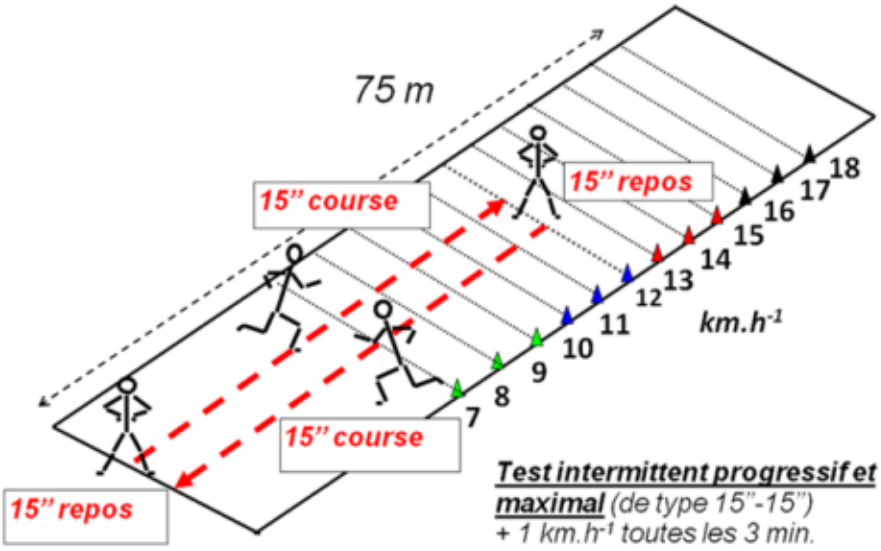


Figure 1 : Dispositions matérielles du test « Spartacus »

Deux opérateurs se placent, l'un à la ligne de départ, l'autre au plot correspondant à la vitesse du palier. L'un de ces deux opérateurs dispose d'un chronomètre et délivre un repère sonore toutes les 15 sec.

Vitesse (Km.h⁻¹)	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Distance (m)	29,2	33,3	37,5	41,7	45,8	50,0	54,2	58,3	62,5	66,7	70,8	75,0

Tableau 1.Distances des paliers.

Figure 9 : Représentation du Spartacus test (Rossi et al., 2009). Le protocole consiste à effectuer des périodes d'exercice de 15 secondes, suivies de périodes de récupération passives de 15 secondes. La distance à parcourir à chaque période d'exercice est déterminée par le palier. La vitesse initiale s'élève à 7 km.h^{-1} et augmente de 1 km.h^{-1} toutes les 3 minutes.

développé par Rossi et al. (2009) pour évaluer l'aptitude fonctionnelle aérobie des enfants en milieu scolaire (Figure 9). Contrairement au 20-MST, le SpT se caractérise par des phases successives d'exercices et de récupération passives courtes (15 secondes), présentant un aspect plus ludique chez l'enfant. L'incrémentation est aussi plus progressive (1 km.h^{-1} toutes les trois minutes) et la vitesse de départ inférieure, s'élevant à 7 km.h^{-1}.

En raison de son caractère plus progressif et sa nature intermittente, Rey et al. (2013) ont souhaité étudier l'intérêt de ce test chez l'adolescent en surpoids. Ils ont comparé les réponses physiologiques et perceptuelles lors de ce test et lors du 20-MST et ont observé que

les adolescents étaient capables d'atteindre des vitesses 20% supérieures lors du SpT en comparaison avec le 20-MST, tout en atteignant des fréquences cardiaques et des niveaux de pénibilité de l'effort comparables. Trois ans plus tard, ces mêmes auteurs ont observé que VO_{2peak} atteint lors du test navette était comparable entre les deux tests, s'élevant respectivement à 34,2 ± 5,0 et 38,4 ± 6,1 $ml.min^{-1}.kg^{-1}$ pour le SpT et le 20-MST (Rey et al., 2016). En utilisant l'échelle de soi physique perçu en 6 items « PSI-6b » (Ninot et al., 2006), Rey et al. ont observé que les participants déclaraient des niveaux plus élevés de perception de sa condition physique, s'expliquant par la fierté de pouvoir courir à des vitesses plus élevées et sur de plus longues durées. Thivel et al. (2017) observent quant à eux des fréquences cardiaques de fin de test supérieures lors du SpT (FC = 194,5 ± 12,4 bpm) en comparaison avec le 20-MST (FC = 173.5 ± 4.7 bpm), mais n'observent pas de différence significative concernant la pénibilité de l'effort (CERT-scale par Williams et al., 1994). Ces résultats contradictoires pourraient être liés à des différences de sexe (6 garçons et 5 filles lors de la première étude, 12 filles lors de la seconde étude), ou méthodologiques (échelle de Borg vs. échelle CR-10). Par ailleurs, les fréquences cardiaques de fin de test suggèrent que les participants de cette dernière étude ont abandonné précocement lors du 20-MST.

La nature intermittente du Spartacus test présenterait un avantage sur le plan musculaire. Comme le soulignent Rey et al. (2013), l'exercice intermittent est typiquement associé à une moindre accumulation des lactates au niveau musculaire et potentiellement, à une apparition plus tardive de l'acidose musculaire. Le jeune en surpoids pallierait sa faible endurance anaérobie par une récupération passive lors des changements direction. Le SpT présente ainsi des atouts disposant l'adolescent en surpoids à être davantage investi que lors d'un 20-MST, bien que les données actuelles indiquent que le SpT ne permet pas d'atteindre un VO_{2peak} plus élevé que lors du 20-MST. Enfin, dans le cadre de la prise en charge de l'enfant en surpoids, Fillon et al. (2020) ont observé que le changement de VO_{2peak} mesuré sur ergocycle n'était pas

corrélé au changement de la vitesse atteinte lors du SpT. Ces auteurs concluent que le SpT devrait davantage être utilisé pour apprécier l'évolution de l'aptitude fonctionnelle aérobie que celle de VO_{2peak}.

Actuellement, les études sur le Spartacus test chez le jeune en surpoids se limitent à ces quatres études (Rey et al. 2013 ; 2016 ; Thivel et al., 2017 ; Fillon et al., 2020). Lors de ces études, le protocole original du Spartacus test a été mis en place tel que proposé dans le contexte scolaire, c'est-à-dire avec une vitesse initiale s'élevant à 7 $km.h^{-1}$. Or , bien qu'étant inférieure à celle du 20-MST (8 $km.h^{-1}$), la vitesse initiale du Spartacus test peut être trop élevée pour certains jeunes en surpoids, en particulier lorsque ces derniers sont peu actifs et/ou en surpoids de grade III. Ainsi, il est pertinent d'étudier les réponses physiologique et perceptuelles lors du Spartacus test réalisé à des paliers inférieurs à 7 $km.h^{-1}$, mieux adaptés aux jeunes ayant un niveau élevé de surpoids.

2. Objectifs & hypothèses

L'objectif principal de cette étude fut de mesurer l'impact des phases de freinage-réaccélération sur la consommation en oxygène, le coût énergétique et la pénibilité de l'effort de jeunes en surpoids lors d'un exercice incrémental de marche. L'évaluation du coût additionnel généré par la présence de PFR permettait de mieux évaluer la part de responsabilité de la nature du protocole dans le risque d'abandon du jeune en surpoids lors de ce type de test. Notre hypothèse était que les PFR induiraient une augmentation des réponses physiologiques et de la RPE même à des faibles vitesses.

Notre objectif secondaire était de comparer ces mêmes paramètres lors du test Spartacus réalisé à des paliers de marche (< 7$km.h^{-1}$) avec ceux mesurés lors d'un exercice incrémental continu. L'enjeu était ici de déterminer si, à vitesse équivalente, la modalité intermittente

permettait de diminuer l'intensité de l'effort et de rendre le test plus progressif (c'est-à-dire, diminuer l'augmentation du coût énergétique à chaque palier) qu'un test incrémental de modalité continue. Notre hypothèse était qu'à vitesse équivalente, le consommation en oxygène et la pénibilité de l'effort diminueraient significativement lors du test Spartacus en comparaison avec le test incrémental continu.

3. Matériel et méthode

i. Participants et données anthropométriques

Des adolescentes et adolescents pris en charge au Service de Soin de suite et de Réadaptation de l'Hôpital Maritime de Zuydcoote (SSR HMZ) ont été inclus pour cette étude. Les critères d'inclusions comprenaient un âge situé entre 12 et 17 ans et un surpoids de grade II défini par un IMC > 97ème centile des courbes françaises (Rolland-Cachera et al., 1991). Les participants accompagnés de leurs parents ont effectué un total de 4 visites à l'hôpital dont une visite d'inclusion et trois visites lors desquelles un test de marche incrémental était effectué.

Lors d'une première session d'inclusion, nous leur avons présenté le protocole expérimental et les avons formé à l'utilisation de l'échelle de pénibilité de l'effort en 10 items appelée COPE-10 (Quinart et al., 2014). Puis, dans le cadre de leur suivi habituel, les participants ont été mesurés à l'aide d'une toise puis pesés à l'aide d'une balance à impédancemétrie (modèle TANITA DC-360) afin de calculer l'IMC, le z-score d'IMC et la composition corporelle des participants. A l'issue de cette session, nous avons recueilli le consentement éclairé du participants et de ses parents, avec un langage adapté auur niveau de compréhension. Le protocole de l'étude fut approuvé par le Comité d'Ethique pour la Recherche en STAPS (n°2020-11-02-44).

ii. Procédure expérimentale

Durant les trois visites suivantes, les participants ont réalisé l'un des trois protocoles incrémentaux de marche représentés sur la Figure 10, sur une piste circulaire de 50 mètres. Chaque protocole durait 12 minutes, réparties en 4 paliers de 3 minutes, délai estimé nécessaire pour atteindre un état ventilatoire stable chez l'enfant (Fawkner et Armstrong, 2003). Les

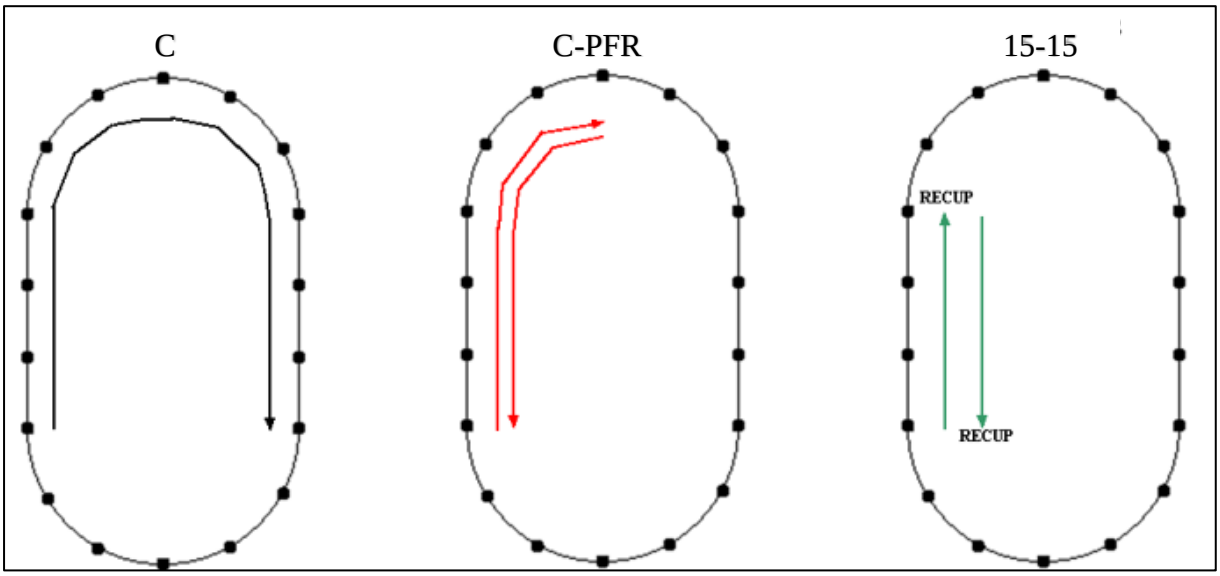


Figure 10 : Représentation schématique des trois protocoles pour 1 minute d'exercice. Abbréviations : rec = récupération passive ; C = continu (contrôle) ; C-PFR = continu avec PFR ; 15-15 = protocole intermittent. La distance entre deux points noirs correspond à un intervalle de 4,17 mètres.

vitesses des paliers ont été fixées à 3, 4, 5 puis 6 $km.h^{-1}$, correspondant respectivement à 0.83, 1.11, 1.39, 1.67 $m.s^{-1}$, des vitesses comparables à celles utilisées par d'autres auteurs (Peyrot et al., 2009). Afin de guider les participants, des plots était placés à un intervalle régulier de 4,17 mètres, correspondant à la distance parcourue en 15 secondes à 1 $km.h^{-1}$. Un signal sonore était émis toutes les 15 secondes, permettant au participant d'ajuster sa vitesse au cours du test.

Pour chaque participant, les trois protocoles ont été réalisés sur un intervalle d'une semaine, dans un ordre randomisé et sur trois matinées successives entre 9 et 12 heures, séparés d'une période minimale de 24h de récupération. Les participants ont été accompagnés par un

expérimentateur tout au long des exercices afin de garantir le respect des protocoles. Les protocoles étaient les suivants :

- Le *protocole C* (condition continue contrôle) consistait simplement à marcher le long de la piste en respectant la vitesse imposée par les signaux sonores ;
- Le *protocole C-PFR* consistait à marcher en continu en effectuant un demi-tour toutes les 30 secondes (c'est-à-dire tous les 2 signaux sonores), soit 2 PFR par minute. Les PFR ont été réalisés conformément à la méthode décrite par Hatamoto et al. (2014) à laquelle les participants ont été formés juste avant de réaliser le protocole. La méthode consistait à pivoter vers l'intérieur en prenant appui sur son pied le plus fort afin de minimiser le déséquilibre au cours du mouvement. Nous avons utilisé ce type de protocole plutôt qu'un test de marche/course en navette classique (c'est-à-dire, où le nombre de PFR augmente avec la vitesse) afin de permettre à l'ensemble des participants de réaliser le protocole dans son intégralité
- Le *protocole 15-15* consistait à marcher, récupérer passivement puis marcher à nouveau dans le sens opposé sur des périodes successives de 15 secondes. Cette modalité correspondrait aux paliers de niveau inférieur à la vitesse de départ proposée lors du Spartacus test (7 $km.h^{-1}$).

iii. Recueil des données

Consommation en oxygène

Durant chaque test, les participants portaient un analyseur de gaz respiratoires (Cosmed K4b², Italie) pré-calibré conformément aux instructions du fabricant. Avant de démarrer chaque exercice, VO_2 associé à la station debout a été mesuré. Pour cela, il était demandé aux participants de maintenir une position debout statique pendant 10 minutes, délai minimal estimé

pour atteindre un VO_2 stable de repos (Compher et al., 2006). Puis, les données de VO_2 ont été moyennées sur les 30 dernières secondes de chaque palier de 3 minutes pour les protocoles C et C-PFR et sur les deux dernières périodes de 15 secondes d'exercice pour le protocole 15-15.

Pénibilité de l'effort

La pénibilité de l'effort (RPE) fut indiquée par les participants à la fin de chaque palier. Le score était désigné en se basant sur la COPE-10.

Calcul du coût énergétique

A partir de VO_2 et de la vitesse, le coût énergétique associé à la marche (Cw) fut calculé suivant la méthode utilisé par Peyrot et al. (2009). Cette méthode consistait à soustraire VO_2 associée à la station debout au VO_2 associée à l'exercice, et à diviser le tout par la vitesse (V) pour chaque palier et pour chaque modalité d'exercice (équation 1). Cette méthode permet de ne calculer que le coût énergétique additionnel occasionné par le déplacement :

$$Cw(palier) = \frac{VO2(debout) - VO2(palier)}{V(palier)}$$

Remarque : Cw s'exprime en $ml.kg^{-1}.m^{-1}$; VO_2 s'exprime en $ml.min^{-1}.kg^{-1}$; V s'exprime en $m.min^{-1}$

iv. Analyse statistique

Les données ont été analysées avec le logiciel R (version 3.5.1). La normalité et l'homogénéité des distributions ont été vérifiées avec le test de Shapiro-Wilk et le test F de Snedecor. Les différences intersexes pour l'âge, l'IMC, la masse corporelle et la masse grasse ont été testées à l'aide de tests t de Student (les distributions respectaient les conditions pour pratiquer un test paramétriques). Les effets du protocole et de la vitesse sur VO_2 et le CE ont

été évalués à l'aide d'une analyse de variance (ANOVA) à deux facteurs (protocole et vitesse) ; des mesures répétées ont été réalisées sur les deux facteurs. Un test *post-hoc* de Duncan à rang multiple fut appliqué pour comparer chaque protocole 2 à 2 (C vs. C-PFR ; C vs. 15-15 ; C-PFR vs. 15-15). Ensuite, les effets du protocole et de la vitesse sur la RPE ont été analysés à l'aide d'une ANOVA de Friedman suivie d'analyses *post-hoc* à l'aide de tests de Wilcoxon pour échantillons appariés. Enfin, les relations entre RPE et VO_2 au cours des protocoles ont été testées avec le test de corrélation d'ordre de rang de Spearman. Le seuil de significativité était fixé à $p<0.05$.

4. **Résultats**

19 participants (dont 12 filles et 7 garçons) ont réalisé l'ensemble des expérimentations. Leurs caractéristiques sont présentées dans le Tableau 6. Aucune différence significative n'a été observée entre les filles et les garçons en ce qui concerne les caractéristiques anthropométriques mesurés (âge, IMC, z-score d'IMC, masse corporelle et masse grasse). La majorité des participants présentait un surpoids de grade III, correspondant à un z-score d'IMC >3 (n =15).

Tableau 8 : caractéristiques des participants (valeurs moyennes ± SD).

	Filles (n = 12)	Garçons (n = 7)	Total (n = 19)
Age (années)	15.7 ± 1.1	14.4 ± 1.6	15.2 ± 1.5
IMC ($kg.m^{-2}$)	39.4 ± 4.7	40.2 ± 7.7	39.7 ± 5.9
Z-Score IMC (SD)	3.4 ± 0.2	3.2 ± 0.3	3.3 ± 0.2
Masse corporelle (kg)	103.0 ± 14.2	117.1 ± 33.6	108.2 ± 24.3
Masse grasse (%)	46.4 ± 2.8	40.4 ± 8.2	44.3 ± 6.2

i. Réponses physiologiques

Les données de VO_2 et de Cw sont représentées en fonction de la vitesse et du type de protocole sur les Figures 11 et 12. Les analyses statistiques ont révélé un effet d'interaction significatif entre le protocole et la vitesse sur VO_2 et Cw ($p<0.001$). La vitesse influençait significativement VO_2 et le Cw, et ce d'une manière différente en fonction du type de protocole. Les analyses *post-hoc* ont indiqué que cette interaction était due à une différence significative entre le protocole 15-15 et le protocole C et entre le protocole 15-15 et le protocole C-PFR. Ainsi, VO_2 diminuait significativement de 15 à 25% lors du protocole 15-15 en comparaison avec le protocole C de 4 à 6 $km.h^{-1}$ ($p<0.05$ à 0.001), tandis que la diminution du Cw était significative dès le palier 3 $km.h^{-1}$. En revanche, aucune différence significative n'a été

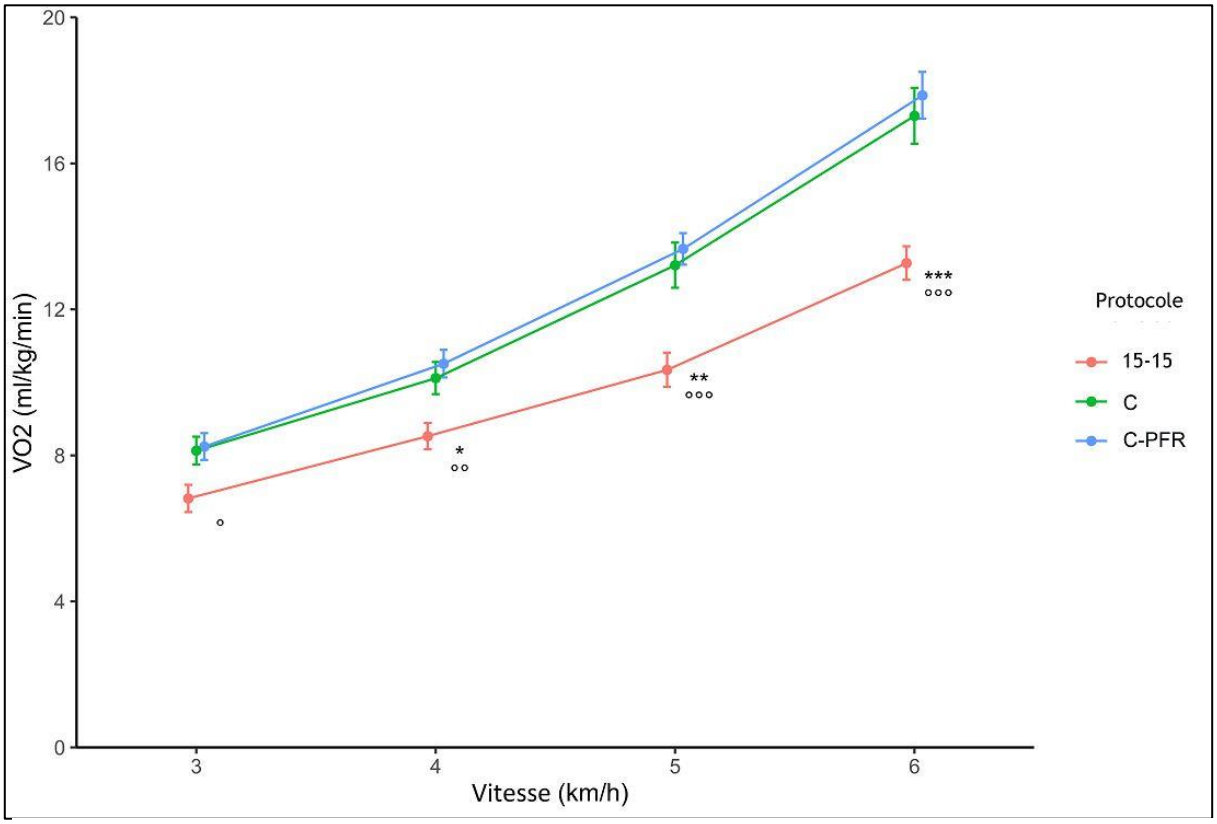


Figure 11 : consommation en oxygène (VO_2) en fonction de la vitesse de marche et du type de protocole. Différences significatives entre le protocole 15–15 et C: * ($p < 0.05$); ** ($p < 0.01$); *** ($p < 0.001$). Différences significatives entre le protocole 15–15 et C-PFR: ° ($p < 0.05$); °° ($p < 0.01$); °°° ($p < 0.001$).

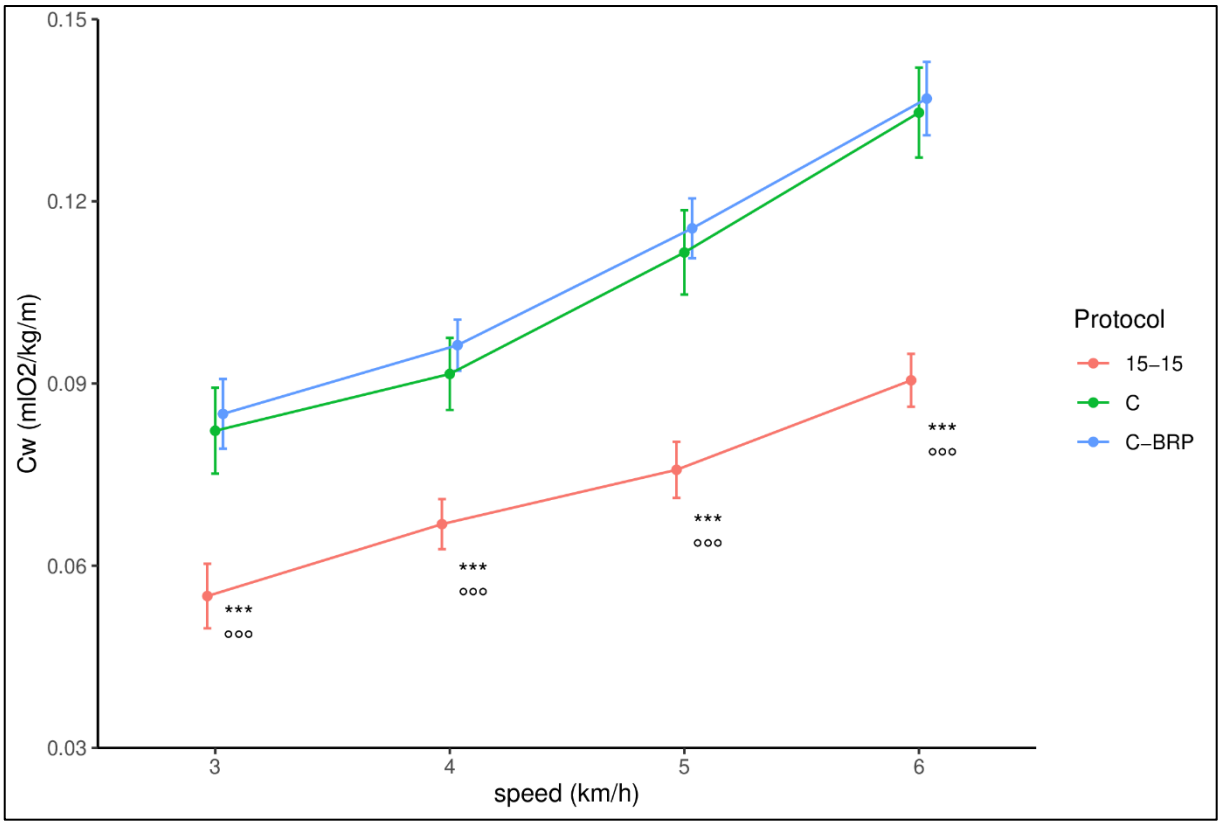


Figure 12 : coût énergétique aérobie (Cw) en fonction de la vitesse de marche et du type de protocole. Différences significatives entre le protocole 15–15 et C: * ($p < 0.05$); ** ($p < 0.01$); *** ($p < 0.001$). Différences significatives entre le protocole 15–15 et C-PFR: ° ($p < 0.05$); °° ($p < 0.01$); °°° ($p < 0.001$).

observée entre le protocole C et C-PFR pour les trois paramètres quelle que soit la vitesse de marche ($p>0.30$).

ii. Pénibilité de l'effort

Les données de RPE sont présentées dans la Figure 13. D'après nos analyses, il n'y avait pas d'interaction significative entre le protocole et la vitesse sur la RPE, signifiant que ce paramètre évoluait avec la vitesse de façon comparable entre le protocole C, C-PFR et 15-15. Les tests *post-hoc* indiquent que la RPE était ~ 0.5 point supérieure lors du protocole C-PFR par rapport au protocole 15-15 entre 4 et 6 $km.h^{-1}$ ($p<0.05$). Cependant, la RPE était comparable entre le protocole C et C-PFR ($p=0.51$).

iii. Relation entre la consommation en oxygène et la pénibilité de l'effort

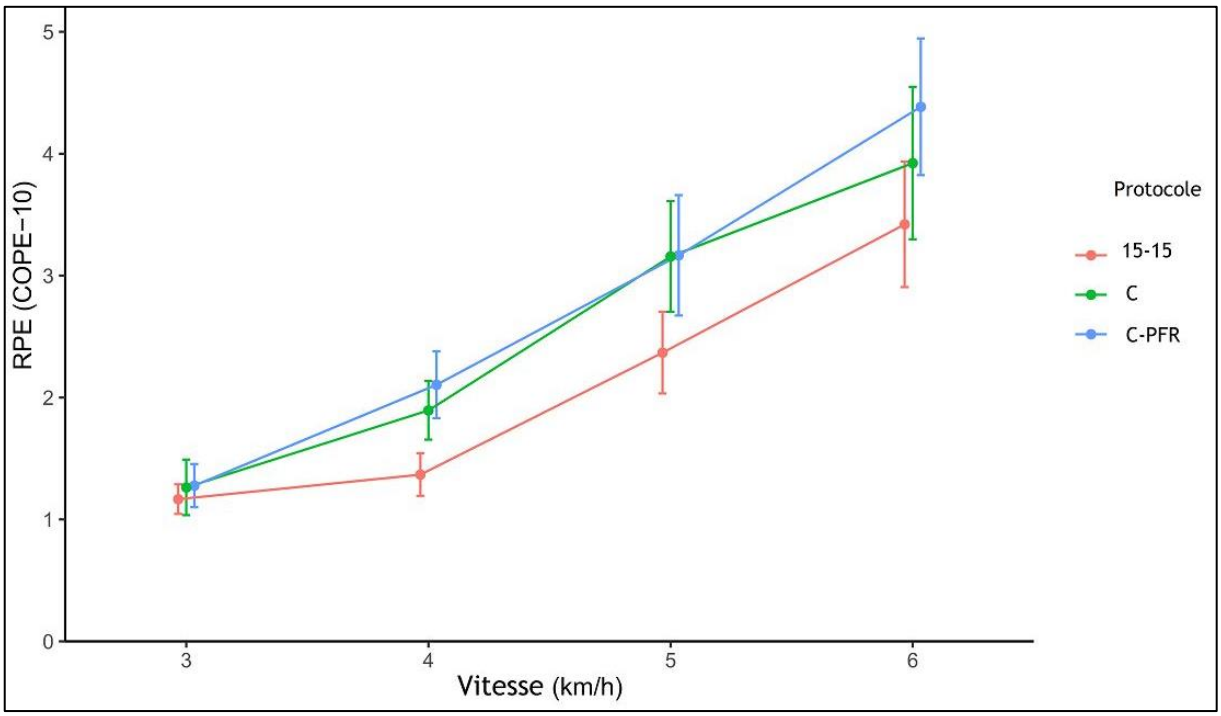


Figure 13 : pénibilité de l'effort (RPE) en fonction de la vitesse de marche et du type de protocole. Les différences observées entre les protocoles ne sont pas significatives à $p<0.05$.

Une relation modérée à forte fut observée entre la RPE et VO_2 quelle que soit la modalité d'exercice ($p<0.001$). Par ailleurs, cette relation était plus marquée lors du protocole C ($r=0.64$) et C-PFR ($r=0.66$) comparé au protocole 15-15 ($r=0.49$).

5. **Discussion**

Cette étude visait à comparer les réponses physiologiques et perceptuelles entre trois types de tests de marche incrémentaux. Notre objectif était d'identifier les mécanismes potentiels pouvant limiter les jeunes en surpoids lors d'un test d'aptitude aérobie de type navette et d'étudier l'intérêt de la modalité intermittente pour des vitesses de marche. Les principaux résultats issus de notre étude sont les suivants :

- Les réponses physiologiques et la pénibilité de l'effort ne sont pas significativement impactées par la présence de 2 phases de freinage-réaccélération par minutes chez le jeune en surpoids ;
- Même au cours de la marche, la modalité intermittente 15-15 permet une diminution progressive des réponses physiologiques (~15 à 25% de 4 à 6 $km.h^{-1}$).

Dans un premier temps, nous avions supposé que la présence de PFR lors d'un test incrémental de marche serait associé à une augmentation significative des réponses physiologiques et de la RPE à partir de vitesses > 4 $km.h^{-1}$ (la vitesse spontanée chez le jeune en surpoids s'élevant en moyenne à 4.5 $km.h^{-1}$ selon Peyrot et al., 2010). Contrairement à nos attentes, ni les réponses respiratoires (VO_2, Cw) ni la RPE n'étaient significativement différents entre le protocole C et C-PFR, malgré la présence de 2 PFR par minute lors du protocole C-PFR. A 6 $km.h^{-1}$, VO_2 atteignait 17.3 ± 2.3 et 17.9 ± 1.9 $ml.min^{-1}.kg^{-1}$ pour le protocole C et C-PFR respectivement. Ainsi, la présence de 2 PFR par minute n'aurait entraîné qu'une augmentation de VO_2 de 0.6 $ml.min^{-1}.kg^{-1}$, représentant un surcoût énergétique non significatif de 3 à 4%.

Chez l'individu en surpoids, les contractions musculaires nécessaires pour déplacer le poids du corps s'élèvent disproportionnellement pour préserver leur stabilité dynamique, protégeant ainsi leurs articulations (Sheehan et Gormley, 2012). C'est pourquoi nous avions émis l'hypothèse que la nécessité de freiner, effectuer un demi-tour puis réaccélérer rapidement lors d'un exercice de marche continu impacterait significativement les réponses physiologiques. Les présents résultats suggèrent que les réponses métaboliques mesurées à l'étage pulmonaire ne sont pas significativement affectées par les PFR chez le jeune en surpoids durant la marche. Il semblerait qu'au cours de la marche, la réalisation de 2 PFR par minute ne représente pas un

stimulus assez important pour augmenter les réponses physiologiques même chez l'adolescent en surpoids.

Chez l'athlète, le surcoût en oxygène observable lors du 20-MST en comparaison avec un exercice de course linéaire n'est significatif qu'à partir de vitesses supérieures à 60% de la vitesse maximale atteinte lors du 20-MST (Buchheit et al., 2011). En se basant sur les caractéristiques de nos participants et les données de Thivel et al. (2017) et celles de Rey et al. (2016), nous pourrions estimer que les participants de nos études étaient capables d'atteindre une vitesse minimale 7 $km.h^{-1}$ lors du 20-MST. A 6 $km.h^{-1}$, on pourrait supposer que nos participants se déplaçaient à des vitesses correspondant à plus de 70% leur vitesse finale atteignable lors de ce type de test. Cependant, le protocole utilisé était une version adaptée du 20-MST destinée à faciliter la réalisation complète du test par l'ensemble de nos participants, tout en permettant de mesurer le surcoût énergétique associé aux PFR. En effet, lors du 20-MST (ou sa version adaptée chez l'adolescent en surpoids appelée TMNA-20, validée par Quinart et al., 2014), la fréquence des PFR est plus élevée que dans notre protocole C-PFR et augmente proportionnellement avec la vitesse (3 PFR par minute à 4 $km.h^{-1}$ et 5 PFR par minute à 6 $km.h^{-1}$). Ainsi, à vitesse équivalente, notre protocole nécessitait de réaliser 2 à 3 fois moins de PFR que lors du 20-MST. Ceci pourrait expliquer en grande partie que l'impact respiratoire et perceptuel des PFR n'était pas significatif malgré le degré de surpoids de nos participants.

Il est important de préciser que les réponses physiologiques mesurées à l'étage pulmonaire ne reflètent pas précisément les réponses mesurables à l'niveau musculaire. En effet, plusieurs auteurs ont démontré qu'à pourcentage de VO_{2peak} équivalent, la course en navette était associée à une hausse de la contribution du métabolisme anaérobie chez l'athlète (Ahmaidi et al., 1992 ; Buchheit et al., 2011). Par ailleurs, les adolescents en surpoids seraient caractérisés par une plus grande fatigabilité (Garcia-Vicencio et al., 2015) et une moindre capacité oxydative musculaire (Lazzer et al., 2013). Ainsi, l'apparition prématurée de la fatigue

neuromusculaire semble être un facteur limitant l'effort chez les jeunes en surpoids (Ratel et al., 2006). Ces résultats amènent à penser que les facteurs musculaires pourraient empêcher certains adolescents en surpoids à poursuivre un test de marche ou de course à pied, bien que leur système cardiorespiratoire ne soit pas encore limité (en particulier lors d'un test de type navette). Pour des raisons pratiques, les réponses musculaires n'ont pas été mesurés lors de cette étude, limitant l'interprétation de nos résultats.

Les jeunes en surpoids ont des difficultés à atteindre un état cardiorespiratoire maximal (Thivel et Aucouturier, 2015), en particulier lors d'un exercice de marche ou de course à pied (Nantel et al., 2006). En raison de leurs avantages pratiques et économiques, les tests de type « course en navette » sont couramment utilisés pour évaluer l'aptitude fonctionnelle aérobie auprès de cette population (Klijn et al., 2007 ; Quinart et al., 2014). Ces derniers présentent toutefois des caractéristiques peu adaptées au surpoids, telles que la présence des PFR et l'absence de périodes de récupération. Bien que ces difficultés soient mentionnées dans plusieurs études (Klijn et al., 2007 ; Castro-Pineiro et al., 2011 ; Moran et al., 2017), aucune étude n'a été consacrée à l'exploration des mécanismes physiologiques susceptibles de limiter les jeunes en surpoids lors d'un test de marche ou de course en navette.

L'objectif de cette étude était également de comparer les réponses physiologiques et la RPE lors d'un protocole intermittent 15-15 et d'un protocole continu, avec ou sans PFR. La modalité intermittente 15-15 a été utilisée pour concevoir le Spartacus test, un test intermittent destiné à l'évaluation de l'aptitude fonctionnelle aérobie validé chez l'adolescent en surpoids (Rey et al., 2016 ; Thivel et al., 2017). Conformément à notre hypothèse, pendant le protocole 15-15, VO_2 était 15 à 25% inférieure comparé au protocole C et C-PFR à partir de 4 $km.h^{-1}$ ($p<0.05$ à $p<0.001$). L'intensité de l'exercice correspondait approximativement 30-50% des capacités maximales d'un jeune en surpoids de grade III (pour un VO_{2peak} estimé à ~ 25 $ml.min^{-1}.kg^{-1}$), supposant que la marche intermittente représente une activité d'intensité légère ou tout

au plus modérée chez un jeune ayant un degré sévère de surpoids. D'autre part, l'intensité de l'effort augmente plus progressivement lors du protocole 15-15 démontrant son caractère plus progressif en comparaison avec un exercice continu (y compris pour des allures de marche). La nature progressive de ce test le rend ainsi plus accessible chez un jeune en surpoids tout en facilitant la détermination de zones de travail dans le cadre d'un programme de réentraînement intermittent (Rey et al., 2013).

Concernant les mécanismes respiratoires, les périodes de récupération passives permettraient de réduire l'accumulation d'un déficit en O_2 lors de la phase d'exercice précédente, réduisant l'essoufflement physiologique vécu au cours de l'exercice suivant (Dupont et al., 2003). Etant donné que la sensation de dyspnée représente l'un des facteurs limitant majeurs lors d'un exercice chez un jeune en surpoids (Marinov et al., 2002), un protocole intermittent basé sur des intervalles courts pourrait les conduire davantage à atteindre un état cardiorespiratoire maximal (>95% de la fréquence cardiaque maximale théorique). Sur le plan musculaire, la modalité intermittente 15-15 pourrait retarder l'apparition de la fatigue musculaire (Thivel et al., 2017), favorisant ainsi la poursuite du test au-delà de ce qu'ils peuvent réaliser lors d'un test de type navette. Les résultats de Rey et al., 2016 indiquent néanmoins que VO_{2peak} mesuré lors du Spartacus test n'est pas significativement différent de celui mesuré lors du 20-MST chez des adolescents en surpoids, malgré l'atteinte de vitesses 20% supérieures lors du Spartacus test. Ce résultat suggère que le Spartacus test n'est pas supérieur au 20-MST en ce qui concerne l'évaluation de VO_{2max}. Des données récentes confirment par ailleurs que le Spartacus test est peu adapté au suivi de VO_{2max} chez le jeune en surpoids et qu'à ce titre, il ne devrait être utilisé que pour l'évaluation de l'aptitude fonctionnelle aérobie spécifique à la modalité intermittente (Fillon et al., 2020).

Finalement, la RPE fut évaluée avec la COPE-10, une échelle permettant de mesurer la pénibilité de l'effort en 10 items récemment validée chez l'adolescent en surpoids (Quinart et

al., 2016). Contrairement à nos hypothèses, il n'y avait pas de différence significative de RPE entre le protocole 15-15 et les protocoles C et C-PFR. Au regard des paramètres respiratoires, il semblerait que les stimuli physiologiques générés par chaque protocole étaient insuffisants pour que des différences apparaissent du point de vue de la RPE. Ceci tend à être conforté par les faibles scores de RPE reportés par les participants, correspondant à des intensités modérées (~ 3 à 4/10). On peut également supposer que le manque d'expérience motrices des jeunes en surpoids ne leur permet pas de quantifier finement le niveau d'effort perçu entre différentes conditions d'exercice. Par ailleurs, les corrélations confirment que la RPE est fortement associée au VO_2 chez l'adolescent en surpoids (Quinart et al., 2016). Toutefois, les relations entre la RPE et VO_2 n'avaient pas encore été étudiées lors d'un exercice intermittent au sein de cette population. Nos résultats indiquent que les relations entre RPE et VO_2 étaient plus faibles lors du 15-15 (r=0.49) en comparaison avec les protocoles C et C-PFR (r=0.64 et 0.66, respectivement). La nature intermittente du protocole 15-15 pourrait poser davantage de difficulté à évaluer l'intensité de son effort aussi précisément que lors d'un exercice continu, en particulier chez un adolescent en surpoids peu habitué à pratiquer une activité physique. Ces données suggèrent que la RPE est moins sensible lors d'un exercice intermittent 15-15, probablement en raison de l'alternance fréquente entre phases d'exercice et phases de récupération.

Nos résultats et ceux de précédentes études suggèrent que la modalité intermittente, avec ou sans PFR, pourrait favoriser l'adhésion à un programme d'activité physique chez l'adolescent en surpoids. Ces exercices, par ailleurs, caractérisent de nombreuses disciplines tels que les sports collectifs, et procureraient d'importants bénéfices sur les capacités aérobies (Thivel et al., 2019), tout en permettant un maintien à plus long terme des bénéfices (Tjonna et al., 2009). Ainsi, l'inclusion de ces activités intermittentes à haute intensité dans un programme

d'APA chez les adolescents en surpoids aptes à leur pratique apparaît légitime à la fois sur le plan physiologique et psychologique.

Pour finir, les résultats supportent l'idée que les mécanismes physiologiques justifiant les faibles performances des jeunes en surpoids ne se situent pas à l'niveau respiratoire et que le Spartacus test (15-15) réalisé à des intensités de marche constitue une alternative intéressante aux tests de type navette pour l'évaluation de l'aptitude fonctionnelle aérobie.

Limitations et perspectives futures

Nos travaux présentes certaines limitations. D'abord, la variabilité interindividuelle en ce qui concerne les caractéristiques physiologiques (puberté, statut pondéral, sexe, niveau d'entraînement) et psychologiques (tolérance à l'effort, expériences personnelles) a entraîné une variabilité importante dans les résultats. Contrôler ces nombreux paramètres nécessiterait de classifier les individus par groupe (sexe, âge, grades de surpoids) et d'inclure davantage de participants. De plus, la variabilité du point de vue de l'âge, du degré de surpoids, de l'histoire de l'obésité, des adolescents suivis dans le cadre d'un programme multidisciplinaire dans un établissement de type SSR est une contrainte clinique déjà décrite par Rey et al. (2016). Toutefois, notre objectif était de comparer les réponses physiologiques et perceptuelles lors de différents types de protocoles incrémentaux pour un groupe d'adolescents en surpoids : l'impact des caractéristiques individuelles (sexe, âge, grades de surpoids) sur le surcoût énergétique associé aux PFR ou sur l'économie associée aux périodes de récupération passives pourrait être l'objectif d'une future étude sur un échantillon plus large. L'autre principale limitation à cette étude est le caractère sous-maximal de nos protocoles : il pourrait être intéressant de comparer les réponses cardiorespiratoires maximales en fonction de ces différentes modalités d'exercice. Néanmoins, la répétition de trois tests maximaux dans un

cours laps de temps est contraignante pour les individus et donc peu acceptable éthiquement chez le jeune en surpoids.

6. Conclusion

Pour conclure, la présence de deux PFR par minute n'a pas significativement augmenté les réponses physiologiques ni la RPE à des vitesses comprises entre 3 et 6 $km.h^{-1}$. Pendant un protocole 15-15, les réponses physiologiques diminuaient de ~15 à 25% en comparaison avec un exercice continu pour une allure de marche comprise entre 4 et 6 $km.h^{-1}$. La RPE correspondait à des intensités légères à modérées quels que soient les protocoles et n'était pas significativement diminuée par la présence de périodes de récupération passives. Ainsi à des allures de marche, l'impact respiratoire et la perception de la pénibilité de l'effort des phases de freinage-réaccélération caractérisant le 20m shuttle run test est mineur et que la modalité intermittente 15-15 est plus progressive qu'un exercice continu même à faible allure (4-6 $km.h^{-1}$) chez un adolescent en surpoids.

Les résultats de cette première étude étaient peu attendus puisqu'il semblerait que l'impact des PFR caractérisant les tests de type navette soit négligeable sur VO_2 mesurée à l'étage pulmonaire. En effet, l'impact des PFR pourrait se répercuter plus particulièrement à l'niveau musculaire et nécessiter l'emploi d'autres techniques de mesures du métabolisme aérobie, localisées au niveau des muscles en activité. La spectroscopie du proche-infrarouge (NIRS), décrite dans le troisième chapitre de la revue de la littérature, est l'une des techniques actuelles permettant d'étudier le métabolisme musculaire au cours d'un exercice.

Cependant, avant de déterminer si la modalité d'exercice peut avoir un impact sur la fonction musculaire et *in fine*, sur VO_{2peak} atteignable au cours d'un exercice incrémental de marche/course de terrain, il nous a semblé nécessaire ;

- d'une part, d'apprécier les réponses cardiorespiratoires et musculaires dans un environnement contrôlé afin de mieux envisager l'évolution de ces paramètres lors d'un test de terrain (tests de type navette, Spartacus test) ;
- d'autre part, de déterminer si les caractéristiques individuelles (puberté, statut pondéral, sexe) influencent la probabilité d'atteindre VO_{2max} lors d'un exercice incrémental nécessitant de supporter son poids.

Ainsi, notre seconde étude s'est penchée sur la caractérisation des réponses cardiorespiratoires et musculaires d'enfants et d'adolescents en surpoids au cours d'un exercice incrémental de marche réalisé sur tapis roulant. Celle-ci avait pour principal objectif de détecter des breakpoints (intensité seuil au-delà de laquelle les cinétiques de désoxyhémoglobine atteignent un plateau). Pour cela, nous avons utilisé un dispositif de NIRS portable en combinaison avec une analyse des gaz respiratoires, ce qui nous a permis de combiner une mesure du métabolisme « global » (représentée par la calorimétrie indirecte) à une mesure du métabolisme « local » (représentée par la NIRS) au cours d'un exercice d'intensité progressive, un travail qui n'avait encore jamais réalisé chez le jeune en surpoids.

Enfin, la troisième étude de ce travail de thèse s'est basée sur l'étude des facteurs individuels associés à la l'atteinte des critères de vérification de $VO_{2max(clin)}$ au cours d'un test incrémental réalisé sur tapis roulant. Ce travail fut mené sur une population élargie (> 50 sujets) et a également permis de fournir des données récentes sur l'aptitude aérobie des jeunes en situation d'obésité dans le contexte spécifique de la marche.

V. Etude 2

1. Contexte scientifique

i. Evaluation de VO_{2max} : contraintes méthodologiques

Les tests d'intensité croissante menés jusqu'à épuisement sont considérés comme les méthodes de référence pour évaluer VO_{2peak} chez un patient présentant des complications cardiovasculaires (Riede et al., 2015). Parmi les tests d'intensité croissante, on peut distinguer deux types de protocoles :

- Le protocole de type « incrémental » (Figure 14), appelé également « test triangulaire ». Ce protocole est basé sur un système de paliers successifs de difficulté croissante. L'expérimentateur sélectionne la durée d'un palier et l'incrément avec lequel l'intensité de l'effort sera augmentée à chaque palier. L'intensité de départ est généralement définie à partir des caractéristiques du participant (âge, sexe). Sur le tapis roulant, l'incrément peut correspondre à une vitesse (0,5 $km.h^{-1}$, 1 $km.h^{-1}$ ...), à un degré d'inclinaison (1%, 2% ...) ou aux deux simultanément.

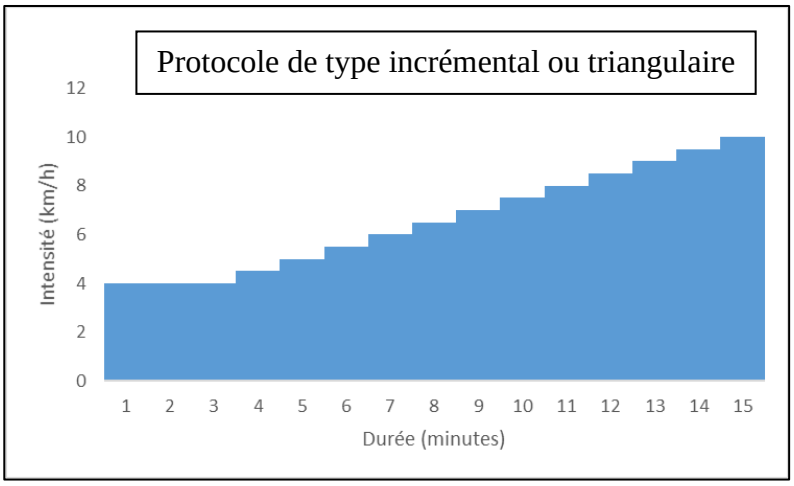


Figure 14 : Représentation d'un protocole incrémental avec des paliers de 1 minute. C'est le type de protocole caractérisant les tests de terrain. Les paliers varient de 1 à 3 minutes.

- Les protocoles de type « ramp » (Figure 15), recommandés pour l'évaluation des gaz respiratoires (Myers et al., 2000), sont basés sur l'augmentation continue de l'intensité de l'exercice grâce à un paramétrage automatisé. La vitesse ou la puissance maximale aérobie théorique est estimée pour l'individu en fonction de ses caractéristiques, ce qui permet de déterminer le rythme d'augmentation de la difficulté au cours du temps.

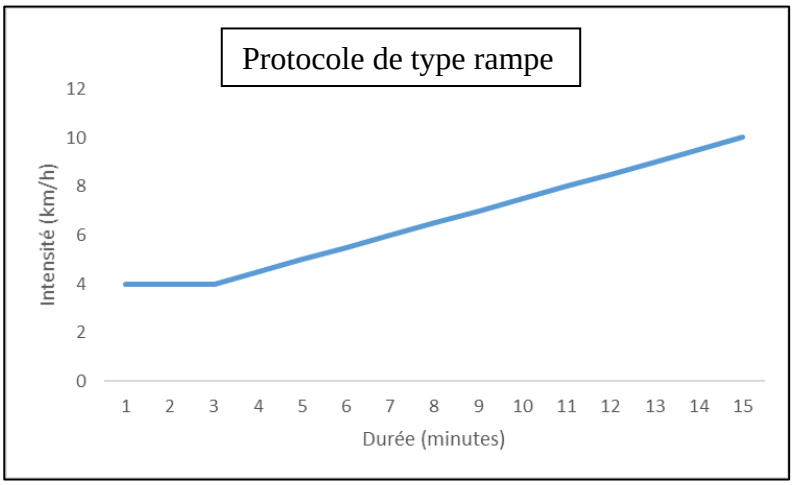


Figure 15 : Représentation d'un protocole de type "rampe". Ce type de protocole a été recommandé pour mesurer finement les gaz respiratoires car il permet une adaptation progressive à l'effort (Myers et al., 1992).

Etant donné que la marche est une activité accessible et représentative des activités physiques effectuées en condition libre, les tests de marche sur tapis roulant sont les plus fréquemment utilisés pour évaluer VO_{2peak} chez un jeune en surpoids. Les premiers protocoles sur tapis roulant utilisés pour mesurer la tolérance cardiorespiratoire à l'effort furent les protocoles de Balke (1959), Ellestad et al. (1969) et de Bruce et al. (1973). La Figure 16 représente le protocole de Balke, actuellement le plus utilisé chez le jeune en surpoids. Le protocole de Bruce est basé sur l'augmentation simultanée de la vitesse et de la pente à chaque palier de 3 minutes, avec une pente de départ à 10%. Le protocole de Ellestad, quant à lui, n'est basé que sur l'augmentation de la vitesse par paliers de 2 à 3 minutes, mais avec une pente de 10% tout au long du test.

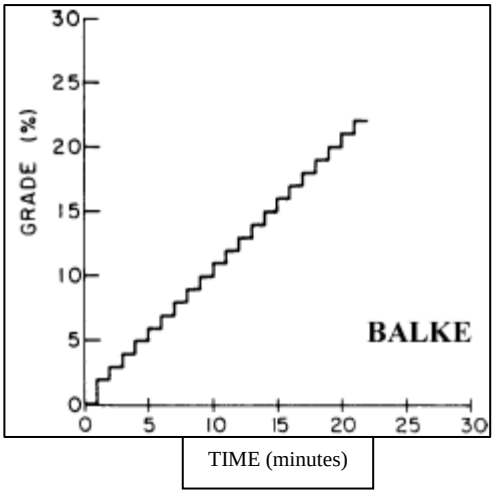


Figure 16 : Représentation du protocole de Balke (1959). La vitesse initiale est constante (5,6 km/h) et la pente augmente de 1% à chaque minute jusqu'à ce que le participant abandonne.

Les réponses cardiorespiratoires à ces trois protocoles ont été mesurées chez l'adulte par Lukaski et al. (1989). Leurs résultats (Figure 17) indiquent que le protocole de Bruce est celui qui permet d'atteindre la plus haute valeur de VO_2, malgré des fréquences cardiaques maximales (FC_{max}) comparables entre les trois protocoles. Ces résultats seraient liés à la durée du test : les durées observées lors du protocole de Balke s'élèvent à plus de 25 minutes, loin des 10±2 minutes recommandées pour mesurer VO_{2peak}. Lukaski et al. rappellent néanmoins

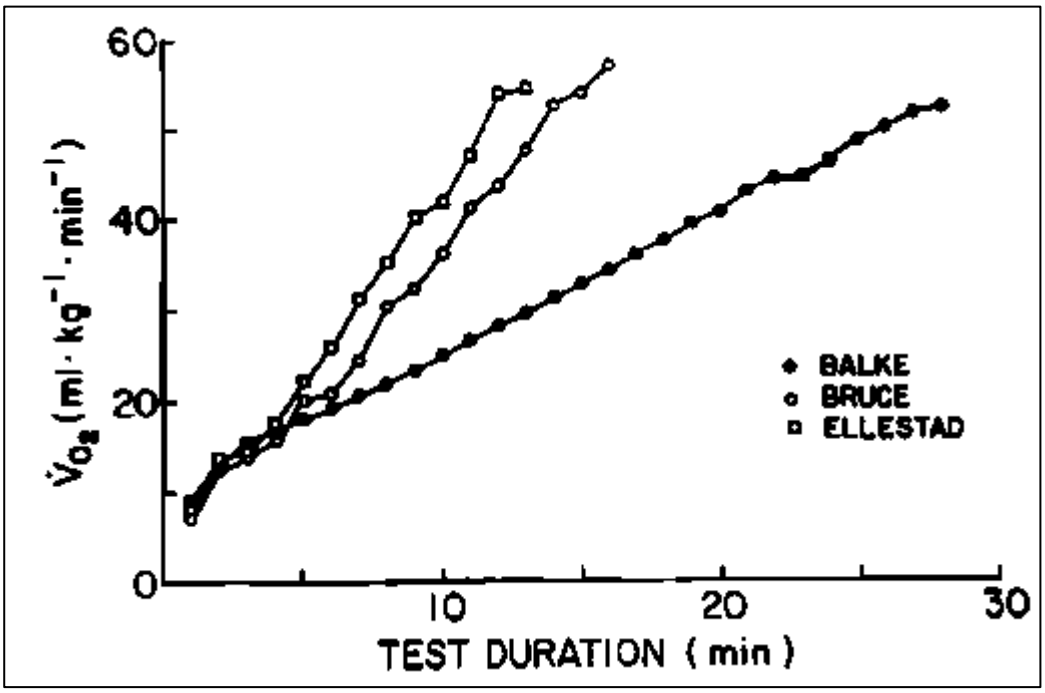


Figure 17 :Consommation en oxygène mesurée lors des protocoles de Bruce, Ellestad et Balke chez 16 hommes âgés de 19 à 47 ans (Figure extraite de l'article de Lukaski et al., 1989).

que les protocoles de Bruce et de Ellestad ont été conçus pour mesurer la fonction cardiovasculaire alors que le protocole de Balke a été conçu pour mesurer l'aptitude aérobie. Leurs résultats montrent ainsi comment le choix du protocole peut influer sur les résultats obtenus auprès d'un même individu.

En pratique clinique actuellement, les tests utilisés en laboratoire pour mesurer VO_{2peak} chez le jeune en surpoids s'inspirent davantage du protocole de Balke (Trowbridge et al., 1997 ; Gutin et al., 2002 ; Marinov et al., 2003). Lors de ces tests, la vitesse est maintenue constante, à une allure soutenue mais confortable pour le participant – souvent sélectionnée par le participant lui-même. Cette allure est en moyenne comprise entre 3 et 5 $km.h^{-1}$, correspondant cliniquement au rythme spontané d'un enfant ou d'un adolescent en surpoids (Peyrot et al., 2009). L'intensité de l'exercice est régulée par l'augmentation de l'inclinaison à chaque minute à raison de 1 à 2%, jusqu'à ce que le participant déclare ne plus être en mesure de poursuivre le test. Ce type de test permettrait à des enfants d'atteindre VO_{2peak} sans courir (Trowbridge et al., 1997), réduisant ainsi les contraintes mécaniques subies au cours de l'effort. Chez un jeune en surpoids, on peut supposer que ce type de test limite les douleurs musculo-squelettiques induites par l'excès de poids (douleurs musculaires décrites au niveau des membres inférieurs par Tsiros et al., 2014).

La littérature indique que les tests sur tapis roulant utilisés actuellement ne permettent pas efficacement d'atteindre VO_{2max} chez un jeune en surpoids. En effet, différents auteurs (Gutin et al., 2002 ; Breithaupt et al., 2012) ont montré qu'un faible pourcentage de jeunes en surpoids atteint les critères de validation d'atteinte de VO_{2max}. Afin de limiter les pertes de données ou le recueil de données non valides en laboratoire, ces mêmes auteurs ont proposé de mesurer l'aptitude aérobie de jeunes en surpoids grâce à des tests sous-maximaux. Ces tests permettent soit d'estimer VO_{2max} grâce à une équation (Nemeth et al., 2009), soit de recueillir des paramètres sous-maximaux, utilisés alors comme repères alternatifs de l'aptitude aérobie

tels que VO_2 à 170 battements par minute (Gutin et al., 2002) ou la pente d'efficacité de la consommation en oxygène (en anglais *« oxygen uptake efficiency slope »*). Le lien entre ces indicateurs et la santé n'a toutefois pas encore été testé chez le jeune en surpoids. Par ailleurs, comme toute estimation, VO_{2max} obtenu à partir d'un test sous-maximal peut être en décalage important avec VO_{2max} réel de l'individu. Ainsi, l'identification des mécanismes physiologiques qui sont à l'origine de l'incapacité physique à valider un test d'aptitude aérobie représente un enjeu méthodologique et clinique important à l'heure actuelle chez le jeune en surpoids.

ii. Non-atteinte de VO_{2max} liée au surpoids : rôle des contraintes musculaires

S'appuyant sur le constat scientifique et clinique que de nombreux jeunes en surpoids ne valident pas les tests en dépit de leur motivation, certains auteurs ont émis l'hypothèse que des limitations à l'niveau musculaire pouvaient interférer avec la poursuite de l'effort lors d'un exercice de type marche ou course à pied (Ratel et al., 2006 ; Rey et al., 2013). Plusieurs études scientifiques (dont celles présentées dans le troisième chapitre de la revue de la littérature) tendent à supporter cette hypothèse. En effet, ces travaux ont permis d'établir que les jeunes en surpoids étaient caractérisés par une fatigabilité musculaire précoce et par un recrutement musculaire excessif lors des exercices de marche.

L'étude la plus significative sur le sujet est l'étude de Blakemore et al. (2013) indiquant que les jeunes en surpoids présentaient des niveaux plus élevés d'activation du gastrocnémien que leurs homologues normo-pondérés durant la marche. Cette observation suggère que les contraintes musculaires sont amplifiées chez le jeune en surpoids au cours de la marche. En utilisant une approche biomécanique, Strutzenberger et al. (2017) ont récemment montré qu'une inclinaison excessive pouvait entraîner une altération de la locomotion chez un jeune en surpoids. Ces auteurs ont mesuré l'effet de différents niveaux d'inclinaison (6 et 12° soit ~10,5 et 21% de pente) lors d'un exercice de marche sur la contrainte exercée sur les articulations de

la hanche, du genou et de la cheville. Chez les jeunes en surpoids, le degré de flexion articulaire au niveau de la hanche, du genou et de la cheville s'élevait de manière disproportionnée par rapport aux jeunes normo-pondérés et ce phénomène s'accentuait avec l'augmentation de l'inclinaison. Par conséquent, l'augmentation du travail musculaire des membres inférieurs (en particulier le gastrocnémien) induit par l'inclinaison était disproportionné chez les jeunes en surpoids. Ces contraintes pourraient par ailleurs être majorées par les déformations squelettiques souvent décrites dans cette population (de Sa Pinto et al., 2006). Ainsi, ces études soulignent à la fois la plus-value de la pluridiscinarité dans la compréhension d'un phénomène complexe, mais également le caractère multifactoriel des conséquences cliniques de l'obésité à l'exercice.

Les études présentées apportent des informations utiles à la compréhension des difficultés vécues par les jeunes en surpoids lors d'un test de marche sur tapis roulant. Cependant, ces travaux n'ont pas été effectués dans le but d'identifier les facteurs limitant l'atteinte de VO_{2max} lors d'un test de marche. Ainsi, compte tenu de l'état des connaissances actuelles, il semble pertinent de mesurer conjointement les réponses musculaires et respiratoires lors d'un test de marche sur tapis roulant destiné à mesurer VO_{2max}. L'une des technologies ayant le potentiel de contribuer à ce travail est la spectroscopie du proche-infrarouge, ou « NIRS » (*Near Infrared Spectroscopy*).

iii. Etude de la fonction musculaire à l'exerccie : Intérêt de la NIRS

La spectroscopie en général est une technique de mesure se basant sur les propriétés optiques des molécules pour détecter la composition chimique d'un objet ou tissu. En 1977, le nord-américain Jöbsis fut le premier scientifique à démontrer que les tissus biologiques étaient relativement perméable à la lumière dans le spectre du proche infrarouge (700-1300 nm). Jöbsis

utilise ainsi la spectroscopie pour étudier les concentrations d'oxyhémoglobine (oxy[heme]) et de désoxyhémoglobine (deoxy[heme]) dans le tissu cardiaque et cérébral humain (Scholkmann et al., 2014 ; Barstow, 2019). Etant donné que les longueurs d'ondes absorbées par ces molécules se situent dans le proche-infrarouge (~700 à 850 nm), le terme « spectroscopie du proche-infrarouge » (en anglais *near-infrared spectroscopy ou NIRS*) fut retenu pour désigner cette technique de mesure. C'est au début des années 1990 qu'une première équipe menée par Marco Ferrari a mesuré les cinétiques d'oxygénation musculaire (de Blasi et al., 1991). L'utilisation de la NIRS musculaire au cours d'un exercice s'est depuis largement répandue. Barstow (2019) indique que la NIRS appliquée à l'exercice a fait l'objet jusqu'à présent de plus de 1000 publications sur Pubmed.

En additionnant les quantités de deoxy[heme] et de oxy[heme], il est possible de déterminer la quantité d'hémoglobine totale présente dans le tissu, notée total[heme], qui reflèterait les variations de flux sanguin local (Davis & Barstow, 2013). Ce dernier paramètre permet ainsi de calculer l'index de saturation en oxygène [STO_2(%) = oxy[Heme] / total[heme]]. Ces 4 paramètres obtenus (deoxy[heme], oxy[heme], total[heme], STO_2(%)) permettent de caractériser l'équilibre entre apport et utilisation de l'oxygène à l'niveau musculaire, ce qui présente un intérêt majeur dans le cadre d'études s'intéressant aux cinétiques d'oxygénation musculaire chez des individus atteints d'une pathologie chronique (Grassi et Quaresima, 2016). En particulier, deoxy[heme] reflèterait les variations d'extraction de l'O_2 [Extraction O_2 = CaO_2 – CvO_2 / CaO_2] (Grassi et al., 2003) au niveau du tissu exploré. Ainsi, ce paramètre présente un intérêt majeur lorsque l'on souhaite étudier les capacités oxydatives musculaires. Il témoigne de l'équilibre dynamique entre l'apport d'O_2 et l'utilisation (VO_2) de l'O_2.

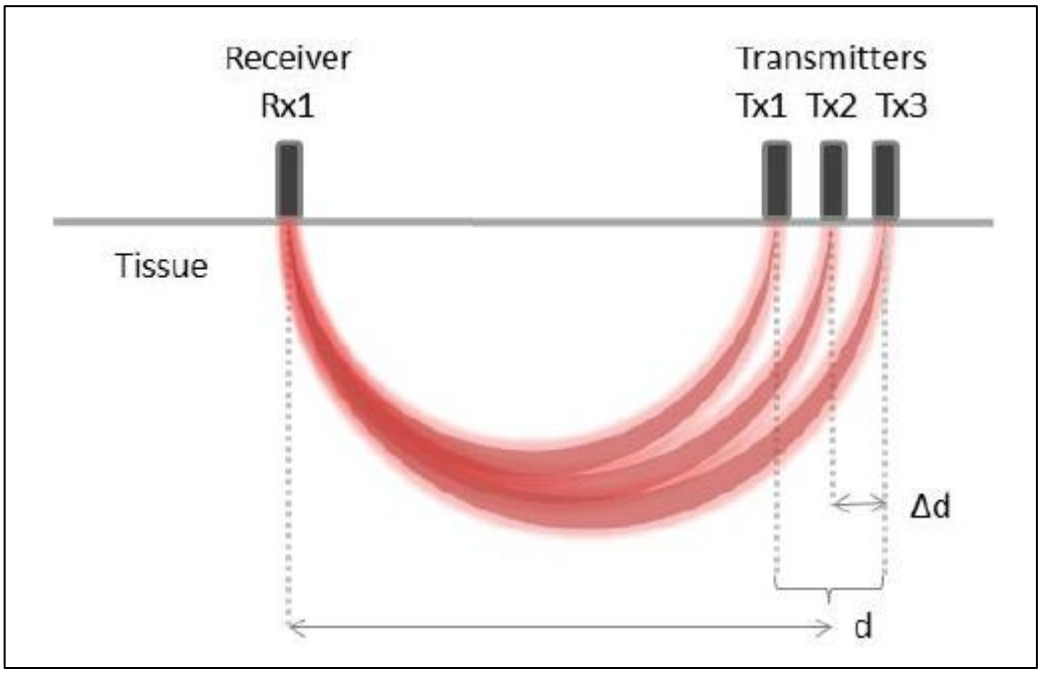


Figure 18 : Schéma du fonctionnement de la NIRS. La lumière émise par les émetteurs passe à travers le tissu, est partiellement absorbée, puis est recueillie par un photorécepteur. La distance d séparant les diodes du photorécepteur détermine la profondeur de pénétration de la lumière dans le tissu. En théorie, la profondeur de pénétration de la lumière équivaut à la moitié de la distance d. La présence de trois émetteurs permet d'obtenir un signal moyen sur trois mesures, garantissant une meilleure fiabilité de la mesure.

Les dispositifs NIRS sont constitués d'émetteurs (diodes) et d'un photorécepteur situé à quelques centimètres des émetteurs (Figure 18). La lumière traverse les tissus et est partiellement absorbée. En se basant sur la loi modifiée de Beer-Lambert, l'appareil est capable de mesurer les variations en concentration des molécules d'oxy[heme] et de deoxy[heme] (et par conséquent, de total[heme] et STO_2(%)). Il existe plusieurs types d'appareils NIRS : les appareils à émission continue, à intensité modulée dans le domaine fréquentiel ou temporel. Leur technologie est détaillée dans la revue de Barstow (2019). Actuellement, les NIRS à émission continue sont les plus commercialisés et les plus utilisés en raison de leur faible coût mais ne permettent pas de déterminer une quantité absolue en molécules présente dans les tissus explorés. En effet, ce type de NIRS ne permet d'étudier que les variations en concentration à partir d'une valeur de base (*baseline*) définie arbitrairement. Cette baseline peut-être définie à

partir d'une occlusion artérielle, d'une situation de repos ou d'exercice (Figure 21). D'autre part, quel que soit le type de NIRS utilisée, la présence de tissus superficiels entre le tissu exploré et le dispositif NIRS peut altérer significativement la qualité du signal. La profondeur de tissu mesurée par la NIRS serait égale à la moitié de la distance séparant les émetteurs du photorécepteurs (Homma et al., 1996) - soit 20mm si la distance émetteurs-photorécepteurs s'élève à 40mm (distance standard sur les dispositif de NIRS portables). Dans ces 20 mm, la lumière traverse systématiquement une couche de peau (estimée à 2 mm) et une couche de tissu adipeux d'épaisseur très variable suivant les sites de mesures. Inévitablement, le signal peut ainsi être affecté par la présence de mélanine (Zonios et al., 2001), le flux sanguin cutané (Koga et al., 2015) et le tissu adipeux (Murias, 2014 ; Craig et al., 2017). Toutefois, il semble que le signal deoxy[heme] soit faiblement impacté par la présence d'autres tissus puisque le tissu musculaire resterait le principal facteur de variation de ce paramètre (Koga et al., 2015). Le paramètre le plus approprié pour mesurer les cinétiques d'oxygénation musculaire reste cependant controversé (Quaresima et Ferrari, 2009 ; Murias, 2014 ; Koga et al., 2015).

En 2006, la commercialisation de la NIRS portable a facilité la réalisation d'études combinant une analyse des échanges gazeux pulmonaires (notamment VO_2) et des réponses hémodynamiques musculaires (deoxy[heme], oxy[heme], total[heme], STO_2(%)) au cours de l'effort. Lors d'un exercice d'intensité croissante, l'un des phénomènes les plus étudiés pour mesurer les cinétiques d'oxygénation musculaires est le plateau de deoxy[heme]. Au cours de l'effort, deoxy[heme] mesuré au niveau des muscles locomoteurs augmenterait avec l'intensité de l'exercice jusqu'à atteindre un plateau (Figure 19). L'intensité à partir de laquelle deoxy[heme] n'augmente plus en relation avec l'intensité de l'exercice est appelée « onset of

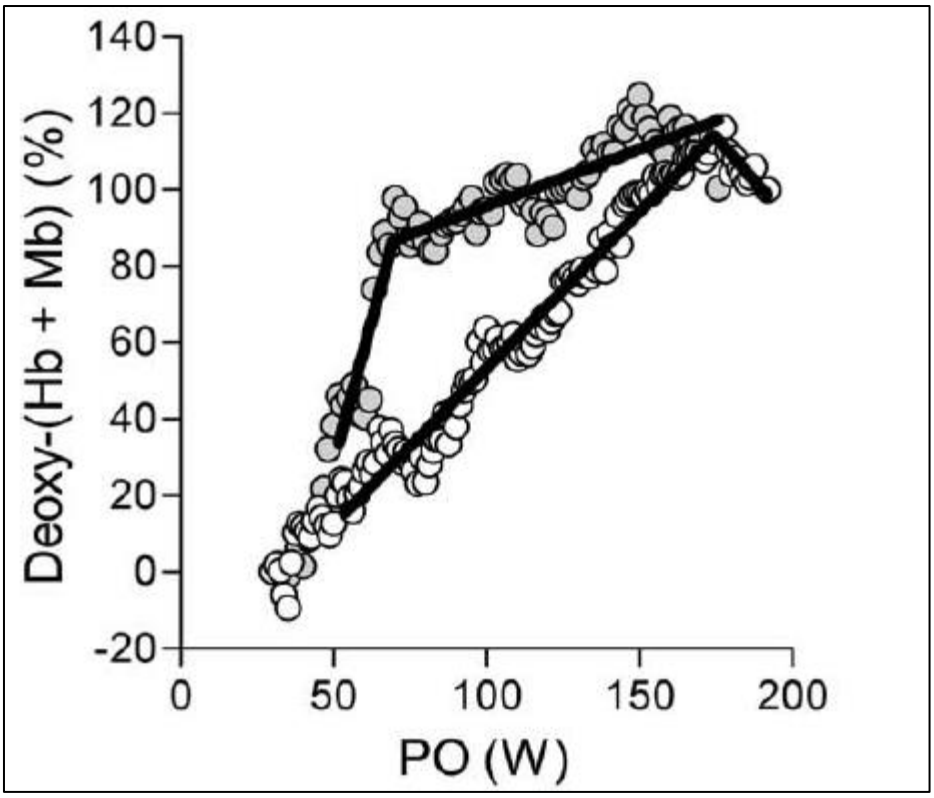


Figure 19 : Cinétiques de deoxy[heme] chez l'adulte sain (points blancs) vs. l'adulte en surpoids (points gris) lors d'un exercice incrémental de bicyclette ergométrique (extrait de l'article de Machado et al. (2017). La baseline est définie à partir de l'incrément initial. Les cinétiques de deoxy[heme] ont été exprimées en amplitude de réponse par rapport à la baseline.

accelerated deoxygenation » (Grassi et al., 1999), ou « breakpoint » (Moalla et al., 2005), exprimé en pourcentage de VO_{2peak} ou de la PMA.

Le breakpoint de la deoxy[heme] peut être considéré comme un témoin de l'aptitude oxydative fonctionnelle des muscles squelettiques (Grassi et Quaresima, 2016). Du point de vue méthodologique, il existe principalement deux modèles permettant de décrire la relation entre deoxy[heme] et intensité d'effort (Figure 20). Le premier modèle est le mode « bilinéaire », qui postule que deoxy[heme] augmente selon une relation linéaire avec l'intensité de l'effort jusqu'à un seuil critique où l'on atteindrait un plateau (Grassi et al., 1999). Ce modèle présente l'avantage de permettre d'identifier facilement le BPdeoxy[heme] : celui-ci correspond à l'intercept entre les deux droites de régression caractérisant la relation entre

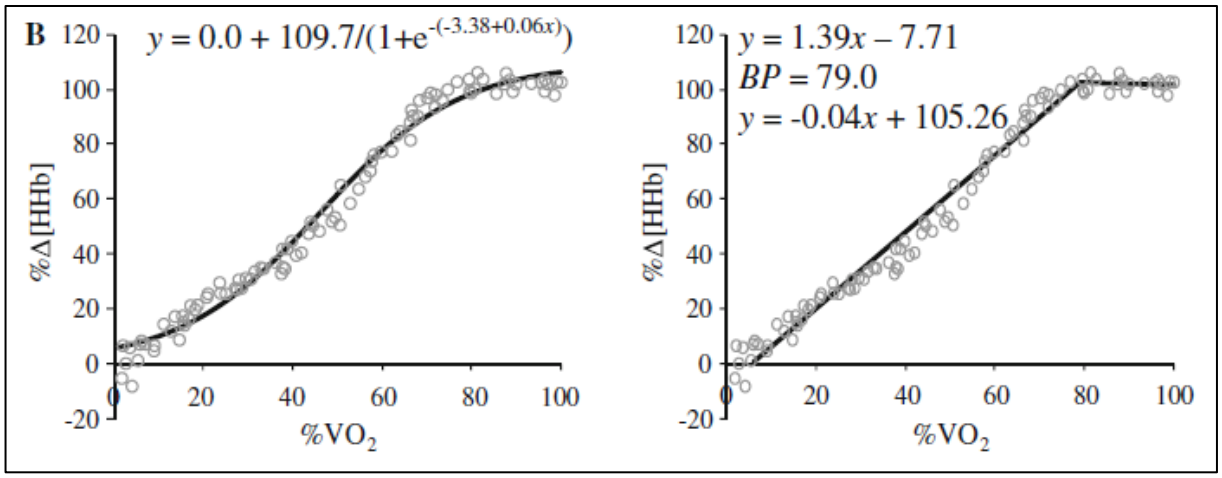


Figure 20 : Cinétiques de deoxy[heme] mesurées au niveau du vaste latéral lors d'un ramp test sur ergocycle mené jusqu'à épuisement (Spencer et al., 2012). Les données ont été modélisées selon un pattern sigmoïde sur la figure de gauche et selon un pattern bilinéaire sur la figure de droite.

intensité et deoxy[heme] (Figure 22). L'autre modèle est la fonction sigmoïde, qui reflèterait davantage la relation entre le débit sanguin et VO_2 au niveau de la microcirculation sanguine (Ferreira et al., 2007). Des travaux comparatifs ont abouti à la conclusion que la modélisation bilinéaire était plus appropriée dans ~85% des cas lorsqu'il s'agissait de déterminer le BPdeoxy[heme].

Le BPdeoxy[heme] est l'un des paramètres NIRS les plus utilisés pour étudier les réponses hémodynamiques musculaires (Grassi et al., 1999 ; Legrand et al., 2007 ; Ferreira et al., 2007 ; Boone et al., 2009 ; Spencer et al., 2012 ; Murias et al., 2013 ; McNarry et al., 2015 ; Vandekerckhove et al., 2016). Chez l'adulte, le BPdeoxy[heme] mesuré au niveau du vaste latéral serait positivement corrélé au VO_{2peak} (Boone et al., 2009) et au SV_2 (Fontana et al., 2015). Lors d'un protocole similaire chez l'enfant, Vandekerckhove et al. (2016) ont observé que le BPdeoxy[heme] était corrélé au SV_2 mais pas au VO_{2peak}. Ces observations supportent de précédentes conclusions selon lesquelles les facteurs musculaires déterminent davantage la performance maximale aérobie chez les adultes que chez les enfants (Ratel et al., 2015). Il est important de préciser que la plupart de ces études ont utilisé un protocole de bicyclette ergométrique. Ce type de protocole permet de limiter les secousses subies par le dispositif NIRS

garantissant des données de meilleure qualité. Toutefois, les résultats issus de ces études sont difficilement extrapolables à des exercices de marche ou de course à pied en raison de sollicitations musculaires différentes entre ces types d'exercices. Par exemple, nous avons vu dans la seconde partie du troisième chapitre de la revue de la littérature que le gastrocnémien était disproportionnellement activé chez un jeune en surpoids lors d'un exercice de marche avec inclinaison (Strutzenberger et al., 2017).

Deux études ont mesuré simultanément les cinétiques d'oxygénation du vaste latéral et du gastrocnémien lors d'un exercice incrémental maximal réalisé sur tapis roulant (Hiroyuki et al., 2002 ; Steimers et al., 2016). Ces travaux indiquent que lors d'un exercice de course, le muscle gastrocnémien désature dans une moindre mesure par rapport au vaste latéral (Hiroyuki et al., 2002 ; Steimers et al., 2016), tandis que l'inverse se produit lors d'un exercice de marche (Hiroyuki et al., 2002) (Figure 21). Ainsi, le pattern hémodynamique musculaire est étroitement lié à la modalité d'exercice (Hiroyuki et al., 2002).

Notons que ces observations concernent des intensités de marche sous-maximales effectuées sur une surface plane. Takagi et al. (2014) ont comparé les cinétiques d'oxygénation du gastrocnémien médial entre des enfants et des adultes lors d'un test maximal réalisé sur tapis roulant avec augmentation de la vitesse et de l'inclinaison. Ils observent que l'augmentation de deoxy[heme] est inférieure chez l'enfant par rapport à l'adulte. De plus, deoxy[heme] augmentait à partir d'intensités modérées chez l'adulte (~60% VO_{2peak}) tandis qu'il n'augmentait qu'aux intensités proche de VO_{2peak} chez l'enfant. Les auteurs concluent que les capacités d'extraction musculaires de l'O_2 de l'enfant sont moins développées que celles des adultes (Figure 22). Notons que ces auteurs n'ont pas mesuré le BPdeoxy[heme] alors que celui-ci se produisait manifestent chez les adultes.

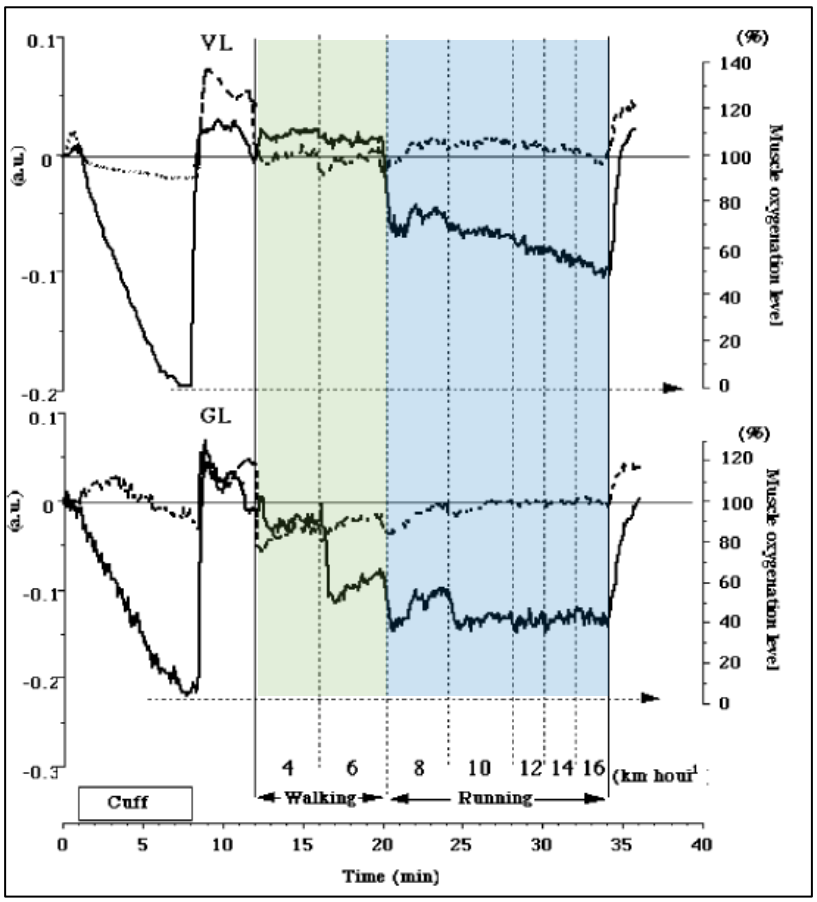


Figure 21 : Cinétiques de saturation en O2 du vaste latéral (VL) et du gastrocnémien (GL) lors d'un test de réactivité hyperémique post-occlusive ,puis lors d'un exercice incrémental de marche (4 et 6 km/h) et de course (8 à 16 km/h). Les données sont représentées en pourcentage de désaturation par rapport au niveau d'oxygénation mesuré au repos (100%) (Hiroyuki et al., 2002).

Récemment, ces mêmes auteurs ont réalisé une étude similaire en comparant cette fois-ci des adultes en surpoids et des adultes normo-pondérés. Les adultes en surpoids présentaient un niveau plus élevé de désaturation musculaire en O_2 (STO_2(%)) mais des niveaux inférieurs d'augmentation de deoxy[heme] et de total[heme] (Takagi et al., 2020). De plus, la capacité d'extraction de l'O_2 mesurée via l'amplitude de la réponse deoxy[heme] était significativement corrélé au VO_{2peak} pour les deux groupes. Ces résultats montrent que chez l'adulte, il existe une relation entre l'oxygénation du gastrocnémien et VO_{2peak} mesuré lors d'un test incrémental semblable aux protocoles utilisés pour mesurer VO_{2peak} chez le jeune en surpoids.

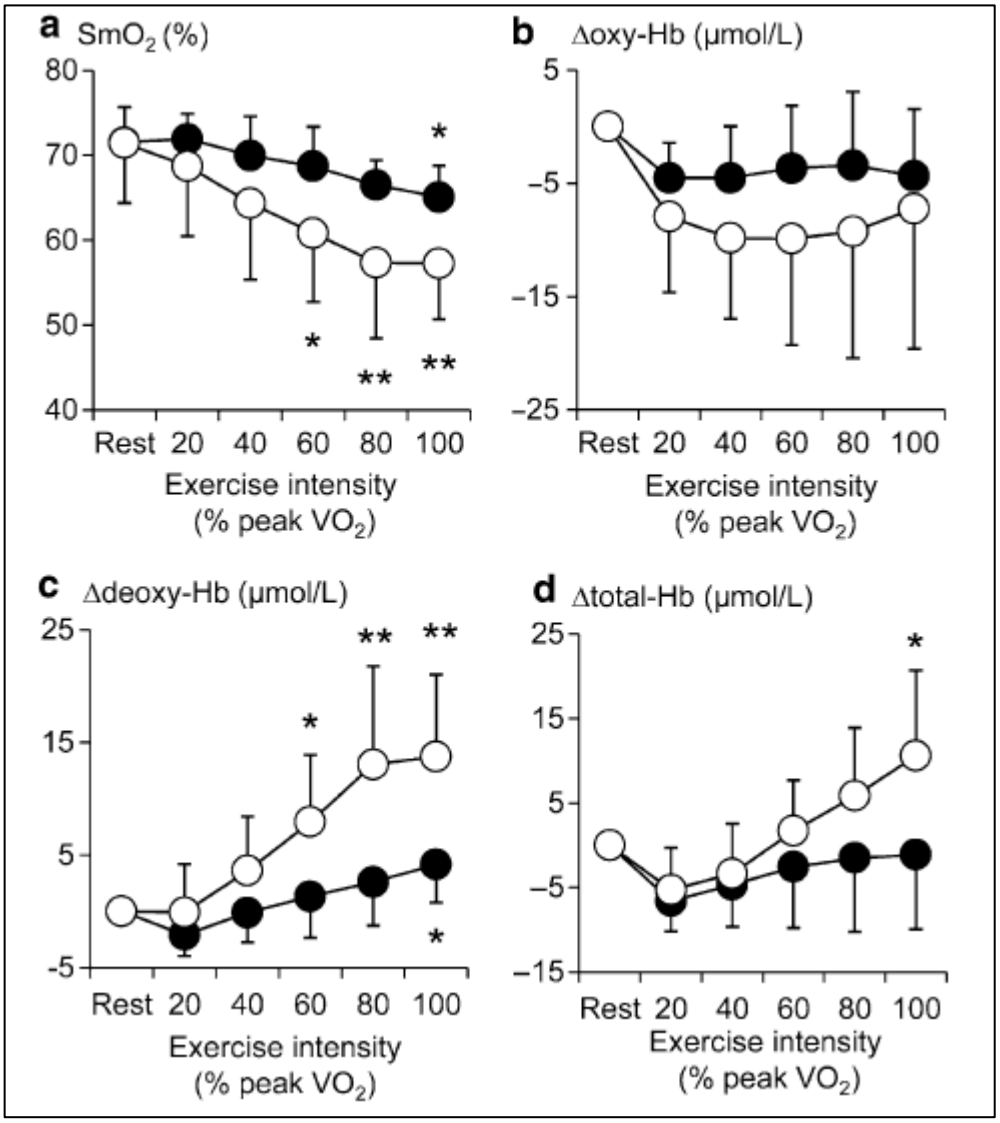


Figure 22 : Cinétiques de STO_2(%) (a), oxy[heme] (b), deoxy[heme] (c) et total[heme] (d). mesurées au niveau du gastrocnémien médial lors d'un test incrémental maximal effectué sur tapis roulant. Les cercles pleins correspondent aux enfants prépubères, tandis que les cercles vides correspondent aux hommes. Figures extraites de l'article de Takagi et al. (2014).

Enfin, les cinétiques d'oxygénation du vaste latéral ont été comparées lors du 20-MST entre des enfants et des adultes (Kume et al., 2018). Ces auteurs ont mesuré l'index d'oxygénation musculaire, correspondant à la différence entre oxy[heme] et deoxy[heme] (Grassi et al., 1999). Le seuil à partir duquel la diminution de la pente de cet index s'accentuait a été mesuré (équivalent à un « seuil de désoxygénation musculaire »). Les résultats indiquaient

que chez l'enfant, ce seuil se produirait à un pourcentage plus élevé de la vitesse maximale atteinte lors du 20-MST par rapport à l'adulte.

iv. Apports de la NIRS chez l'individu en surpoids

Chez le jeune en surpoids, une seule étude a mesuré les réponses hémodynamiques musculaires au cours d'un exercice (Julian et al., 2016). Dans cette étude, les participants ont réalisé un exercice de pédalage sur ergocycle à 70% de VO_{2peak} pendant 40 minutes durant lequel les cinétiques d'oxygénation du vaste latéral ont été mesurées. Cette étude montre qu'une prise en charge multidisciplinaire incluant un entraînement aérobie permet d'améliorer les adaptations hémodynamiques à l'exercice chez le jeune en surpoids. De plus, l'évaluation de l'épaisseur des tissus sous-cutanés par absorptiométrie biphotonique à rayons X (méthode de référence pour l'évaluation de la composition corporelle) a permis aux auteurs de démontrer la faisabilité de la NIRS au niveau des membres inférieurs chez un adolescent en surpoids. Chez l'adulte, Soares et Murias (2018) ont reporté une moindre réactivité vasculaire au niveau du quadriceps chez les individus en surpoids en comparaison avec des individus de poids normal, mais ces résultats restent limités par l'impossibilité de discerner les effets du surpoids de ceux de l'activité physique.

La NIRS peut potentiellement contribuer à éclairer les relations entre fatigabilité neuromusculaire et performance aérobie. Lors d'un exercice incrémental de pédalage, plusieurs travaux indiquent que le plateau de la deoxy[heme] musculaire se produit peu avant (Osawa et al., 2011 ; Racinais et al., 2014) ou après (Boone et al., 2015) le seuil EMG, lui-même se produisant avant le SV_2. Celui-ci correspond à l'intensité à partir de laquelle le niveau d'activation musculaire augmente disproportionnellement par rapport à l'intensité d'exercice. Il semblerait ainsi que lorsque BPdeoxy[heme] se produit au sein d'un groupe musculaire,

l'individu atteint les limites du métabolisme aérobie de ce groupe musculaire. Cela signifie que l'individu ne sera plus en capacité de poursuivre l'effort via les processus aérobie si l'intensité continue d'augmenter. Chez un individu peu entraîné (tel que les individus présentant une obésité commune) et plus mature, ce mécanisme semble se produire plus précocement (Takagi et al. (2014) ; Boone et al., 2016). Ceci pourrait justifier que les limitations musculaires lors d'un test d'aptitude aérobie soient davantage impliquées chez l'adulte et chez le jeune en surpoids que chez l'enfant. La caractérisation du BPdeoxy[heme] lors de plusieurs types de protocoles de marche ou de course à pied pourrait ainsi permettre d'objectiver l'existence de limitations musculaires lors d'un test d'aptitude aérobie, en particulier lors les critères de validation d'atteinte de VO_{2max} ne sont pas atteints.

2. Objectifs & hypothèses

Le principal objectif de notre seconde étude était de caractériser le profil de la deoxy[heme] du gastrocnémien lors d'un exercice incrémental de marche chez des jeunes en surpoids, en comparant les individus ayant validé les critères d'atteinte de VO_{2max} et les individus ne les ayant pas validé. Notre hypothèse était que les individus n'atteignant pas les critères de validation d'atteinte de VO_{2max} présenteraient un BPdeoxy[heme] précoce et que le délai d'apparition du BPdeoxy[heme] serait corrélé avec la durée de l'exercice.

3. Matériel et méthode

26 jeunes en surpoids participant à un programme hospitalier pluridisciplinaire pour l'obésité pédiatrique ont été inclus dans cette étude. Les critères d'inclusion étaient un âge compris entre 9 et 15 ans et un IMC >85ème centile des courbes IOTF, définissant le surpoids

de grade I chez l'enfant (Cole et Lobstein, 2012). Le protocole de l'étude fut approuvé par le Comité d'Ethique pour la Recherche en STAPS (n°2020-11-02-44).

i. Procédure expérimentale

Les expérimentations se sont déroulées sur le plateau technique du centre hospitalier de Zuydcoote. Les participants ont été convoqués entre 9 et 12 heures ou entre 15 et 19 heures et il leur était demander d'alléger leur prise alimentaire avant l'effort afin d'éviter l'inconfort digestif au cours du test. Les parents devaient s'assurer que leurs enfants ne pratiquaient pas d'exercices intenses pendant les 48 heures précédant le jour du test. Avant les expérimentations, la taille des participants a été mesurée en position debout puis assise (mesures requises pour l'estimation de l'âge du pic de croissance statural) à l'aide d'une toise, puis pesés à l'aide d'une balance à impédancemètre (TANITA DC-360, Japon), qui permet d'obtenir une estimation de la composition corporelle en deux compartiments (masse grasse, masse maigre). Ces informations nous ont permis de calculer leur z-score d'IMC à partir des normes IOTF (Cole et Lobstein, 2012) et OMS (de Onis et al., 2007) et leur pic de croissance statural, reflet de la maturation (Mirwald et al., 2002).

ii. Exercice incrémental

Dans le cadre de leur suivi, les participants ont effectué un test de marche sur tapis roulant jusqu'à épuisement. L'échauffement durait au minimum trois minutes et consistait à marcher à allure constante entre 3.0 et 4.5 $km.h^{-1}$, jusqu'à ce que leur fréquence cardiaque se stabilise à 60±5% de leur valeur maximale théorique estimée à partir de la formule de Tanaka et al. (2001) [FC_{max} = 208 - 0.7 * âge]. Cette procédure avait pour objectif de normaliser l'intensité relative de départ pour l'ensemble des participants. Puis, la pente était augmentée de 2% à chaque minute jusqu'à ce que celle-ci atteigne 10% à la $5^{ème}$ minute. A partir de la $5^{ème}$

minute, la pente était maintenue constante à 10% et la vitesse était augmentée de 0.3 ou 0.4 km/h.$^{-1}$ par minute selon que le participant ait commencé à une vitesse inférieure ou supérieure ou égale à 3.7 km.h^{-1}. Le test s'achevait lorsque le participant déclarait ne plus être en mesure de poursuivre le test malgré les encouragements. Nous avons choisi ce protocole parce qu'il a été observé que lors d'un test réalisé sur tapis roulant, une incrémentation basée à la fois sur l'augmentation de la vitesse et de la pente permet d'atteindre des VO_2 plus élevées que lors d'un test employant seulement l'un de ces deux modes d'incrémentation (Lukaski et al., 1989).

iii. Constitution des groupes

Pour l'analyse des données, notre échantillon a été divisé selon les critères suivants : atteinte des critères de validation de VO_{2max} (VO_{2max} ; non-VO_{2max}). Nous avons considéré que les participants avaient atteint un plateau de VO_2 lorsque l'augmentation de VO_2 à la dernière minute du test était inférieure à 50% de l'augmentation de VO_2 observable à l'avant-dernière minute du test. Cette méthodologie a déjà été utilisée chez l'adulte obèse (Wood et al., 2010) et se base sur la relation individuelle entre VO_2 et l'intensité de l'effort, une méthode recommandée pour identifier les plateaux de VO_2 (Midgley et al., 2007).

Afin de renforcer nos analyses, nous avons également mesuré l'atteinte des critères secondaires de validation d'atteinte de VO_{2max} basés sur l'atteinte d'une fréquence cardiaque >200 bpm et d'un quotient respiratoire >1.0. Toutefois, notre étude s'intéressant spécifiquement aux mécanismes physiologiques associés à l'arrêt prématuré d'un test d'aptitude aérobie, nous avons exclus de notre analyse les participants ayant abandonné le test avant d'avoir fourni un effort cardiorespiratoire significatif (analyse *per* protocole). Les participants exclus incluaient notamment ceux qui ont abandonné le test durant la phase d'échauffement où pour un motif n'ayant par de lien direct avec l'objet de notre étude (ex : angoisse liée au port du masque, difficulté à utiliser le tapis roulant). L'objectif était de limiter l'impact de la motivation sur nos

résultats. Enfin, le nombre de participants ayant atteint leur VO_{2max} a été relevé. Il était considéré que VO_{2max} était atteint lorsqu'au moins deux des trois critères physiologiques était atteint (plateau de VO_2 ; fréquence cardiaque > 200 bpm ; quotient respiratoire > 1.0).

iv. Recueil des données

Les données respiratoires (VO_2, VCO_2, VE) ont été collectées cycle-à-cycle à l'aide du Cosmed K4b². La fréquence cardiaque a été mesurée en continu à l'aide d'un cardiofréquencemètre optique (Polar OH1, Finlande) positionné au poignet gauche. Ce dernier fournit des données très proches des données obtenues via un cardiofréquencemètre placé au niveau thoracique (Hermand et al., 2019). Les cinétiques d'oxygénation musculaire ont été mesurées grâce à un dispositif de NIRS portable (Portamon, Artinis, USA), validé lors d'un exercice de course à pied (Jones et al., 2013).

v. Traitement des données de consommation en oxygène et musculaires

Les données de VO_2 ont été rééchantillonnées pour obtenir un échantillon tous les 5% de la durée d'exercice totale, de 0% (baseline recueillie en fin d'échauffement) jusqu'à 100% (valeur de fin de test). Cela représentait ainsi un total de 21 échantillons par participant. Cette procédure d'harmonisation permet d'effectuer des comparaisons interindividuelles malgré des durées de test différentes. La plus haute valeur de VO_2 mesurée lors du test, VO_{2peak}, était la plus haute valeur observée sur une moyenne-mobile de 30 secondes, tel que cela a été récemment recommandé chez l'enfant (Blanchard et al., 2019). Le terme "VO_{2peak}" fut utilisé au lieu du terme "VO_{2max}" car tous les participants n'ont pas atteint au moins 2 critères de validation d'atteinte de VO_{2max} au cours de l'étude. Cependant, tous les participants ont au moins atteint un critère de validation d'atteinte de VO_{2max}. Le VO_{2peak} fut reporté en valeur absolue ($VO_{2peakABS}$), rapporté à la masse corporelle – *body mass* ($VO_{2peakBM}$), puis à la masse

maigre – *fat-free mass* ($VO_{2peakFFM}$ in $ml.kgFFM^{-1}.min^{-1}$). Les pics de VE rapporté à la masse maigre (VE_{peakBM}), d'équivalents ventilatoires (VE/VO_{2peak}, VE/VCO_{2peak}) et de quotient respiratoire (RER_{peak}) ont été également étudiés. Le pic de fréquence cardiaque – maximal *heart rate* (FC_{peak}) était la plus haute valeur enregistrée sur une moyenne-mobile de 3 points tout au long du test.

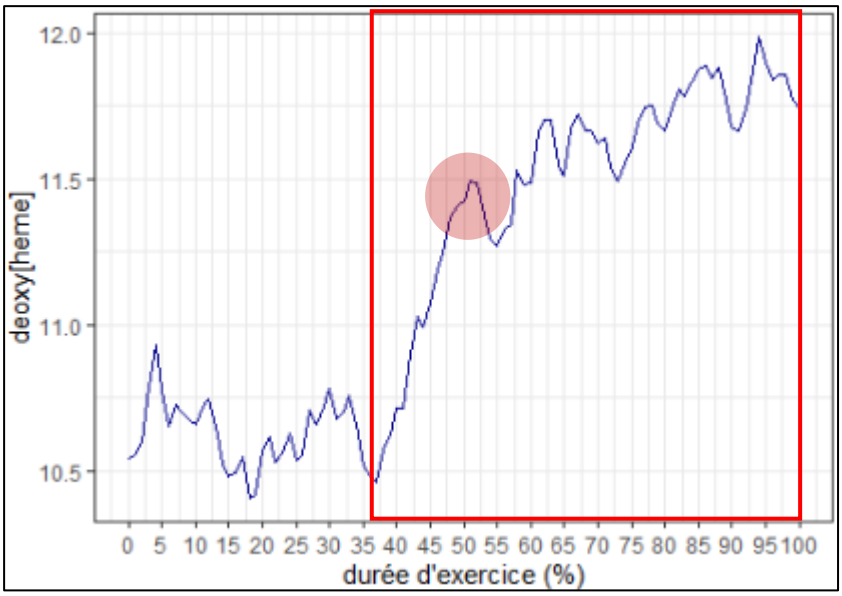


Figure 23 : Cinétiques de deoxy[heme] chez un participant présentant manifestement un BPdeoxy[heme]. Sur la base d'une inspection visuelle, la portion de signal à analyser pourrait démarrer à 37% de la durée d'exercice (intervalle rouge). BPdeoxy[heme] semble se situer à ~50% de la durée totale d'exercice. Afin de déterminer le point exact où le ralentissement de deoxy[heme] est le plus marqué, des régressions bilinéaires devraient être réalisées sur la portion de signal à analyser (intervalle 37 à 100%) en testant différents points situés dans la zone d'intérêt (cercle rouge) – par exemple, entre 45 et 55%.

Les données d'oxygénation musculaire ont été lissées sur un intervalle d'une seconde. L'amplitude maximale de la réponse en deoxy[heme] (Δ Deoxy[heme]) fut calculé et exprimé en pourcentage de la baseline à partir du calcul suivant :

$$\Delta\, Deoxy[heme] = 100 * \frac{deoxy[heme](max) - deoxy[heme](baseline)}{deoxy[heme](baseline)}$$

L'intensité relative à laquelle le plateau de deoxy[heme] ($BP_{deoxy[heme]}$) se produisait était déterminée en plusieurs étapes (Figure 23) :

- La première consistait à identifier les portions de courbes constantes obtenues durant l'exercice afin de définir la portion du signal à analyser. Cette portion du signal démarrait, selon les participants, entre 0 et 50% de la durée totale de l'exercice ;
- La seconde étape consistait à déterminer visuellement si un ralentissement des cinétiques de deoxy[heme] se produisait au cours de l'exercice. Lorsque le signal manifestait une absence de variation ou une accentuation de l'augmentation de deoxy[heme] au cours de l'exercice, il était considéré que le $BP_{deoxy[heme]}$ ne s'était pas produit lors du test. Cette étape nous paraissait nécessaire afin d'éviter les erreurs d'interprétation liées aux modélisations, ces dernières aboutissant parfois à des conclusions peu signifiantes du point de vue physiologique.

Lorsqu'un BPdeoxy[heme] était détecté, le choix des deux portions de courbes permettant de décrire de manière optimale les cinétiques de deoxy[heme] était effectué grâce à un programme rédigé sur le logiciel R (version 3.6.2). Ce programme simulait toutes les modélisations bilinéaires réalisables sur un ensemble de points à définir, et déterminait quelle était la combinaison de modèles décrivant le signal de manière optimale. Pour cela, le programme additionnait les sommes des résidus au carrés des deux modèles à chaque simulation et à la fin du programme, nous indiquait à quel pourcentage de la durée d'exercice la somme des résidus au carré était minimale. Cette durée d'exercice correspondait au moment où le ralentissement de cinétique de deoxy[heme] était le plus marquant, et fut désigné comme le point d'apparition du $BP_{deoxy[heme]}$. Ce dernier était exprimé ainsi en pourcentage du temps d'exercice et en pourcentage de VO_{2peak} (il suffisait de récupérer VO_2 mesurée à ce moment de l'exercice).

vi. Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel R (version 3.6.2). La normalité et l'homogénéité des distributions ont été vérifiées, respectivement, avec le test de Shapiro-Wilk et le test F de Snedecor. Les caractéristiques cliniques et les données d'exercice (y compris BPdeoxy[heme]) ont été comparées à l'aide de tests *t* de Student entre les filles et les garçons (les distributions respectaient les critères permettant de pratiquer les tests paramétriques). Des tests de corrélation de Pearson ont été utilisés pour étudier la relation entre 1) le timing relatif où la BPdeoxy[heme] a été mesuré et la durée de l'exercice et 2) la BPdeoxy[heme] (%VO_{2peak}) et VO_{2peak}. Le seuil de significativité a été fixé à $p < 0,05$.

4. Résultats

Les caractéristiques des participants et les données d'exercice par sous-groupes (critères VO_{2max} atteints vs. non atteints) sont présentées dans le Tableau 9. L'atteinte des critères primaires et secondaires de vérification de VO_{2max} est représentée dans le Tableau 10. Un plateau de VO_2 a été atteint par 11 participants et 2 participants ont atteint les critères secondaires de vérification de VO_{2max} utilisés dans cette étude, dont un a atteint un plateau de VO_2. Ainsi, 12 participants (46%) sont considérés comme ayant atteint VO_{2max} selon ces critères. Le test sur tapis roulant a duré 630 ± 160 secondes (~10 min), entre 321 et 951 secondes (~ 5 et 16 minutes).

Les cinétiques hémodynamiques musculaires au cours de l'exercice (deoxy[heme], STO_2(%), [heme] total et oxy[heme]) sont présentées dans la Figure 24. Un BPdeoxy[heme] était détectable 25 des 26 participants. Il s'est produit à 77±9 %VO_{2peak} et à 50±16 % du temps d'exercice. L'amplitude moyenne de la réponse de la deoxy[heme] était de 32±15%. Il n'y avait pas de différence significative dans aucun de ces paramètres ($p>0.46$) entre le groupe VO_{2max} et non-VO_{2max}.

Le timing du BPdeoxy[heme], exprimé en secondes, était corrélé avec la durée totale de l'exercice (r = 0.64, p <0.001). Cependant, aucune relation entre le BPdeoxy[heme] et VO_{2peak} n'a été trouvée. De plus, il n'y avait pas de relation temporelle entre la BPdeoxy[heme] et le timing auquel le changement d'incrémentation du protocole s'est produit (p>0.60).

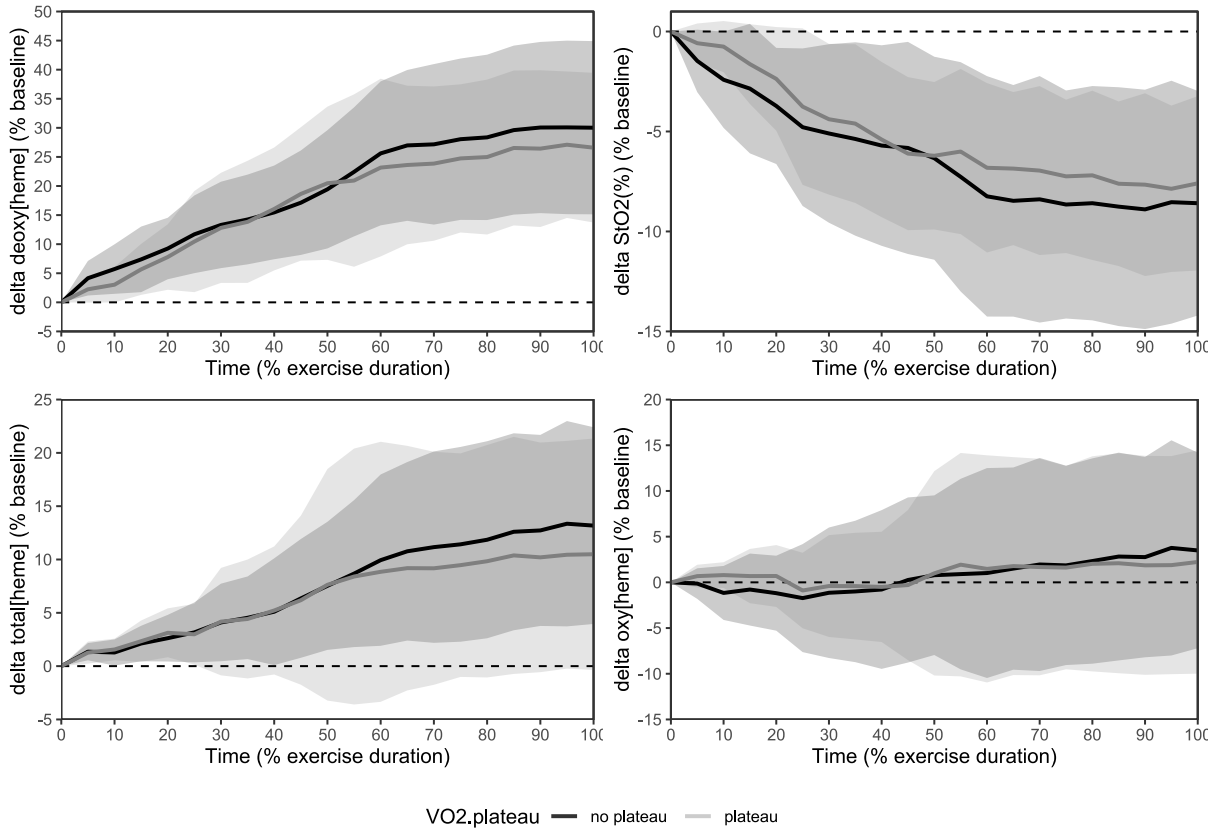


Figure 24 : Cinétiques de deoxy[heme] (en haut à gauche), STO_2(%) (en haut à droite), total[heme] (en bas à gauche) et oxy[heme] (en bas à droite) chez le groupe VO2 plateau (noir) et le groupe non-VO_2 plateau (gris). Les données sont exprimées en pourcentage moyen de variation par rapport à la baseline ± l'écart type.

Tableau 9 : Caractéristiques cliniques et données maximales d'exercice au sein des groupes VO_{2max} et non-VO_{2max}.

	VO_{2max} 7 filles ; 5 garçons	non-VO_{2max} 6 filles ; 8 garçons
Age (ans)	11.2 ± 1.8	12.0 ± 1.6
Maturation (années du PHV)	-0.8 ± 1.9	-0.5 ± 1.6
Taille (cm)	151 ± 13	154 ± 10
Masse (kg)	65.8 ± 22	64.2 ± 17
%FM	36.1 ± 8	34.2 ± 8
z-score IMC IOTF (SD)	2.6 ± 0.6	2.2 ± 0.7*
Durée d'exercice (secondes)	623 ± 171	635 ± 155
$VO_{2peak/BM}$ ($ml.min^{-1}.kg^{-1}$)	29.5 ± 7.3	29.7 ± 5.6
$VO_{2peak/FFM}$ ($ml.kgFFM^{-1}.min^{-1}$)	45.9 ± 6.9	45.3 ± 7.4
RER_{peak}	1.07 ± 0.2	1.09 ± 0.1
FC_{peak} (bpm)	186 ± 12	182 ± 16
FC_{peak} (% $FC_{peaktheo}$)	93 ± 6	91 ± 8
$BP_{deoxy[heme]}$ (%VO_{2peak})	76 ± 9 (n=11)	77 ± 10 (n=14)
$BP_{deoxy[heme]}$ (% durée d'exercice)	53 ± 13 (n=11)	49 ± 19 (n=14)
Δ Deoxy[heme] (% baseline)	30 ± 18	35 ± 12

Abbreviations : PHV = peak height velocity ; SD = standard deviations ; VO_{2peak} = consommation maximale en oxygène ; BM = masse corporelle ; FFM = masse maigre ; FM = masse grasse ; RER = rapport des échanges respiratoires ; FC = fréquence cardiaque ; BP = breakpoint

Tableau 10 : Nombre de participants ayant atteint les critères de validation d'atteinte de VO2max. L'épuisement maximal était achevé par l'ensemble des participants, celui-ci étant un critère d'inclusion pour cette étude. Les lignes en gras représentent correspondent à l'atteinte de VO2max (au moins 2 critères).

Critère VO_{2peak}	Nombre de participants	Proportion de participants
VO_2 plateau	**11/26**	**42%**
FC>95% $FC_{maxtheo}$	3/26	12%
RER>1.0	15/26	58%
FC>95% + RER>1.0	**2/26**	**8%**
VO_{2max} atteint	**12/26**	**46%**

5. Discussion

À notre connaissance, cette étude est la première à examiner les cinétiques de deoxy[heme] musculaire pendant un test incrémental chez des jeunes en surpoids en utilisant la spectroscopie du proche infrarouge. La littérature pédiatrique actuelle suggère qu'une minorité de jeunes en surpoids est capable d'atteindre VO_{2max} pendant un test incrémental, que ce soit en utilisant un protocole de cyclisme (Bhammar et al., 2017) ou de marche sur tapis roulant (Gutin et al., 2002 ; Marinov et al., 2003 ; Breithaupt et al., 2012). Alors que des limitations d'origine périphérique semblent être impliquées lors d'efforts aérobies de haute intensité chez les jeunes en surpoids (Ratel et al., 2006), aucune étude n'a encore mesuré les variations de la deoxy[heme] musculaire en utilisant ce type de protocole. Ainsi, l'objectif principal de cette étude était de caractériser les breakpoints dans la deoxy[heme] musculaire du gastrocnémien afin de déterminer si ces breakpoints pouvaient être liés à l'incapacité de poursuivre un test de marche incrémental sur tapis roulant chez les jeunes en surpoids.

Pour évaluer l'équilibre entre l'apport et la capacité d'utilisation de l'oxygène, le point d'inflexion de la deoxy[heme] (BPdeoxy[heme]) est une méthode valide et reproductible (Grassi et al., 1999 ; Boone et al., 2009 ; Ianetta et al., 2017). Le BPdeoxy[heme] représenterait une transition à partir de laquelle survient un déséquilibre entre la demande énergétique et le niveau d'extraction de l'O_2 dans le tissu exploré. Lors d'un test incrémental de cyclisme, il a été supposé que le BPdeoxy[heme] était dû au plafonnement de la capacité musculaire d'extraction de l'O_2 (Boone et al., 2015). Cependant, une autre étude a montré l'existence d'une "réserve" d'extraction d'O_2 (Inglis et al., 2017), suggérant que l'apport plutôt que l'extraction d'O_2 provoquait l'atteinte d'un plateau de deoxy[heme]. Selon cette dernière hypothèse, ce phénomène pourrait résulter d'un besoin atténué d'augmenter l'extraction fractionnelle d'O_2 jusqu'à la fin du test, en raison d'un surplus local de flux sanguin. Ce mécanisme soutiendrait de précédentes hypothèses selon laquelle la redistribution du flux sanguin vers les tissus actifs

– et non le plafonnement des capacités d'extraction d'O_2 des muscles - provoque un plateau local de l'extraction d'O_2 (Inglis et al., 2017). Dans le vaste latéral pendant un exercice de cyclisme, cet événement se produirait à des intensités proches de l'état d'équilibre maximal du lactate et du point de compensation respiratoire (RCP) (Boone et al., 2016 ; Vandekerckhove et al., 2016 ; Keir et al., 2015), auxquelles l'accumulation de métabolites déclenchent la libération de composés vasodilatateurs tels que l'ATP, [La] et l'oxyde nitrique (Keir et al., 2015). Cependant, comme notre protocole n'était pas approprié pour détecter le RCP, nous n'avons pas réussi aus détecter dans la présente étude.

La nouvelle découverte de cette étude est que chez les jeunes en surpoids effectuant un test incrémental sur tapis roulant, un breakpoint dans la deoxy[heme] du gastrocnémien se produit à ~75-80% VO_{2peak}, comme cela a été précédemment trouvé dans le vaste latéral (Grassi et al., 1999 ; Boone et al., 2009 ; Ianetta et al., 2017) et d'autres muscles du quadriceps (Chin et al., 2011). Par ailleurs, les cinétiques de la deoxy[heme] au niveau du gastrocnémien lors de notre protocole de marche sont similaires aux cinétiques observées dans le vaste latéral. Ainsi, le mécanisme par lequel l'organisme procèderait à une redistribution du flux sanguin vers les muscles actifs à partir d'une certaine intensité pourrait se produire également dans le gastrocnémien lors d'un protocole incrémental de marche. Aussi, il est intéressant de noter que les breakpoints se sont produits à des intensités plus faibles (~75-80%VO_{2peak}) que ceux trouvés dans le vaste latéral pendant l'exercice de cyclisme chez les jeunes sans obésité (~90%VO_{2peak}) (Vandekerckhove et al., 2016). Ceci indiquerait une meilleure correspondance entre l'apport et l'utilisation de l'O_2 dans le gastrocnémien pendant la marche que dans le vaste latéral pendant le cyclisme. Puisque le pattern de deoxy[heme] semble étroitement proportionnel au niveau d'activation musculaire (Chin et al., 2011), il est possible que le gastrocnémien ait été activé dans une moindre mesure dans notre protocole de tapis roulant, que le vaste latéral dans le protocole de cyclisme de Vandekerchkove et al. Comme suggéré par ces auteurs, cela pourrait

être dû au fait que le gastrocnémien contient plus de fibres à contraction lente que le vaste latéral (Chin et al., 2011). Malheureusement, notre interprétation reste limitée par l'absence de mesures NIRS concomitantes au niveau du vaste latéral pendant notre protocole, ainsi que par le manque de données EMG pendant le test. De plus, aucune occlusion du flux sanguin n'ayant été réalisée, il n'est pas possible à partir des présents résultats de vérifier si la capacité maximale d'extraction d'O_2 a été atteinte ou non au cours du test.

L'objectif secondaire de cette étude était de comparer le profil de deoxy[heme] entre ceux qui atteignent un plateau de VO_2 et/ou les critères de seuil secondaire pour vérifier VO_{2max} (c'est-à-dire FC>95% FCmax théorique et un RER>1.0), et ceux ne les atteignant pas. La littérature pédiatrique actuelle suggère que les jeunes en surpoids n'atteignent pas VO_{2max} lors d'un test incrémental (Gutin et al., 2002 ; Marinov et al., 2003 ; Breithaupt et al., 2012; Bhammar et al., 2017), il est donc pertinent de suspecter que des limitations périphériques plutôt que centrales se produisent lors de ces tests dans cette population. Nos résultats n'ont révélé aucune différence concernant le BPdeoxy[heme] entre ceux qui ont atteint les critères de vérification de VO_{2max} et ceux qui ne les ayant pas atteint, ce qui suggère que l'équilibre entre apport et l'utilisation musculaire de l'O_2 déterminait davantage la performance à notre test sur tapis roulant que l'atteinte d'un plateau VO_2 ou des critères de seuil pour vérifier VO_{2max}. Cependant, nous ne sommes pas en mesure de déterminer si la présence d'un BPdeoxy[heme] était en lien avec la non-atteinte de VO_{2max} pendant le test car les critères utilisés dans cette étude ne sont pas appropriés pour vérifier VO_{2max} (Midgley et al., 2009 ; Bhammar et al., 207 ; Poole et al., 2007 ; Sansum et al., 2019). Pour le vérifier, d'autres études pourraient comparer la BPdeoxy[heme] entre les participants qui atteignent VO_{2max} et ceux qui ne vérifient pas VO_{2max} en utilisant un test supramaximal comme cela a été récemment recommandé chez les jeunes (Bhammar et al., 2017).

Il y a deux raisons principales pour lesquelles nous avons décidé d'utiliser les muscles du mollet comme site de mesure. La première raison vient du rationnel scientifique selon lequel les muscles du mollet sont plus impliqués que les muscles de la cuisse pendant les exercices de marche (Hiroyuki et al., 2002). La seconde raison est méthodologique : le pli cutané est ~25% plus bas dans le mollet que dans la cuisse chez les jeunes (Jurimaë et al., 2003), permettant au signal de pénétrer plus facilement dans le tissu musculaire. De plus, la NIRS a déjà été utilisée pour mesurer les adaptations hémodynamiques des muscles des jambes à un exercice prolongé de cyclisme d'intensité modérée chez des adolescents obèses, dont le pli cutané était en moyenne de ~13mm au niveau du quadriceps. Cette étude a montré qu'un programme d'entraînement de 3 mois était associé à une amélioration des réponses hémodynamiques microvasculaires lors d'un exercice sous-maximal prolongé. Ainsi, nous estimons que la lumière a pénétré efficacement le tissu musculaire pendant les expériences et que les données NIRS présentées reflètent principalement les cinétiques hémodynamiques musculaires

Notre étude présente des limites. Tout d'abord, les résultats présentés ne s'appliquent qu'aux tests de marche sur tapis roulant au cours desquels la vitesse et la pente augmentent. Le BPdeoxy[heme] du muscle du mollet pourrait se produire à des intensités différentes pendant d'autres types de protocoles de marche ou de course utilisés chez les jeunes en surpoids, comme le test de course-navette de 20 m ou le test Spartacus récemment validé. Deuxièmement, le BPdeoxy[heme] permet de caractériser l'atteinte d'une intensité critique à laquelle le métabolisme aérobie n'est plus en mesure de répondre à la demande énergétique au sein du tissu musculaire. En effet, pour déterminer si la capacité maximale d'extraction d'O_2 a été atteinte au cours du test, nous aurions pu réaliser une occlusion du flux sanguin juste après la fin du test. La principale force de cette étude est l'utilisation de la NIRS chez les jeunes en surpoids, qui est sous-évaluée, et la combinaison d'une mesure locale (NIRS) et globale (calorimétrie indirecte) du métabolisme. Les données actuelles apportent un nouvel éclairage sur les réponses

musculosquelettiques à un test incrémental sur tapis roulant chez les jeunes en surpoids et offrent de nouvelles perspectives sur les facteurs déterminant la performance aérobie dans cette population.

6. Conclusion

Au cours d'un test de marche incrémental sur tapis roulant, un plateau de deoxy[heme] s'est produit chez 25 des 26 jeunes en surpoids à ~75-80%VO_{2peak} et à une intensité comparable entre ceux qui ont atteint un plateau VO_2 et ceux qui ne l'ont pas atteint. Ainsi, un plafonnement du niveau d'extraction de l'O_2 se produit lors d'un test de marche sur tapis roulant chez les jeunes en surpoids, ce qui peut expliquer en partie leur difficulté à poursuivre le test indépendamment des réponses physiologiques mesurées à l'étage cardiorespiratoire.

Nos résultats indiquent que le niveau d'extraction de l'O_2 atteint un plateau au niveau du gastrocnémien à partir d'une intensité proche de 75-80% VO_{2peak} lors d'un test incrémental sur tapis roulant chez le jeune en surpoids. Cet évènement suppose que des limitations périphériques pourraient empêcher la poursuite de l'effort lors de ce type de protocole chez le jeune en surpoids. Cependant, en raison du faible effectif, nous n'avons pu déterminer si l'atteinte de VO_{2max} était influencée par le sexe, la maturation ou le degré d'obésité.

Les individus atteints de pathologies chroniques présentent davantage de difficulté à réaliser un effort maximal lors d'un test progressif mené jusqu'à l'épuisement (Poole et Jones, 2017). Lors d'un test sur tapis roulant, il peut être supposé que la nécessité de supporter le poids accentue ces difficultés chez un individu en surpoids. Pourtant, chez l'enfant ou l'adolescent, aucune étude n'indique clairement si les caractéristiques individuelles ont un impact sur la probabilité d'atteindre VO_{2max} lors d'un test effectué sur tapis roulant. Ces informations sont

pourtant nécessaires pour mieux comprendre ce qui pourrait favoriser l'apparition de limitations musculaires lors de ce type de test telles que décrites dans la seconde étude.

Ainsi, la troisième étude de ce travail de thèse s'est intéressée à l'influence du sexe, de la maturation du degré d'obésité sur la probabilité d'atteindre les critères de vérification de VO_{2max} lors d'un protocole incrémental de marche réalisé sur tapis roulant. Cette étude a également permis de fournir des données récentes sur l'aptitude aérobie spécifique à la marche dans une large population de jeunes en surpoids âgés de 8 à 16 ans.

VI. Etude 3

La troisième étude de ce travail de thèse a également fait l'objet d'une publication scientifique dans Journal of Sport Science en Mars 2021 :

Toulouse L, Mucci P, Pezé T, Zunquin G. Influence of grade of obesity on the achievement of VO2max using an incremental treadmill test in youths. J Sports Sci. 2021 Mar 16:1-6. doi: 10.1080/02640414.2021.1898093. Epub ahead of print. PMID: 33722152.

1. Contexte scientifique

Pour mieux appréhender la problématique de cette troisième étude, nous montrerons ici pourquoi la validation de VO_{2max} reste encore aujourd'hui une procédure complexe et débattue dans la littérature, indépendamment du public évalué. Nous détaillerons en particulier les (multiples) méthodes qui permettent de vérifier VO_{2max} et montreront que l'absence de méthode consensuelle aboutit à un manque de clareté concernant l'aptitude des jeunes en surpoids à atteindre VO_{2max} lors d'un test sur tapis roulant.

i. Validation de VO_{2max} : quelle méthode choisir ?

Afin de s'assurer qu'un individu ait atteint VO_{2max}, plusieurs critères. Ces critères dépendent de la population étudiée mais aussi des choix méthodologiques effectués par les expérimentateurs : ils présentent donc un caractère arbitraire. Classiquement, les critères basés sur des paramètres physiologiques mesurables de manière non-insavies sont (Howley et al., 1995) :

- La recherche d'un *plateau de* VO_2 (Figure 25) ;

- l'atteinte d'une *fréquence cardiaque* (FC) > 95% de la valeur maximale théorique ;
- l'atteinte d'un *quotient respiratoire* (RER) > 1 à 1.15 selon les populations.

Ces critères physiologiques peuvent être complétés par d'autres critères basés sur la pénibilité de l'effort, la sensation de dyspnée, les signes de fatigue ou l'incapacité manifeste à ne plus poursuivre l'effort malgré la motivation. A ce jour, il n'existe pas de consensus scientifique sur le nombre de critères nécessaires pour valider VO_{2max}. En théorie, le critère primaire de validation d'atteinte de VO_{2max} est le plateau de VO_2, défini comme une augmentation faible ou nulle de VO_2 malgré l'augmentation de l'intensité de l'exercice (Taylor et al., 1955).

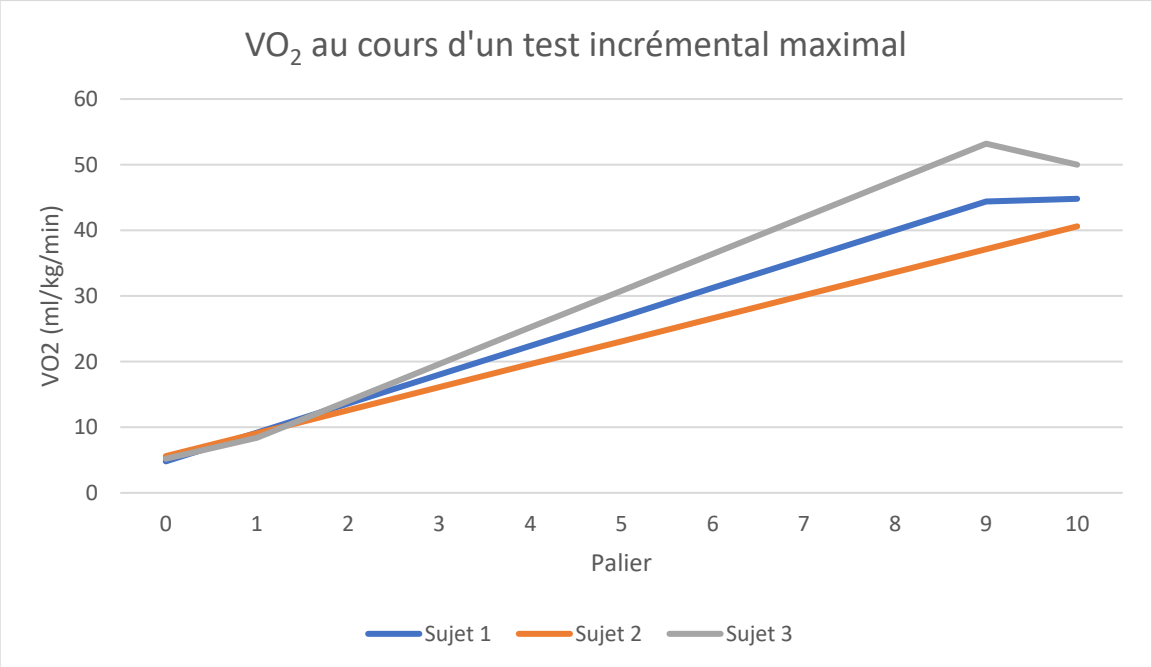


Figure 25 : Exemple de courbes de VO_2 chez trois sujets ayant effectué un test incrémental maximal sur tapis roulant. Le sujet bleu présente un plateau de VO_2 ; le sujet orange ne présente pas de plateau de VO_2 ; le sujet gris est un cas particulier puisqu'il ne présente pas à proprement parler de « plateau », mais est considéré comme présentant un plateau en utilisant les critères de diminution de pente.

ii. Plateau de VO_2 : critère « primaire »

Le concept du plateau de VO_2 est apparu en 1925 lorsque Hill déclarait qu'à partir d'une certaine allure de course, VO_2 n'augmentait plus significativement malgré l'augmentation de la vitesse de course : *« In running, the oxygen requirement increases continuously as the speed increases, attaining enormous values at the highest speeds ; the actual oxygen intake, however, reaches a maximum beyond which no effort can drive it ... The oxygen intake may attain its maximum and remain constant merely because it cannot go any high owing to the limitations of the circulatory and respiratory system ».* Ce concept a été vivement critiqué en raison de la faiblesse méthodologique des études ayant abouti à l'élaboration du concept de plateau (Noakes, 1988). D'une part, le concept de plateau fut élaboré en reportant les valeurs de VO_2 mesurées lors de périodes de 3 minutes de courses entrecoupées de périodes de récupérations, alors que la méthode de référence actuelle implique la réalisation d'un test d'intensité croissante de type « rampe » (Poole et Jones, 2017). De plus, l'apparition du plateau semble aléatoire et dépendrait de la méthode d'échantillonnage (rarement spécifiée), de la population étudiée et du protocole utilisé (Myers et al., 1990). Enfin, il n'existe pas de consensus scientifique sur la méthodologie stricte permettant d'identifier un plateau de VO_2. Cela a récemment incité certains scientifiques à vérifier la réalité physiologique du plateau de VO_2 (Niemeyer et al., 2020).

L'une des définitions du plateau de VO_2 les plus utilisées est basée sur la pente individuelle d'augmentation de VO_2 : lorsque l'augmentation de VO_2 lors de la dernière minute d'exercice est inférieure à 50% de l'augmentation attendue au regard de la relation VO_2 / travail, il est considéré que l'individu présente un plateau de VO_2 (Poole et al., 2008 ; Wood et al., 2010). Le seuil des 50% provient de travaux effectués par Taylor et al. (1955) dans lesquels le plateau de VO_2 était défini comme une augmentation de VO_2 inférieure de 2 écarts-types par rapport à l'augmentation moyenne de VO_2 à chaque palier. Dans cette étude, la présence d'un plateau était indiquée lorsque l'augmentation de VO_2 était inférieure à ~150 $ml.min^{-1}$ pour une

augmentation moyenne de 300 ml.min^{-1}, d'où les 50%. Ce critère fut repris dans de nombreuses autres publications utilisant des protocoles et des populations différentes, bien que d'autres critères furent depuis proposés (e.g., augmentation de VO_2<50ml/min par Astorino et al., 2005). Chez l'enfant, Rowland et Cunningham (1992) ont étudié la prévalence du plateau de VO_2 au cours d'un exercice maximal réalisé sur tapis roulant. Ils ont observé que les études menées jusqu'à lors reportaient que 21 à 60% des enfants présentaient un plateau de VO_2 (indépendamment de la fréquence cardiaque et du quotient respiratoire mesurés en fin de test). Ces auteurs ont donc conclu que le plateau de VO_2 ne devrait pas être utilisé pour caractériser l'atteinte de VO_{2max} lors de ce type de protocole chez l'enfant.

iii. Critères « secondaires »

En l'absence de plateau de VO_2, des critères secondaires de validation d'atteinte de VO_{2max} ont été proposés. Ceux-ci sont basés sur la FC, le RER (VCO_2/VO_2), la lactatémie et l'incapacité manifeste à poursuivre l'effort, ces indicateurs étant souvent recueillis lors d'une épreuve réalisée en laboratoire. Les critères recommandés lors d'un test réalisé sur tapis roulant sont les suivants (Paridon et al., 2006) :

- FC > 95% de la FC maximale théorique (~200 bpm chez l'enfant)
- RER > 1.0 ou 1.1
- Lactatémie > 4-6 mmol.L^{-1}
- Incapacité manifeste à poursuivre l'effort (appréciée par l'expérimentateur)

Chez l'enfant, Cicone et al. (2019) indiquent que formule la plus valide à ce jour serait la formule de Tanaka et al. (2001) [FC_{max} = 208 – 0.7 * âge], bien que cette formule ait été initialement destinée aux adultes. Quelle que soit la formule utilisée, le critère de validation d'atteinte de VO_{2max} basé sur l'atteinte d'une FC >95% FC_{max} se situe entre 195 et 200 bpm,

bien que le seuil des 200 bpm semble être le plus répandu lors d'un test réalisé sur tapis roulant (Armstrong et al., 1996 ; Gutin et al., 2002 ; Breithaupt et al., 2012). Le seuil de quotient respiratoire ou RER (égal au rapport VCO_2/VO_2) fut fixé à 1.0 par Armstrong et al. (1996) qui avaient observé que les enfants étaient capables de réaliser un effort jusqu'à épuisement sans atteindre un RER>1.15 ou 1.1 (critère initialement proposé pour vérifier VO_{2max} chez l'adulte). Enfin, le critère basé sur la lactatémie est cité en raison de son utilisation dans certaines études depuis que ce critère fut proposé chez l'adulte par Astrand (1952). Son utilisation a néanmoins été déconseillée en raison d'une variabilité interindividuelle trop importante des valeurs chez l'enfant, due en partie à des facteurs développementaux (Armstrong et Welsman, 1994).

La sensibilité des critères secondaires de validation d'atteinte de VO_{2max} est toujours discutée. En effet, les critères physiologiques secondaires sont basés sur l'atteinte d'un seuil au-delà duquel on considère que l'individu a atteint VO_{2max} ou non. Comme le soulignent Howley et al. (1995), cette méthode s'avère particulièrement problématique en ce qui concerne la FC puisque l'estimation de la FC_{max} montre une erreur standard de plus de 10 bpm. Cela signifie qu'un individu pourrait atteindre le critère de validation d'atteinte de VO_{2peak} basé sur la FC tout en ayant réalisé un effort sous-maximal, et à l'inverse, qu'un individu ayant réalisé un effort maximal n'atteigne pas ce critère alors qu'il a effectivement atteint VO_{2peak}. Ces critiques pourraient également être formulées à l'égard du RER et de la lactatémie. Lors d'un test effectué sur ergocycle, l'utilisation de critères basés sur un seuil de FC ou de RER pouvait entraîner une sous-estimation de VO_{2peak} s'élevant jusqu'à 27% chez l'adulte (Poole et al., 2008) et jusqu'à 22% chez l'enfant (Barker et al., 2011), ou au contraire, le rejet d'un VO_{2max} pourtant valide chez près de la moitié des individus. Chez le sujet non-sportif ou le patient souffrant d'une pathologie chronique, ces erreurs d'interprétations peuvent être accentuées par de plus faibles FC et RER atteints à la fin d'un test en comparaison avec les individus sains, comme c'est le cas chez le jeune en surpoids (Norman et al. 2005 ; Martinus et al., 2017). Ces

critères restent toutefois encore utilisés à l'heure actuelle car il n'existe à ce jour aucun autre critère objectif permettant de vérifier l'atteinte de VO_{2max} en l'absence de plateau de VO_2.

iv. Le test supramaximal (ou phase de vérification)

L'une des solutions alternatives à l'utilisation des critères secondaires préconisée par certains auteurs pour vérifier VO_{2max} est la pratique d'un test supramaximal, appelé « phase de vérification ». Cette procédure consiste à maintenir une allure constante d'effort correspondant à 105-110% de la charge de travail maximale atteinte par l'individu lors du test précédent, 10 à 15 minutes à la suite du test, ce jusqu'à épuisement (Barker et al., 2011). Si la plus haute valeur de VO_2 mesurée lors de la phase de vérification est similaire à celle observée lors du test incrémental, cette dernière est considérée comme étant VO_{2peak}. Cette méthode recommandée chez l'adulte (Poole & Jones, 2017) et l'enfant sain (Barker et al., 2011), présenterait toutefois un intérêt limité chez le jeune en surpoids au regard des résultats contradictoires observés sur deux études récentes (Bhammar et al., 2017 ; Sansum et al., 2019). Par ailleurs, au-delà de son caractère chronophage, la réalisation d'un exercice supramaximal à la suite d'un effort maximal est peu acceptable du point de vue éthique chez un jeune en surpoids. Ainsi, malgré l'intérêt scientifique présumé de cette méthode, nous considérons que celle-ci ne devrait pas être utilisée en pratique clinique chez un jeune en surpoids puisque cette méthode pourrait avoir des conséquences préjudiciables sur la motivation de l'enfant à effectuer de nouveau un test d'aptitude physique à l'effort.

v. Validation de VO_{2max} chez le jeune en surpoids

Chez le jeune en surpoids, les critères utilisés pour vérifier l'atteinte de VO_{2max} lors d'un test sur tapis roulant sont rarements décrits, ou peu sélectifs. Selon certains auteurs, ceci serait dû au nombre élevé de « pertes » dans les études impliquant une évaluation de VO_{2max} (Midgley

et al., 2008), pouvant entraîner parfois même l'établissement des critères de vérification *a posteriori*. Toutefois, le manque d'étude ayant comparé VO_{2max} sur tapis roulant entre des jeunes en surpoids et des jeunes normo-pondérés ne permet pas à l'heure actuelle de certifier que le taux d'atteinte de VO_{2max} soit négativement affectée par le surpoids lors d'un test de marche sur tapis roulant.

D'après les études disponibles dans la littérature, les critères utilisés pour valider VO_{2max} chez le jeune en surpoids sont 1) la présence d'un plateau de VO_2 ; 2) une FC > 200 bpm ; 3) un RER>1.0 ; 4) l'incapacité à poursuivre l'effort malgré la motivation (Goran et al., 2000 ; Gutin et al., 2002 ; Breithaupt et al., 2012). Cependant, le nombre de critères utilisés varie selon les études ; dans l'étude de Gutin et al. (2002), seuls l'un des trois premiers critères ne devait être atteint afin de valider VO_{2max}. Gutin et al. observent ainsi que 66/80 (soit 83%) des participants ont atteint VO_{2max} au cours de l'exercice, sans fournir de détails en ce qui concerne la validation de chacun des critères. En utilisant le même protocole, Breithaupt et al. (2012) ont utilisés les quatre critères et indiqué qu'il fallait atteindre au minimum 2 critères pour valider VO_{2max}. La différence avec l'étude de Gutin et al. est l'ajout d'un critère subjectif qui est « l'incapacité manifeste à poursuivre l'exercice ». Breithaupt et al. observent que seuls 18 adolescents obèses sur 62 (soit moins d'un tiers de l'effectif) atteignent au minimum 2 des 4 critères précités de validation de VO_{2max}. Compte tenu de la faible sélectivité des critères utilisés par Gutin et al. (2002) et du faible taux d'individus ayant atteint un VO_{2peak} valide dans l'étude de Breithaupt et al. (2012), il peut être légitime de s'interroger sur l'aptitude des jeunes en surpoids à atteindre VO_{2max} au cours d'un test incrémental de marche sur tapis roulant. Néanmoins, aucune autre étude ne nous permet actuellement de nous renseigner précisément sur la capacité des jeunes en surpoids à atteindre VO_{2max} lors d'un test de marche sur tapis roulant. En outre, ce manque d'information limite la compréhension des mécanismes qui expliquent que peu de jeunes en surpoids atteignent leur VO_{2max} lors d'un test réalisé sur tapis

roulant ; on ignore si ces difficultés sont favorisées ou non par le degré de surpoids, les facteurs développementaux ou le sexe.

Dans la troisième étude de ce travail de thèse, nous avons ainsi mesuré l'influence des caractéristiques individuelles (grade de surpoids, maturation, sexe) sur l'atteinte des critères de validation de VO_{2max} au cours d'un test de marche sur tapis roulant. Cette étude s'inscrit dans la continuité des rares travaux ayant utilisé des analyses multivariées pour discerner les effets respectifs des caractéristiques anthropométriques sur VO_{2peak} chez l'enfant et l'adolescent (Armstrong et Welsman, 2019 ; Carvalho et al., 2013). Ce travail a apporté des données complémentaires à la seconde étude qui s'est intéressée à l'influence des facteurs musculaires.

2. Objectifs & hypothèses

Le principal objectif de cette troisième étude était de mesurer l'influence du sexe, de la maturation et du degré de surpoids sur la probabilité d'atteindre les critères de VO_{2max} lors d'un test incrémental de marche réalisé sur tapis roulant. Compte tenu des multiples contraintes musculaires décrites par certains auteurs (Blakemore et al., 2013 ; Garcia-Vicencio et al., 2015 ; Strutzenberger et al., 2017), notre hypothèse était qu'un degré de surpoids élevé serait associé à une moindre probabilité d'atteindre VO_{2max}.

L'objectif secondaire de l'étude était d'étudier l'influence respective ces mêmes caractéristiques sur les réponses cardiorespiratoires et perceptuelles. Conformément à ce précédents résultats (Armstrong et Welsman, 2019), notre hypothèse était que VO_{2peak} serait supérieur chez les individus les plus matures et inférieur chez les filles, mais ne serait pas influencé par le degré de surpoids. Sur la base des observations de Marinov et al. (2002), notre

dernière hypothèse était que la tolérance psychologique à l'effort serait moindre chez les jeunes ayant le grade le plus élevé de surpoids.

3. Méthode

i. Participants

73 jeunes en surpoids participant à un programme hospitalier pluridisciplinaire pour l'obésité pédiatrique ont été inclus dans cette étude. Les critères d'inclusion étaient un âge compris entre 8 et 16 ans et un IMC ≥85ème centile des normes IOTF pour l'IMC, définissant au minimum le surpoids de grade I chez l'enfant (Cole et Lobstein, 2012). Pendant leur rendez-vous d'inclusion au programme, les enfants et leurs parents ont reçu une explication orale et écrite de la procédure expérimentale et des objectifs de l'étude, adapté auur niveau de langage. Après un délai de réflexion d'au moins une semaine après le rendez-vous initial, les enfants et parents volontaires ont signé un formulaire de consentement éclairé à la participation à l'étude synthétisant l'ensemble des informations liées à l'étude. Le protocole de l'étude fut approuvé par le Comité d'Ethique pour la Recherche en STAPS (n°2020-11-02-44).

ii. Procédure expérimentale

La procédure expérimentale est la même que celle qui a été utilisée dans la seconde étude (p.110).

iii. Exercice incrémental, recueil et collecte des données.

Le protocole utilisé ainsi que la méthodologie de recueil, de traitement et d'analyse des données cardiorespiratoires ont été décrits lors de la seconde étude (p.110-112). Les paramètres cardiorespiratoires mesurés étaient VO_{2peak} et le VE_{peak} rapportés à la masse maigre ($VO_{2peakFFM}$

et $VE_{peakFFM}$), FC_{peak} et RER_{peak}. Contrairement à la seconde étude, nous avons également mesuré la pénibilité de l'effort (RPE) continuellement lors du test à l'aide de l'échelle catégorielle de pénibilité de l'effort de Borg en 10 items (CR-10) précédemment utilisée chez le jeune en surpoids (Marinov et al., 2002). Cette échelle décrit un niveau de dyspnée du niveau 1 (« pas du tout ») à 10 (« maximal »). Nous avons utilisé la CR-10 au lieu de la COPE-10 car cette dernière présentait un caractère infantilisant d'après certains participants lors de la première étude. L'indicateur utilisé était la FC mesurée lorsque le participant indiquait un niveau d'effort perçu de 5/10 sur l'échelle – correspondant à l'item « dur » ($FC_{RPEhard}$), exprimé en pourcentage de la FCmax théorique estimée par la formule de Tanaka et al. (2001). Nous avons choisi cette indicateur afin d'obtenir une information concernant le niveau de stress physiologique que chaque participant était en mesure de tolérer avant que l'effort ne devienne « dur » (un terme signifiant pour un enfant, Williams et al., 1994). Nous avons estimé que ce repère pouvait présenter un intérêt clinique pour délimiter des zones de travail lors d'une séance d'entraînement.

Critères de validation d'atteinte de VO_{2max}

Comme dans l'étude de Breithaupt et al. (2012), nous avons utilisé trois critères physiologiques de validation d'atteinte de VO_{2max} : 1) présence d'un plateau de VO_2 ; 2) FC >200 bpm ; 3) RER >1.0. Le plateau de VO_2 était défini par une augmentation de VO_2 <50% lors de la dernière minute par rapport à l'augmentation observée lors de l'avant dernière minute d'effort. Cette méthode basée sur la relation individuelle entre la charge de travail et VO_2 est actuellement recommandée (Niemeyer et al., 2020) et a déjà été utilisée pour détecter le plateau de VO_2 chez l'adulte en surpoids (Wood et al., 2010). Un quatrième critère fut utilisé, basé sur l'atteinte d'un niveau de RPE ≥5. Ce critère fut choisi au lieu du critère basé sur l'incapacité manifeste à poursuivre l'effort car l'atteinte de ce dernier critère est déterminé par

l'expérimentateur et non par le participant, ce qui limite son caractère objectif et par conséquent, la possibilité de comparaison entre les études.

iv. Analyses statistiques

Les données ont été analysées sur R (version 3.6.2). La normalité et l'homogénéité des distributions ont été vérifiées avec le test de Shapiro-Wilk et le test *F* de Snedecor respectivement. Ensuite, le taux d'atteinte des critères de validation d'atteinte de VO_{2max} fut calculé puis exprimé en pourcentage du nombre total de participants. Puis, le Risque Relatif (RR) pour l'atteinte de chaque critère en fonction des catégories de sexe (filles vs garçons), de maturation (prépubères vs pubères) et de degré d'obésité (surpoids grade I vs grade II) fut calculé. Enfin, les effets du sexe, de la maturation et du z-score d'IMC IOTF sur les réponses cardiorespiratoires ($VO_{2peakFFM}$, $VE_{peakFFM}$ et FC_{peak}) et perceptuelles ($FC_{RPEhard}$) ont été évalués à l'aide de modèles de régression linéaires multiples (variable ~ sexe + maturation + degré d'obésité). Cette analyse était effectuée uniquement chez les participants ayant atteint au minimum 2 critères de validation d'atteinte de $VO_{2max(clin)}$ présentés ci-dessus. Le seuil de significativité fut défini à $p<0.05$.

4. **Résultats**

Les caractéristiques et les réponses cardiorespiratoires et perceptuelles sont présentées dans le Tableau 11 en fonction du degré d'obésité et du sexe. Les filles en surpoids de grade II étaient plus matures que leurs homologues en surpoids de grade I ($p<0.05$). Chez les garçons, FC_{peak} et $FC_{RPEhard}$ étaient supérieurs chez les individus en surpoids de grade II par rapport aux individus en surpoids de grade I ($p<0.01$).

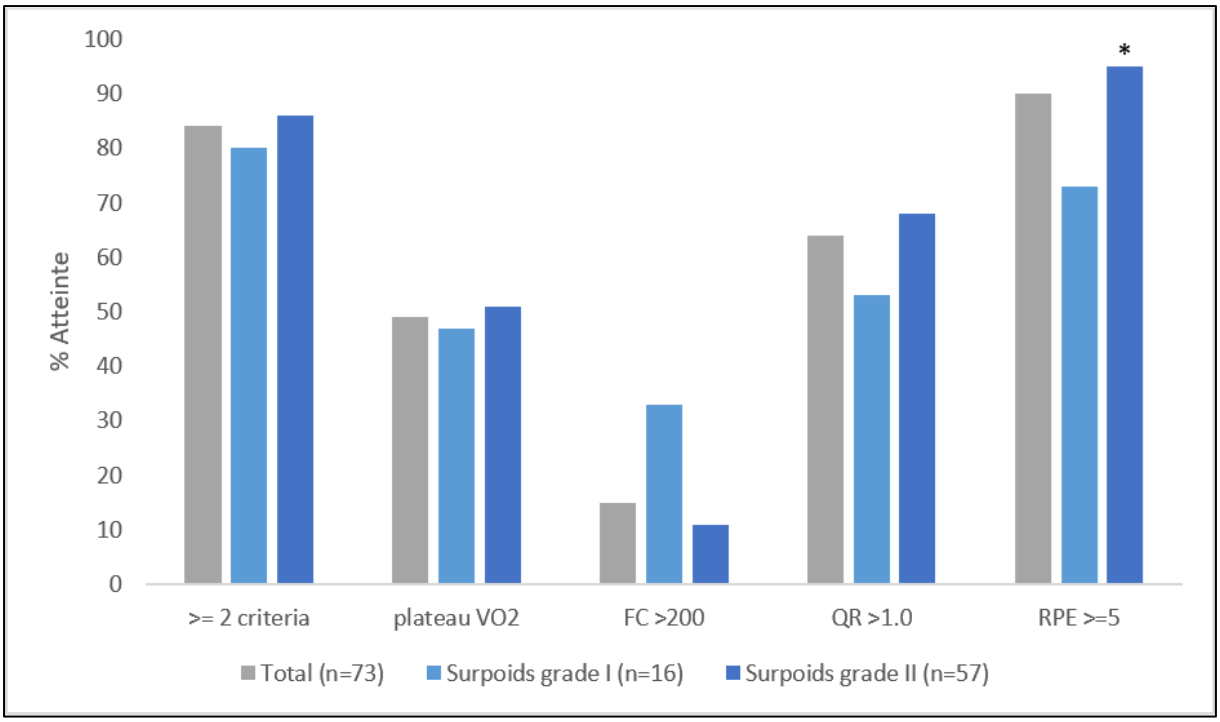


Figure 26 : Taux d'atteinte des critères de vérification de VO_{2max} pour le groupe total et par degré d'obésité. Différences entre les catégories d'obésité : * (P<0.05).

La Figure 26 représente le taux d'atteinte des critères de validation d'atteinte de VO_{2max} pour le groupe total, pour le sous-groupe « surpoids de grade I » et le sous-groupe « surpoids de grade II ». Au total, 84% des participants ont atteint au moins 2 des 4 critères de validation d'atteinte de VO_{2max} utilisés dans cette étude. Le plateau de VO_2 et les critères de FC_{peak}, RER_{peak} et RPE ont été respectivement atteints par 49, 15, 64 et 90% des participants. La probabilité d'atteindre au moins deux critères n'était pas influencée par le sexe, la maturation ni le degré d'obésité. Si l'on analyse les critères séparément (Tableau 12), les enfants en surpoids de grade II avaient une plus grande probabilité d'atteindre une RPE supérieure ou égale à l'item 5/10 « dur » de la grille (RR = 1.31, 95% CI=[1.10-1.36]; p<0.05), et tendaient à atteindre moins fréquemment une FC >200 bpm (RR = 0.77, 95% CI=[0.09-1.04]; p=0.07) que les enfants en surpoids de grade I. Enfin, les garçons tendaient à atteindre moins fréquemment un RER >1.0 (RR = 0.74, CI=[0.40-1.02]; p=0.08) que les filles.

Tableau 11 : Caractéristiques cliniques, réponses cardiorespiratoires et perceptuelles des participants en fonction du degré d'obésité et du sexe. Données présentées en moyenne ± SD. Différences entre les catégories d'obésité au sein des catégories de sexe : * ($p < 0.05$); ** ($p < 0.01$); *** ($p < 0.001$). Abréviations : IMC : Indice de Masse Corporelle ; bpm : battements par minute ; FFM : masse maigre ; PHV : âge du pic de croissance statural.

	Filles (n=34)		Garçons (n=39)	
	surpoids grade I (n=5)	surpoids grade II (n=29)	surpoids grade I (n=10)	surpoids grade II (n=29)
Age (ans)	10.9 ± 1.0	11.8 ± 1.8	12.3 ± 2.0	11.4 ± 1.8
Age-PHV (années du PHV)	-0.7 ± 0.8	0.4 ± 1.7*	-1.1 ± 1.2	-1.2 ± 1.7
Masse grasse (% masse corporelle)	32.1 ± 2.0	41.2 ± 5.6***	27.0 ± 4.3	36.9 ± 7.9***
IMC ($kg.m^{-2}$)	22.6 ± 1.5	30.5 ± 5.0***	24.5 ± 2.2	29.1 ± 4.1***
z-score IMC IOTF (SD)	1.8 ± 0.2	2.8 ± 0.5***	1.8 ± 0.2	2.6 ± 0.5***
z-score IMC OMS (SD)	1.8 ± 0.2	2.9 ± 0.6***	2.1 ± 0.2	3.2 ± 0.8***
$VO_{2peakBM}$ ($ml.kgBM^{-1}.min^{-1}$)	28.0 ± 3.2	25.1 ± 4.7	37.7 ± 6.2	29.4 ± 4.7**
$VO_{2peakFFM}$ ($ml.kgFFM^{-1}.min^{-1}$)	41.1 ± 3.7	42.8 ± 7.5	51.7 ± 8.4	46.9 ± 6.7
FC_{peak} (bpm)	182 ± 15	184 ± 15	197 ± 10	186 ± 10**
FC_{peak} (%FC_{max} théorique)	91.1 ± 8.0	91.9 ± 7.9	98.8 ± 5.2	93.0 ± 5.4**
$FC_{RPEhard}$ (%FC_{max} théorique)	84.3 ± 12.9	86.2 ± 7.7	92.7 ± 7.2	87.7 ± 6.2**
RER_{peak} (Unité arbitraire)	1.17 ± 0.23	1.07 ± 0.12	1.07 ± 0.14	1.09 ± 0.15

Tableau 12 : Risques relatifs (RR) pour l'atteinte des critères de validation d'atteinte de VO2max(clin) en fonction du sexe, de la maturation et du degré d'obésité.

	VO_{2max}	Plateau	FC > 200	RER > 1.0	RPE ≥ 5
Garçons (vs Filles)	0.92 [0.57-1.07]	0.67 [0.33-1.08]	2.29 [0.66-6.44]	0.74° [0.40-1.02]	0.99 [0.70-1.08]
Pubère (vs prépubère)	0.93 [0.60-1.09]	0.72 [0.34-1.16]	1.62 [0.47-3.98]	1.01 [0.61-1.32]	0.79° [0.27-0.99]
Surpoids grade II (vs surpoids grade I)	1.07 [0.66-1.20]	1.04 [0.48-1.63]	0.77° [0.09-1.04]	1.23 [0.67-1.62]	1.31* [1.10-1.36]

Données présentées en risque-relatif avec intervalle de confiance à 95%. Significativité : ° ($p<0.10$) ; * ($p<0.05$).

D'après nos analyses multivariées, $VO_{2peakFFM}$ et $VE_{peakFFM}$ étaient significativement influencés par le sexe ($p<0.01$ et $p<0.05$) et $VE_{peakFFM}$ tendait à être influencé par le z-score IMC IOTF ($p=0.06$). En moyenne, $VO_{2peakFFM}$ et $VE_{peakFFM}$ étaient respectivement 13 et 15% supérieurs chez les garçons et $VE_{peakFFM}$ tendait à être inférieur chez les individus en surpoids de grade II. Finalement, FC_{peak} et $FC_{RPEhard}$ étaient tous les deux influencés par le sexe ($p<0.05$ et $p<0.01$) et la maturation ($p<0.05$ pour les deux), les garçons et les individus les plus matures ayant les valeurs les plus élevées.

5. Discussion

Le principal objectif de cette étude était de mesurer l'influence du sexe, de la maturation et du degré d'obésité sur la probabilité d'atteindre les critères de validation d'atteinte de VO_{2max} lors d'un test incrémental de marche chez des jeunes en surpoids. Nos principaux résultats indiquent que 1) le sexe et la maturation n'ont pas d'influence significative sur la probabilité

d'atteindre les critères de validation d'atteinte de VO_{2max} ; 2) les enfants en surpoids de grade I ont une probabilité moins importante d'atteindre un niveau d'effort perçu « dur » et tendent à atteindre moins fréquemment une FC >200 bpm que leurs homologues en surpoids de grade II.

La plupart des études actuelles ne fournissent pas ou peu de détails en ce qui concernent l'atteinte des critères de validation d'atteinte de VO_{2max} lors d'un test incrémental sur tapis roulant chez le jeune en surpoids. Par conséquent, les connaissances concernant les effets des caractéristiques individuelles sur la probabilité d'atteindre VO_{2max} lors de ces protocoles reste limitée au sein de cette population. Nos analyses indiquent que chez le jeune en surpoids, il n'y a pas d'effet significatif du sexe, de la maturation et du degré d'obésité sur la probabilité d'atteindre les critères de validation d'atteinte de VO_{2max} basés sur des paramètres cardiorespiratoires (plateau de VO_2, FC >200 et RER 1.0) pendant un test incrémental de marche. Ces résultats présentent un intérêt clinique majeur : en effet, l'argument le plus utilisé pour ne pas effectuer l'évaluation de VO_{2max} chez le jeune en surpoids est qu'une majorité d'entre eux ne sont pas en mesure d'atteindre VO_{2max} lors de ce type de test (Thivel et Aucouturier, 2016), alors que nos résultats n'indiquent pas d'effet significatif du degré de surpoids (mesuré par le z-score d'IMC) sur l'atteinte de ces critères.

Chez l'adulte en surpoids, la probabilité d'atteindre cinq critères de validation d'atteinte de VO_{2max} n'était pas affectée par le sexe ni le degré d'obésité (Wood et al., 2010). Nos résultats sont en concordance avec ceux de cette dernière étude puisque ni le sexe ni le degré d'obésité n'ont influencé la probabilité d'atteindre les critères cardiorespiratoires. En revanche, les jeunes en surpoids de grade II avaient moins de probabilité d'atteindre un niveau d'effort perçu supérieur ou égal à « dur », tandis que Wood et al. n'ont observé aucune différence en ce qui concerne la RPE entre des adultes en surpoids de grade I et II. Nos résultats suggèrent que le degré d'obésité affecte davantage les réponses perceptuelles (principalement dû à des douleurs

musculaires décrites par >80% des participants) que les réponses cardiorespiratoires lors de ce type de test chez les jeunes. Ainsi, les présents résultats nous permettent d'indiquer que le degré du surpoids a un effet significatif sur la probabilité d'atteindre les critères de validation d'atteinte de VO_{2max}.

Chez l'adulte en surpoids, Wood et al. (2010) ont observé que le plateau de VO_2 était atteint par 49% des participants en utilisant la méthodologie dont nous nous sommes directement inspirés pour cette étude. Ce résultat est très proche des 46% que nous avons observé chez des jeunes en surpoids âgés de 8 à 16 ans. Par ailleurs, cette tendance comparable entre les adultes et les jeunes est supportée par l'absence d'effet de la maturation sur la probabilité de manifester ce plateau de VO_2. En revanche, ces auteurs indiquent que 83% de leurs participants ont atteint une FC>95% de leur FC_{max} théorique, alors que ce taux n'atteint que 15% chez nos participants. Ainsi, il semblerait que les adultes en surpoids aient davantage de facilité à atteindre une FC proche de la valeur maximale théorique prédite que les jeunes en surpoids lors d'un test incrémental de marche. Dans ce contexte, il peut être supposé que le taux 57% plus élevé de validation du critère de FC chez le groupe pubère n'était pas significatif à cause du faible nombre de participants ayant validé le critère (n=11).

Le résultat majeur de cette étude est que les jeunes en surpoids de grade II ont plus de probabilité d'atteindre un niveau de RPE supérieur ou équivalent à « dur » en dépit d'une aptitude non différente à atteindre les critères de VO_{2max}. Ce résultat présente un aspect clinique fondamental puisque les réponses perceptuelles jouent un rôle essentiel dans l'atteinte de VO_{2max} lors d'un test incrémental (Poole et Jones, 2017). Nos données sont en concordance avec celles de Marinov et al. (2002) qui ont trouvé que la RPE était supérieure chez des jeunes en surpoids de grade II comparé aux jeunes en surpoids de grade I à l'issue d'un test réalisé sur tapis roulant. Ces auteurs avaient émis l'hypothèse que l'augmentation du coût énergétique aérobie et le recours prématuré au métabolisme anaérobie justifieraient des niveaux plus élevés

de RPE chez les jeunes ayant un degré plus élevé d'obésité, plutôt que les aspects cardiorespiratoires. Cette interprétation rappelle les conclusions de notre première étude dans laquelle nous avons montré que la fonction respiratoire ne semblait pas être responsable de la difficulté perçue lors d'un test de marche/course à pied chez le jeune en surpoids (Toulouse et al., 2020). Il doit être indiqué cependant que l'intensité relative à partir de laquelle le test devenait « dur » était élevée pour l'ensemble des participants (~85-90% de la FC_{max} théorique), supportant les résultats de précédentes études montrant que la RPE est sous-estimée (score de fin de test égal à 6.2±1.2 et compris entre 5.2±2.3 et 5.4±2.7 dans les études de Marinov et al., 2002 ; Thivel et al., 2017).

Il est intéressant de noter que les échelles de RPE (COPE-10, CERT scale, CR-10) sont principalement gradées à partir des sensations cardiorespiratoires (Quinart et al., 2014). Les études montrent que les jeunes en surpoids atteignent des niveaux sous-maximaux de ces échelles lors des tests d'aptitude aérobie lors desquels elles ont été utilisées (test de marche/course en navette de 20 mètre ; test incrémental de marche sur tapis roulant). Nos résultats et ceux de précédentes études (Marinov et al., 2002 ; Thivel et al., 2017) montrent que de nombreux enfants manifestement motivés (en raison des critères d'inclusion) abandonnent lors de ces tests d'aptitude aérobie avec des scores de RPE « cardiorespiratoire » éloignés des valeurs maximales. Dans ce contexte, l'utilisation d'une échelle de RPE basée à la fois sur des sensations musculaires et cardiorespiratoires pourrait apparaître comme une solution pertinente chez le jeune en surpoids, en particulier lors d'un test destiné à mesurer VO_{2max}. Cette stratégie a par ailleurs déjà été mise en place chez l'enfant lors d'un test effectué sur ergocycle (Robertson et al., 2000) où les participants devaient indiquer une RPE « globale », une RPE « thorax » et une RPE « cuisse ». Ils ont observé grâce à cette méthodologie que la pénibilité de l'effort était supérieure au niveau musculaire par rapport au niveau global ou de la poitrine.

En pratique clinique, l'utilisation combinée de deux échelles de RPE lors d'un test (l'une évaluant les sensations cardiorespiratoires, l'autre évaluant les sensations musculaires) permettrait de déterminer quel est le principal facteur limitant l'effort aérobie et d'obtenir des informations clé pour concevoir un programme de prise en charge adapté. Ainsi, en fonction des limitations observées et décrites par les individus, on pourrait aiguiller ces derniers soit sur un programme centré sur l'amélioration des paramètres cardiorespiratoires, soit sur un programme centré sur l'amélioration de l'endurance musculaire.

L'objectif secondaire de l'étude était d'étudier l'influence du sexe, de la maturation et du degré d'obésité sur les réponses cardiorespiratoires ($VO_{2peakFFM}$, $VE_{peakFFM}$, FC_{peak}) et perceptuelles ($FC_{RPEHARD}$) à un test incrémental sur tapis roulant. Il y a deux avantages à normaliser les données respiratoires par la masse maigre. Premièrement, il a été montré que la masse maigre explique la plupart des variations de VO_2 (Vanderburgh et Katch, 1996 ; Tompuri et al., 2015). Par conséquent, $VO_{2peakFFM}$ est plus approprié pour effectuer des comparaisons entre des individus de composition corporelle différente (Goran et al., 2000 ; Tompuri et al., 2015), ce qui est le cas chez le jeune en surpoids où l'on retrouve une variabilité élevée du point de vue de la masse maigre et de la capacité de la masse maigre à effectuer un exercice aérobie (parfois intitulée « mitochondria-fitness ») (Klijn et al., 2007 ; Lazzer et al., 2017). Deuxièmement, $VO_{2peakFFM}$ a été récemment désigné comme un prédicateur robuste de la mortalité toutes causes confondues chez l'adulte (Imboden et al., 2020). D'autre part, l'utilisation d'une analyse multivariée constitue un atout intéressant pour ce type d'étude puisque cette méthodologie permet de décrire séparément des variables figurant pourtant dans un seul et même modèle (Armstrong et Welsman, 2019). Selon nos analyses, $VO_{2peakFFM}$ est uniquement influencé par le sexe : les garçons ont en moyenne des valeurs 13% supérieures à celles des filles. Ces résultats sont en accord avec ceux de précédentes études chez l'enfant avec (Vinet et al., 2003 ; Ortega et al., 2008) ou sans excès de poids (Lazzer et al., 2017), indiquant

des valeurs 6 à 15% plus élevées chez les garçons. Il a été supposé que le moindre VO_{2peak} chez les filles était la conséquence d'une moindre différence de contenu artérioveineux en oxygène $d(a\text{-}v)O_2$ (Winsley et al., 2009). En ce sens, McNarry et al. (2015) ont récemment décrit une moindre capacité d'ajustement entre le transport et l'utilisation de l'O_2 à l'niveau musculaire chez les filles par rapport aux garçons, en utilisant la NIRS.

D'autre part, $VE_{peakFFM}$ est 15% plus élevé chez les garçons et tend à être inférieur chez les jeunes en surpoids de grade II (p=0.07). Cette différence est comparable aux différences observées pour $VO_{2peakFFM}$, indiquant éventuellement que les variations de $VO_{2peakFFM}$ sont dues à des facteurs ventilatoires. Ce phénomène pourrait se traduire à l'niveau musculaire par un moindre apport en O_2 par rapport à l'utilisation musculaire. Toutefois, en l'absence de limitations d'origine respiratoire, d'autres facteurs peuvent également affecter la capacité d'apport musculaire en O_2 telles que la concentration sanguine en hémoglobine (Suarez-Ortegon et al., 2019) ou la régulation locale du flux sanguin par le système nerveux sympathique (Casey et Joyner, 2011). Cependant, ni le statut ferrique (Ferrari et al., 2015) ni la fonction nerveuse autonomique à l'exercice (Santana et al., 2019) ne semble impactées chez le jeune en surpoids. Pour finir, FC_{peak} et $FC_{RPEHard}$ étaient significativement influencés par le sexe et la maturation, en faveur des garçons et des individus les plus matures. Ainsi, à intensité équivalente, l'effort apparaîtrait comme étant plus pénible chez les filles et les enfants prépubères lors d'un test incrémental réalisé sur tapis roulant.

Limitations et perspectives

Cette étude présente des limitations. La première limitation est qu'il n'y a pas de consensus scientifique sur les critères et l'incrémentation du test à utiliser pour vérifier VO_{2peak} chez l'enfant. Ceci est en partie dû au fait que l'on appréhende mal les limitations à l'effort maximal de l'enfant en surpoids : les critères utilisés chez l'enfant sont les mêmes critères que

l'on utilise chez le sportif (i.e., critères basés sur la fonction cardiorespiratoire) (Poole et al., 1997), alors que les mécanismes limitant l'effort diffèrent entre les enfants et les adultes (Ratel et al., 2015). Deuxièmement, même si notre méthodologie s'appuyait sur les recommandations les plus récentes (Marinus et al., 2017 ; Niemeyer et al., 2020), l'interprétation de nos résultats pourrait être plus précise si d'autres critères avaient été utilisés (e.g., échelle de pénibilité de l'effort basée sur la douleur musculaire). Ces données (échelle de RPE classique et échelle de RPE musculaire) auraient permis de conduire une évaluation plus complète des raisons qui ont poussé les participants à abandonner le test (Midgley et al., 2018). Cependant, nos résultats ont des applications cliniques novatrices étant donné que les tests réalisés sur tapis roulant restent une référence pour l'évaluation de l'aptitude aérobie chez le jeune en surpoids. Nos données indiquent que l'atteinte des critères cardiorespiratoires de validation d'atteinte de VO_{2peak} n'est pas significativement influencée par le sexe, la maturation ni le degré d'obésité, mais que les jeunes présentant un surpoids de grade II perçoivent davantage la difficulté que ceux ayant un surpoids de grade I au cours du test, ce qui pourrait constituer un obstacle à la poursuite du test.

6. Conclusion

La probabilité d'atteindre un plateau de VO_2, une FC>200 ou un RER>1.0 était indépendant du sexe, de la maturation et du degré d'obésité. La tolérance psychologique à l'effort était inférieure chez les jeunes en surpoids de grade II vs. grade I durant notre test incrémental de marche, ce qui doit être considéré lorsque l'on souhaite évaluer VO_{2peak} auprès de cette population. Finalement, les garçons manifestaient des réponses cardiorespiratoires (VE_{peak} et FC_{peak}) et perceptuelles ($FC_{RPEhard}$) les disposant davantage à atteindre VO_{2max} que les filles en surpoids durant ce type de test.

Il apparaît ainsi que le degré de surpoids est le principal déterminant de l'aptitude à valider un test d'aptitude aérobie. Afin de compléter ce travail, des études comparant les jeunes en surpoids « actifs » vs « non-actifs » permettraient d'affiner davantage le lien qui relie activité physique, surpoids et aptitude aérobie.

Synthèse graphique des apports et perspectives de ce travail de thèse

Etude 1

Faible impact des demi-tours du test navette < 7 km/h

Intérêt de la modalité 15-15 dès la marche

Etude 2

Survenue d'un plateau du niveau d'extraction de l'O2 du gastrocnémien lors d'un test de marche sur tapis roulant

Etude 3

Plateau de VO2

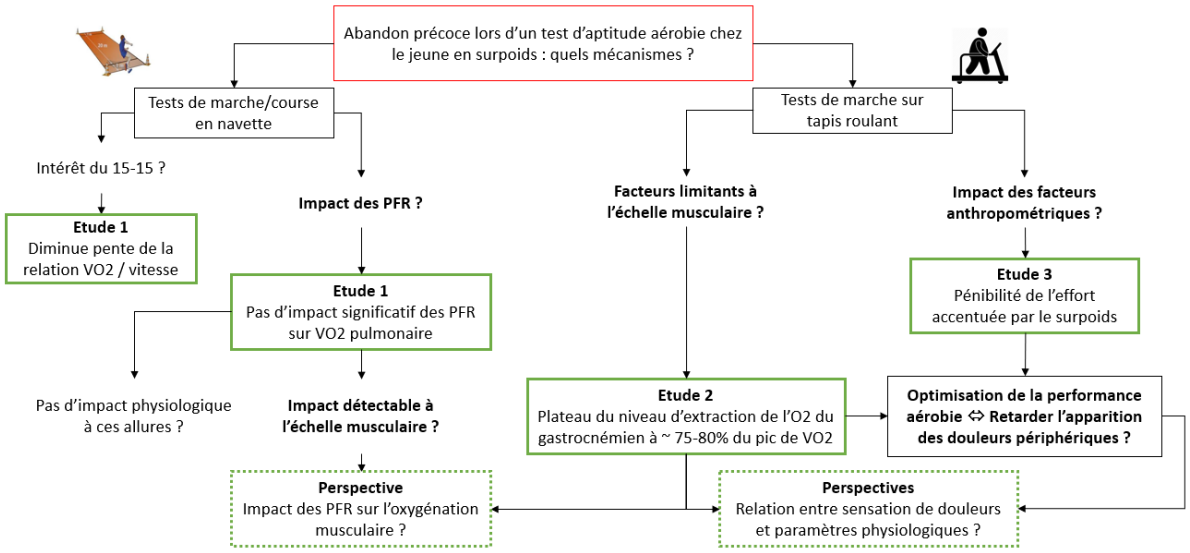
FC > 200 bpm

QR > 1.0

Effort perçu > « dur »

Pas d'effet du sexe, de la maturation et du degré de surpoids sur la probabilité d'atteindre VO2max

Un plus haut grade de surpoids accentue la perception de l'effort



Conclusion générale

Ce travail de thèse a permis d'apporter une relecture des travaux les plus récents en ce qui concerne le lien entre surpoids, activité physique, obésité et aptitude maximale aérobie chez le jeune. Ces liens restent encore peu clairs étant donné la difficulté à discerner les effets de l'activité physique, de la sédentarité, du surpoids et des facteurs développementaux. D'après l'état des connaissances actuelles, il est établi que l'excès de masse grasse affecte à la fois VO_{2max} rapporté à la masse corporelle et le coût énergétique aérobie, aboutissant à une altération de l'aptitude aérobie en course à pied, représentée par la VMA. La littérature indique également que de nombreux jeunes en surpoids peinent à atteindre leur limite cardiorespiratoire (=VO_{2max}) lors d'un exercice de marche/course à pied, quel que soit sur le terrain (tests de marche/course en navette) ou en laboratoire (tests de marche sur tapis roulant). Pourtant, les mécanismes physiologiques à l'origine de ces difficultés largement décrites n'ont été que partiellement étudiés.

Dans une première étude, nous avons supposé que l'impact énergétique des phases de freinage-réaccélération entraînait une augmentation excessive de la demande énergétique susceptible de justifier les difficultés par certains jeunes en surpoids lors de ce type de test. Nos résultats ont indiqué que ni VO_2, ni le CE n'augmentaient significativement en réponse à 2 phases de freinage-réaccélération pour des allures comprises entre 3 et 6 $km.h^{-1}$, des allures correspondant aux capacités physiques de jeunes en surpoids de grade III. Nous en avons déduit que l'impact énergétique mesuré à l'niveau respiratoire restait négligeable à ces allures et ne pouvait être la cause principale d'un abandon précoce lors d'un test navette. Cependant, nos données étaient limitées par l'absence de données musculaires et le caractère sous-maximal des exercices.

Dans une seconde étude, nous avons conjointement mesuré les réponses musculaires et respiratoires au cours de l'exercice afin de déterminer si la probabilité d'atteindre VO_{2max} était en lien avec des mécanismes localisés à l'niveau musculaire. La spectroscopie du proche-infrarouge nous a permis d'étudier les cinétiques d'oxygénation musculaire et de détecter des points d'inflexion dans la courbe de la deoxy[heme] appelés « breakpoints » ($BP_{deoxy[heme]}$), indiquant un plafonnement du niveau d'extraction de l'O_2. Nos résultats ont indiqué que $BP_{deoxy[heme]}$ se produisait chez 25/26 participants à ~75-80% VO_{2peak} et que son délai d'apparition était fortement corrélé avec la durée totale du test. Nous en avons conclu que lors d'un test incrémental de marche sur tapis roulant, la capacité à ajuster le niveau d'extraction de l'O_2 à la demande énergétique au niveau du gastrocnémien pouvait constituer l'un des principaux facteurs associé à la performance aérobie.

Enfin, pour compléter ce travail, il nous apparaissait nécessaire de regarder si les caractéristiques individuelles (degré de surpoids, sexe, maturation) avaient un lien avec la probabilité d'atteindre ou non les critères de validation de VO_{2max} au cours d'un test sur tapis roulant. Nous avons ainsi mesuré les effets du sexe, de la maturation et du degré d'obésité sur la probabilité d'atteindre un plateau de VO_2 ; une fréquence cardiaque >200 ; un quotient respiratoire >1.0 et un niveau de pénibilité d'effort ≥ « dur ». Nous avons observé que les jeunes présentant une obésité de grade supérieur ou égale à II étaient moins psychologiquement tolérants à l'effort que les jeunes présentant une obésité de grade I. En revanche, ni le sexe, ni la maturation, ni le degré d'obésité n'avaient une influence significative sur la probabilité d'atteindre les critères de vérification de VO_{2max}.

A partir de ces données et au regard des résultats de la première et la seconde étude, il semble que le degré d'obésité et la capacité à maintenir l'équilibre entre apport et utilisation musculaire de l'O_2 figurent parmi les principaux facteurs influant sur la capacité à tolérer l'effort lors d'un test d'aptitude maximale aérobie de marche/course à pied. Par conséquent, il

peut être supposé que l'atteinte de VO_{2max} est favorisé par un niveau modéré de surpoids et une bonne adaptation musculaire à l'effort de longue durée. D'autre part, nos résultats démontrent que la pratique d'un test de marche, bien que plus accessible, n'est pas associée à l'atteinte systématique de VO_{2max} chez un jeune en surpoids. Ainsi, l'utilisation de VO_{2max} comme principal indicateur de suivi pourrait conduire à des erreurs d'interprétation cliniques chez certains individus. Afin de limiter les risques d'abandons précoces au cours des tests d'aptitude aérobie, nous encourageons donc les cliniciens à utiliser des stratégies destinées 1) à limiter les contraintes musculaires ; 2) à favoriser une adaptation cardiorespiratoire progressive ; 3) à atténuer la pénibilité de l'effort.

Par ces stratégies et un regard plus éclairé sur les différentes contraintes méthodologiques à l'évaluation cardiorespiratoire chez le jeune en surpoids, ce travail de thèse contribue à l'interprétation clinique des résultats obtenus via un test d'aptitude maximale aérobie, permettant d'adapter au mieux les programmes d'activités physiques adaptées au sein de ce public.

Bibliographie

Ahmaidi, S., Collomp, K., Caillaud, C., & Préfaut, C. (1992). Maximal and functional aerobic capacity as assessed by two graduated field methods in comparison to laboratory exercise testing in moderately trained subjects. International journal of sports medicine, 13(3), 243–248. https://doi.org/10.1055/s-2007-1021261

ANSES (2014). INCA 3 : Evolution des habitudes et modes de consommation, de nouveaux enjeux en matière de sécurité sanitaire et de nutrition. URL : https://www.anses.fr/fr/content/inca-3-evolution-des-habitudes-et-modes-de-consommation-de-nouveaux-enjeux-en-mati%C3%A8re-de

ANSES (2016). Actualisation des repères du PNNS - Révisions des repères relatifs à l'activité physique et à la sédentarité. URL : https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2012SA0155Ra.pdf

Armstrong, N., & Welsman, J. (2019). Development of peak oxygen uptake from 11-16 years determined using both treadmill and cycle ergometry. European journal of applied physiology, 119(3), 801–812. https://doi.org/10.1007/s00421-019-04071-3

Armstrong, N., & Welsman, J. R. (1994). Assessment and interpretation of aerobic fitness in children and adolescents. Exercise and sport sciences reviews, 22, 435–476. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/7925551/

Armstrong, N., Welsman, J., & Winsley, R. (1996). Is peak VO2 a maximal index of children's aerobic fitness?. International journal of sports medicine, 17(5), 356–359. https://doi.org/10.1055/s-2007-972860

Astorino, T. A., Willey, J., Kinnahan, J., Larsson, S. M., Welch, H., & Dalleck, L. C. (2005). Elucidating determinants of the plateau in oxygen consumption at VO2max. British journal of sports medicine, 39(9), 655–660. https://doi.org/10.1136/bjsm.2004.016550

Aucouturier, J., Duché, P., & Timmons, B. W. (2011). Metabolic flexibility and obesity in children and youth. Obesity reviews : an official journal of the International Association for the Study of Obesity, 12(5), e44–e53. https://doi.org/10.1111/j.1467-789X.2010.00812.x

Balke, B., & Ware, R. W. (1959). An experimental study of physical fitness of Air Force personnel. United States Armed Forces medical journal, 10(6), 675–688. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/13659732/

Baquet, G., Ridgers, N. D., Blaes, A., Aucouturier, J., Van Praagh, E., & Berthoin, S. (2014). Objectively assessed recess physical activity in girls and boys from high and low

socioeconomic backgrounds. BMC public health, 14, 192. https://doi.org/10.1186/1471-2458-14-192

Barker, A. R., Williams, C. A., Jones, A. M., & Armstrong, N. (2011). Establishing maximal oxygen uptake in young people during a ramp cycle test to exhaustion. British journal of sports medicine, 45(6), 498–503. https://doi.org/10.1136/bjsm.2009.063180

Barnett, A.R., Chan, L., & Bruce, I. (1993). A Preliminary Study of the 20-m Multistage Shuttle Run as a Predictor of Peak VO2 in Hong Kong Chinese Students. Pediatric Exercise Science, 5, 42-50. https://journals.humankinetics.com/view/journals/pes/5/1/article-p42.xml

Barry, V. W., Caputo, J. L., & Kang, M. (2018). The Joint Association of Fitness and Fatness on Cardiovascular Disease Mortality: A Meta-Analysis. Progress in cardiovascular diseases, 61(2), 136–141. https://doi.org/10.1016/j.pcad.2018.07.004

Barstow T. J. (2019). Understanding near infrared spectroscopy and its application to skeletal muscle research. Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985), 126(5), 1360–1376. https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00166.2018

Barstow T. J. (2019). Understanding near infrared spectroscopy and its application to skeletal muscle research. Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985), 126(5), 1360–1376. https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00166.2018

Bassett, D. R., Jr, & Howley, E. T. (2000). Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. Medicine and science in sports and exercise, 32(1), 70–84. https://doi.org/10.1097/00005768-200001000-00012

Bassi, M., Furuya, W. I., Zoccal, D. B., Menani, J. V., Colombari, D. S., Mulkey, D. K., & Colombari, E. (2016). Facilitation of breathing by leptin effects in the central nervous system. The Journal of physiology, 594(6), 1617–1625. https://doi.org/10.1113/JP270308

Batista, M. B., Romanzini, C., Castro-Piñero, J., & Ronque, E. (2017). Validity Of Field Tests To Estimate Cardiorespiratory Fitness In Children And Adolescents: A Systematic Review. Validade De Testes De Campo Para Estimativa Da Aptidão Cardiorrespiratória Em Crianças E Adolescentes: Uma Revisão Sistemática. Revista paulista de pediatria : orgao oficial da Sociedade de Pediatria de Sao Paulo, 35(2), 222–233. https://doi.org/10.1590/1984-0462/;2017;35;2;00002

Beltrami, F. G., Wong, d., & Noakes, T. D. (2014). High prevalence of false-positive plateau phenomena during VO2max testing in adolescents. Journal of science and medicine in sport, 17(5), 526–530. https://doi.org/10.1016/j.jsams.2013.07.012

Berntsen, S., Edvardsen, E., Gerbi, S., Kolsgaard, M. L., & Anderssen, S. A. (2019). Do Obese Children Achieve Maximal Heart Rate during Treadmill Running?. Sports (Basel, Switzerland), 7(1), 26. https://doi.org/10.3390/sports7010026

Bhammar, D. M., Stickford, J. L., Bernhardt, V., & Babb, T. G. (2017). Verification of Maximal Oxygen Uptake in Obese and Nonobese Children. Medicine and science in sports and exercise, 49(4), 702–710. https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001170

Blakemore, V. J., Fink, P. W., Lark, S. D., & Shultz, S. P. (2013). Mass affects lower extremity muscle activity patterns in children's gait. Gait & posture, 38(4), 609–613. https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2013.02.002

Bokov, P., & Delclaux, C. (2019). Impact fonctionnel respiratoire de l'obésité [The impact of obesity on respiratory function]. Revue des maladies respiratoires, 36(9), 1057–1063. https://doi.org/10.1016/j.rmr.2019.07.009

Boone, J., Barstow, T. J., Celie, B., Prieur, F., & Bourgois, J. (2015). The impact of pedal rate on muscle oxygenation, muscle activation and whole-body VO_2 during ramp exercise in healthy subjects. European journal of applied physiology, 115(1), 57–70. https://doi.org/10.1007/s00421-014-2991-x

Boone, J., Barstow, T. J., Celie, B., Prieur, F., & Bourgois, J. (2016). The interrelationship between muscle oxygenation, muscle activation, and pulmonary oxygen uptake to incremental ramp exercise: influence of aerobic fitness. Applied physiology, nutrition, and metabolism = Physiologie appliquee, nutrition et metabolisme, 41(1), 55–62. https://doi.org/10.1139/apnm-2015-0261

Boone, J., Koppo, K., Barstow, T. J., & Bouckaert, J. (2009). Pattern of deoxy[Hb+Mb] during ramp cycle exercise: influence of aerobic fitness status. European journal of applied physiology, 105(6), 851–859. https://doi.org/10.1007/s00421-008-0969-2

Borg G. A. (1982). Psychophysical bases of perceived exertion. Medicine and science in sports and exercise, 14(5), 377–381. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/7154893/

Bovet, P., Auguste, R., & Burdette, H. (2007). Strong inverse association between physical fitness and overweight in adolescents: a large school-based survey. The international journal of behavioral nutrition and physical activity, 4, 24. https://doi.org/10.1186/1479-5868-4-24

Breithaupt, P. G., Colley, R. C., & Adamo, K. B. (2012). Using the oxygen uptake efficiency slope as an indicator of cardiorespiratory fitness in the obese pediatric population. Pediatric exercise science, 24(3), 357–368. https://doi.org/10.1123/pes.24.3.357

Breithaupt, P., Adamo, K. B., & Colley, R. C. (2012). The HALO submaximal treadmill protocol to measure cardiorespiratory fitness in obese children and youth: a proof of principle study. Applied physiology, nutrition, and metabolism = Physiologie appliquee, nutrition et metabolisme, 37(2), 308–314. https://doi.org/10.1139/h2012-003

Bruce, R. A., Kusumi, F., & Hosmer, D. (1973). Maximal oxygen intake and nomographic assessment of functional aerobic impairment in cardiovascular disease. American heart journal, 85(4), 546–562. https://doi.org/10.1016/0002-8703(73)90502-4

Buchan, D. S., Young, J. D., Boddy, L. M., Malina, R. M., & Baker, J. S. (2013). Fitness and adiposity are independently associated with cardiometabolic risk in youth. BioMed research international, 2013, 261698. https://doi.org/10.1155/2013/261698

Buchheit, M., Haydar, B., Hader, K., Ufland, P., & Ahmaidi, S. (2011). Assessing running economy during field running with changes of direction: application to 20 m shuttle runs. International journal of sports physiology and performance, 6(3), 380–395. https://doi.org/10.1123/ijspp.6.3.380

Buchheit, M., Haydar, B., Hader, K., Ufland, P., & Ahmaidi, S. (2011). Assessing running economy during field running with changes of direction: application to 20 m shuttle runs. International journal of sports physiology and performance, 6(3), 380–395. https://doi.org/10.1123/ijspp.6.3.380

Bucksch, J., Sigmundova, D., Hamrik, Z., Troped, P. J., Melkevik, O., Ahluwalia, N., Borraccino, A., Tynjälä, J., Kalman, M., & Inchley, J. (2016). International Trends in Adolescent Screen-Time Behaviors From 2002 to 2010. The Journal of adolescent health : official publication of the Society for Adolescent Medicine, 58(4), 417–425. https://doi.org/10.1016/j.jadohealth.2015.11.014

Carson, V., Hunter, S., Kuzik, N., Gray, C. E., Poitras, V. J., Chaput, J. P., Saunders, T. J., Katzmarzyk, P. T., Okely, A. D., Connor Gorber, S., Kho, M. E., Sampson, M., Lee, H., & Tremblay, M. S. (2016). Systematic review of sedentary behaviour and health indicators in school-aged children and youth: an update. Applied physiology, nutrition, and metabolism = Physiologie appliquee, nutrition et metabolisme, 41(6 Suppl 3), S240–S265. https://doi.org/10.1139/apnm-2015-0630

Carvalho, H. M., Milano, G. E., Lopes, W. A., Figueiredo, A. J., Radominski, R. B., & Leite, N. (2013). Peak oxygen uptake responses to training in obese adolescents: a multilevel allometric framework to partition the influence of body size and maturity status. BioMed research international, 2013, 618595. https://doi.org/10.1155/2013/618595

Casey, D. P., & Joyner, M. J. (2011). Local control of skeletal muscle blood flow during exercise: influence of available oxygen. Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985), 111(6), 1527–1538. https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00895.2011

Castro-Piñeiro, J., Ortega, F. B., Keating, X. D., González-Montesinos, J. L., Sjöstrom, M., & Ruiz, J. R. (2011). Percentile values for aerobic performance running/walking field tests in children aged 6 to 17 years: influence of weight status. Nutricion hospitalaria, 26(3), 572–578. https://doi.org/10.1590/S0212-16112011000300021

Castro-Piñero, J., González-Montesinos, J. L., Mora, J., Keating, X. D., Girela-Rejón, M. J., Sjöström, M., & Ruiz, J. R. (2009). Percentile values for muscular strength field tests in children aged 6 to 17 years: influence of weight status. Journal of strength and conditioning research, 23(8), 2295–2310. https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181b8d5c1

Castro-Piñero, J., Perez-Bey, A., Segura-Jiménez, V., Aparicio, V. A., Gómez-Martínez, S., Izquierdo-Gomez, R., Marcos, A., Ruiz, J. R., & UP&DOWN Study Group (2017). Cardiorespiratory Fitness Cutoff Points for Early Detection of Present and Future Cardiovascular Risk in Children: A 2-Year Follow-up Study. Mayo Clinic proceedings, 92(12), 1753–1762. https://doi.org/10.1016/j.mayocp.2017.09.003

Chima, L., Mulrooney, H. M., Warren, J., & Madden, A. M. (2020). A systematic review and quantitative analysis of resting energy expenditure prediction equations in healthy overweight and obese children and adolescents. Journal of human nutrition and dietetics : the official journal of the British Dietetic Association, 33(3), 373–385. https://doi.org/10.1111/jhn.12735

Chlif, M., Temfemo, A., Keochkerian, D., Choquet, D., Chaouachi, A., & Ahmaidi, S. (2015). Advanced Mechanical Ventilatory Constraints During Incremental Exercise in Class III Obese Male Subjects. Respiratory care, 60(4), 549–560. https://doi.org/10.4187/respcare.03206

Cicone, Z. S., Holmes, C. J., Fedewa, M. V., MacDonald, H. V., & Esco, M. R. (2019). Age-Based Prediction of Maximal Heart Rate in Children and Adolescents: A Systematic Review and Meta-Analysis. Research quarterly for exercise and sport, 90(3), 417–428. https://doi.org/10.1080/02701367.2019.1615605

Cole, T. J., & Lobstein, T. (2012). Extended international (IOTF) body mass index cut-offs for thinness, overweight and obesity. Pediatric obesity, 7(4), 284–294. https://doi.org/10.1111/j.2047-6310.2012.00064.x

Compher, C., Frankenfield, D., Keim, N., Roth-Yousey, L., & Evidence Analysis Working Group (2006). Best practice methods to apply to measurement of resting metabolic

rate in adults: a systematic review. Journal of the American Dietetic Association, 106(6), 881–903. https://doi.org/10.1016/j.jada.2006.02.009

Craig, J. C., Broxterman, R. M., Wilcox, S. L., Chen, C., & Barstow, T. J. (2017). Effect of adipose tissue thickness, muscle site, and sex on near-infrared spectroscopy derived total-[hemoglobin + myoglobin]. Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985), 123(6), 1571–1578. https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00207.2017

Cureton, K. J., Sloniger, M. A., O'Bannon, J. P., Black, D. M., & McCormack, W. P. (1995). A generalized equation for prediction of VO2peak from 1-mile run/walk performance. Medicine and science in sports and exercise, 27(3), 445–451. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/7752874/

Davis, M. L., & Barstow, T. J. (2013). Estimated contribution of hemoglobin and myoglobin to near infrared spectroscopy. Respiratory physiology & neurobiology, 186(2), 180–187. https://doi.org/10.1016/j.resp.2013.01.012

Day, J. R., Rossiter, H. B., Coats, E. M., Skasick, A., & Whipp, B. J. (2003). The maximally attainabVO2 during exercise in humans: the peak vs. maximum issue. Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985), 95(5), 1901–1907. https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00024.2003

De Blasi, R. A., Quaglia, E., & Ferrari, M. (1991). Skeletal muscle oxygenation monitoring by near infrared spectroscopy. Biochemistry international, 25(2), 241–248. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/1789791/

de Onis, M., Onyango, A. W., Borghi, E., Siyam, A., Nishida, C., & Siekmann, J. (2007). Development of a WHO growth reference for school-aged children and adolescents. Bulletin of the World Health Organization, 85(9), 660–667. https://doi.org/10.2471/blt.07.043497

de Onis, M., Onyango, A. W., Borghi, E., Siyam, A., Nishida, C., & Siekmann, J. (2007). Development of a WHO growth reference for school-aged children and adolescents. Bulletin of the World Health Organization, 85(9), 660–667. https://doi.org/10.2471/blt.07.043497

de Sá Pinto, A. L., de Barros Holanda, P. M., Radu, A. S., Villares, S. M., & Lima, F. R. (2006). Musculoskeletal findings in obese children. Journal of paediatrics and child health, 42(6), 341–344. https://doi.org/10.1111/j.1440-1754.2006.00869.x

Deforche, B., Lefevre, J., De Bourdeaudhuij, I., Hills, A. P., Duquet, W., & Bouckaert, J. (2003). Physical fitness and physical activity in obese and nonobese Flemish youth. Obesity research, 11(3), 434–441. https://doi.org/10.1038/oby.2003.59

Delextrat, A., Matthew, D., & Brisswalter, J. (2015). Exercise training modifies walking kinematics and energy cost in obese adolescents: A pilot controlled trial. European journal of sport science, 15(8), 727–735. https://doi.org/10.1080/17461391.2015.1061058

di Prampero P. E. (1986). The energy cost of human locomotion on land and in water. International journal of sports medicine, 7(2), 55–72. https://doi.org/10.1055/s-2008-1025736

Dinh Xuan, A. T., Marsac, J., & Lockhart, A. (1988). L'asthme post-exercice [Exercise-induced asthma]. Presse medicale (Paris, France : 1983), 17(44), 2348–2353. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/2905456/

Dupont, G., Blondel, N., & Berthoin, S. (2003). Performance for short intermittent runs: active recovery vs. passive recovery. European journal of applied physiology, 89(6), 548–554. https://doi.org/10.1007/s00421-003-0834-2

Ellestad, M. H., Allen, W., Wan, M. C., & Kemp, G. L. (1969). Maximal treadmill stress testing for cardiovascular evaluation. Circulation, 39(4), 517–522. https://doi.org/10.1161/01.cir.39.4.517

ESTEBAN (2015). Activité physique et sédentarité. URL : https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/nutrition-et-activite-physique/articles/les-resultats-de-l-etude-ESTEBAN-2014-2015

Étude nationale nutrition santé, ENNS (2006). Situation nutritionnelle en France en 2006 selon les indicateurs d'objectif et les repères du Programme national nutrition santé (PNNS).

Evans, C. A., Selvadurai, H., Baur, L. A., & Waters, K. A. (2014). Effects of obstructive sleep apnea and obesity on exercise function in children. Sleep, 37(6), 1103–1110. https://doi.org/10.5665/sleep.3770

Faria, A. G., Ribeiro, M. A., Marson, F. A., Schivinski, C. I., Severino, S. D., Ribeiro, J. D., & Barros Filho, A. A. (2014). Effect of exercise test on pulmonary function of obese adolescents. Jornal de pediatria, 90(3), 242–249. https://doi.org/10.1016/j.jped.2013.08.005

Fawkner, S., & Armstrong, N. (2003). Oxygen uptake kinetic response to exercise in children. Sports medicine (Auckland, N.Z.), 33(9), 651–669. https://doi.org/10.2165/00007256-200333090-00002

Ferrari, M., Cuenca-García, M., Valtueña, J., Moreno, L. A., Censi, L., González-Gross, M., Androutsos, O., Gilbert, C. C., Huybrechts, I., Dallongeville, J., Sjöström, M., Molnar, D., De Henauw, S., Gómez-Martínez, S., de Moraes, A. C., Kafatos, A., Widhalm, K., Leclercq, C., & HELENA Study Group (2015). Inflammation profile in overweight/obese adolescents in

Europe: an analysis in relation to iron status. European journal of clinical nutrition, 69(2), 247–255. https://doi.org/10.1038/ejcn.2014.154

Ferreira, L. F., Koga, S., & Barstow, T. J. (2007). Dynamics of noninvasively estimated microvascular O2 extraction during ramp exercise. Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985), 103(6), 1999–2004. https://doi.org/10.1152/japplphysiol.01414.2006

Fillon, A., Miguet, M., O'Malley, G., Mathieu, M. E., Masurier, J., Julian, V., Cardenoux, C., Pereira, B., Rey, O., Duclos, M., Boirie, Y., & Thivel, D. (2020). Is the SPARTACUS 15-15 test an accurate proxy for the assessment and tracking of maximal aerobic capacities in adolescents with obesity?. Journal of physical therapy science, 32(4), 281–287. https://doi.org/10.1589/jpts.32.281

Fletcher I. (2014). Defining an epidemic: the body mass index in British and US obesity research 1960-2000. Sociology of health & illness, 36(3), 338–353. https://doi.org/10.1111/1467-9566.12050

Fontana, F. Y., Keir, D. A., Bellotti, C., De Roia, G. F., Murias, J. M., & Pogliaghi, S. (2015). Determination of respiratory point compensation in healthy adults: Can non-invasive near-infrared spectroscopy help?. Journal of science and medicine in sport, 18(5), 590–595. https://doi.org/10.1016/j.jsams.2014.07.016

Gandevia S. C. (2001). Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. Physiological reviews, 81(4), 1725–1789. https://doi.org/10.1152/physrev.2001.81.4.1725

García-Hermoso, A., Cerrillo-Urbina, A. J., Herrera-Valenzuela, T., Cristi-Montero, C., Saavedra, J. M., & Martínez-Vizcaíno, V. (2016). Is high-intensity interval training more effective on improving cardiometabolic risk and aerobic capacity than other forms of exercise in overweight and obese youth? A meta-analysis. Obesity reviews : an official journal of the International Association for the Study of Obesity, 17(6), 531–540. https://doi.org/10.1111/obr.12395

Garcia-Vicencio, S., Martin, V., Kluka, V., Cardenoux, C., Jegu, A. G., Fourot, A. V., Coudeyre, E., & Ratel, S. (2015). Obesity-related differences in neuromuscular fatigue in adolescent girls. European journal of applied physiology, 115(11), 2421–2432. https://doi.org/10.1007/s00421-015-3222-9

Gentier, I., D'Hondt, E., Shultz, S., Deforche, B., Augustijn, M., Hoorne, S., Verlaecke, K., De Bourdeaudhuij, I., & Lenoir, M. (2013). Fine and gross motor skills differ between healthy-weight and obese children. Research in developmental disabilities, 34(11), 4043–4051. https://doi.org/10.1016/j.ridd.2013.08.040

Gentier, I., D'Hondt, E., Shultz, S., Deforche, B., Augustijn, M., Hoorne, S., Verlaecke, K., De Bourdeaudhuij, I., & Lenoir, M. (2013). Fine and gross motor skills differ between healthy-weight and obese children. Research in developmental disabilities, 34(11), 4043–4051. https://doi.org/10.1016/j.ridd.2013.08.040

Gibson, N., Johnston, K., Bear, N., Stick, S., Logie, K., & Hall, G. L. (2014). Expiratory flow limitation and breathing strategies in overweight adolescents during submaximal exercise. International journal of obesity (2005), 38(1), 22–26. https://doi.org/10.1038/ijo.2013.137

Goran, M., Fields, D. A., Hunter, G. R., Herd, S. L., & Weinsier, R. L. (2000). Total body fat does not influence maximal aerobic capacity. International journal of obesity and related metabolic disorders : journal of the International Association for the Study of Obesity, 24(7), 841–848. https://doi.org/10.1038/sj.ijo.0801241

Goran, M., Fields, D. A., Hunter, G. R., Herd, S. L., & Weinsier, R. L. (2000). Total body fat does not influence maximal aerobic capacity. International journal of obesity and related metabolic disorders : journal of the International Association for the Study of Obesity, 24(7), 841–848. https://doi.org/10.1038/sj.ijo.0801241

Grassi, B., & Quaresima, V. (2016). Near-infrared spectroscopy and skeletal muscle oxidative function in vivo in health and disease: a review from an exercise physiology perspective. Journal of biomedical optics, 21(9), 091313. https://doi.org/10.1117/1.JBO.21.9.091313

Grassi, B., & Quaresima, V. (2016). Near-infrared spectroscopy and skeletal muscle oxidative function in vivo in health and disease: a review from an exercise physiology perspective. Journal of biomedical optics, 21(9), 091313. https://doi.org/10.1117/1.JBO.21.9.091313

Grassi, B., Quaresima, V., Marconi, C., Ferrari, M., & Cerretelli, P. (1999). Blood lactate accumulation and muscle deoxygenation during incremental exercise. Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985), 87(1), 348–355. https://doi.org/10.1152/jappl.1999.87.1.348

Guthold, R., Stevens, G. A., Riley, L. M., & Bull, F. C. (2020). Global trends in insufficient physical activity among adolescents: a pooled analysis of 298 population-based surveys with 1·6 million participants. The Lancet. Child & adolescent health, 4(1), 23–35. https://doi.org/10.1016/S2352-4642(19)30323-2

Gutin, B., Barbeau, P., Owens, S., Lemmon, C. R., Bauman, M., Allison, J., Kang, H. S., & Litaker, M. S. (2002). Effects of exercise intensity on cardiovascular fitness, total body

composition, and visceral adiposity of obese adolescents. The American journal of clinical nutrition, 75(5), 818–826. https://doi.org/10.1093/ajcn/75.5.818

Gutin, B., Barbeau, P., Owens, S., Lemmon, C. R., Bauman, M., Allison, J., Kang, H. S., & Litaker, M. S. (2002). Effects of exercise intensity on cardiovascular fitness, total body composition, and visceral adiposity of obese adolescents. The American journal of clinical nutrition, 75(5), 818–826. https://doi.org/10.1093/ajcn/75.5.818

Hamada, T., Sale, D. G., MacDougall, J. D., & Tarnopolsky, M. A. (2003). Interaction of fibre type, potentiation and fatigue in human knee extensor muscles. Acta physiologica Scandinavica, 178(2), 165–173. https://doi.org/10.1046/j.1365-201X.2003.01121.x

Hatamoto, Y., Yamada, Y., Sagayama, H., Higaki, Y., Kiyonaga, A., & Tanaka, H. (2014). The relationship between running velocity and the energy cost of turning during running. PloS one, 9(1), e81850. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0081850

Hermand, E., Cassirame, J., Ennequin, G., & Hue, O. (2019). Validation of a Photoplethysmographic Heart Rate Monitor: Polar OH1. International journal of sports medicine, 40(7), 462–467. https://doi.org/10.1055/a-0875-4033

Hiroyuki, H., Hamaoka, T., Sako, T., Nishio, S., Kime, R., Murakami, M., & Katsumura, T. (2002). Oxygenation in vastus lateralis and lateral head of gastrocnemius during treadmill walking and running in humans. European journal of applied physiology, 87(4-5), 343–349. https://doi.org/10.1007/s00421-002-0644-y

Homma, S., Fukunaga, T., & Kagaya, A. (1996). Influence of adipose tissue thickness on near infrared spectroscopic signal in the measurement of human muscle. Journal of biomedical optics, 1(4), 418–424. https://doi.org/10.1117/12.252417

Homma, S., Fukunaga, T., & Kagaya, A. (1996). Influence of adipose tissue thickness on near infrared spectroscopic signal in the measurement of human muscle. Journal of biomedical optics, 1(4), 418–424. https://doi.org/10.1117/12.252417

Howley, E. T., Bassett, D. R., Jr, & Welch, H. G. (1995). Criteria for maximal oxygen uptake: review and commentary. Medicine and science in sports and exercise, 27(9), 1292–1301.

Hunter, G. R., McCarthy, J. P., Bryan, D. R., Zuckerman, P. A., Bamman, M. M., & Byrne, N. M. (2008). Increased strength and decreased flexibility are related to reduced oxygen cost of walking. European journal of applied physiology, 104(5), 895–901. https://doi.org/10.1007/s00421-008-0846-z

Iannetta, D., Qahtani, A., Mattioni Maturana, F., & Murias, J. M. (2017). The near-infrared spectroscopy-derived deoxygenated haemoglobin breaking-point is a repeatable

measure that demarcates exercise intensity domains. Journal of science and medicine in sport, 20(9), 873–877. https://doi.org/10.1016/j.jsams.2017.01.237

Imboden, M. T., Kaminsky, L. A., Peterman, J. E., Hutzler, H. L., Whaley, M. H., Fleenor, B. S., & Harber, M. P. (2020). Cardiorespiratory Fitness Normalized to Fat-Free Mass and Mortality Risk. Medicine and science in sports and exercise, 52(7), 1532–1537. https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000002289

Imboden, M. T., Kaminsky, L. A., Peterman, J. E., Hutzler, H. L., Whaley, M. H., Fleenor, B. S., & Harber, M. P. (2020). Cardiorespiratory Fitness Normalized to Fat-Free Mass and Mortality Risk. Medicine and science in sports and exercise, 52(7), 1532–1537. https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000002289

Inglis, E. C., Iannetta, D., & Murias, J. M. (2017). The plateau in the NIRS-derived [HHb] signal near the end of a ramp incremental test does not indicate the upper limit of O2 extraction in the vastus lateralis. American journal of physiology. Regulatory, integrative and comparative physiology, 313(6), R723–R729. https://doi.org/10.1152/ajpregu.00261.2017

Inselma, L. S., Milanese, A., & Deurloo, A. (1993). Effect of obesity on pulmonary function in children. Pediatric pulmonology, 16(2), 130–137. https://doi.org/10.1002/ppul.1950160209

Inselma, L. S., Milanese, A., & Deurloo, A. (1993). Effect of obesity on pulmonary function in children. Pediatric pulmonology, 16(2), 130–137. https://doi.org/10.1002/ppul.1950160209

Janssen, A., Leahy, A. A., Diallo, T., Smith, J. J., Kennedy, S. G., Eather, N., Mavilidi, M. F., Wagemakers, A., Babic, M. J., & Lubans, D. R. (2020). Cardiorespiratory fitness, muscular fitness and mental health in older adolescents: A multi-level cross-sectional analysis. Preventive medicine, 132, 105985. https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2020.105985

Johansson, L., Brissman, M., Morinder, G., Westerståhl, M., & Marcus, C. (2020). Reference values and secular trends for cardiorespiratory fitness in children and adolescents with obesity. Acta paediatrica (Oslo, Norway : 1992), 109(8), 1665–1671. https://doi.org/10.1111/apa.15163

Julian, V., Thivel, D., Pereira, B., Costes, F., Richard, R., & Duclos, M. (2016). Improving Peripheral and Central Vascular Adjustments during Exercise through a Training Program in Adolescents with Obesity. Obesity facts, 9(5), 321–331. https://doi.org/10.1159/000447456

Katzmarzyk, P. T., Powell, K. E., Jakicic, J. M., Troiano, R. P., Piercy, K., Tennant, B., & 2018 PHYSICAL ACTIVITY GUIDELINES ADVISORY COMMITTEE* (2019).

Sedentary Behavior and Health: Update from the 2018 Physical Activity Guidelines Advisory Committee. Medicine and science in sports and exercise, 51(6), 1227–1241. https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001935

Keir, D. A., Fontana, F. Y., Robertson, T. C., Murias, J. M., Paterson, D. H., Kowalchuk, J. M., & Pogliaghi, S. (2015). Exercise Intensity Thresholds: Identifying the Boundaries of Sustainable Performance. Medicine and science in sports and exercise, 47(9), 1932–1940. https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000613

Kêkê, L. M., Samouda, H., Jacobs, J., di Pompeo, C., Lemdani, M., Hubert, H., Zitouni, D., & Guinhouya, B. C. (2015). Body mass index and childhood obesity classification systems: A comparison of the French, International Obesity Task Force (IOTF) and World Health Organization (WHO) references. Revue d'epidemiologie et de sante publique, 63(3), 173–182. https://doi.org/10.1016/j.respe.2014.11.003

Keys, A., Fidanza, F., Karvonen, M. J., Kimura, N., & Taylor, H. L. (2014). Indices of relative weight and obesity. International journal of epidemiology, 43(3), 655–665. https://doi.org/10.1093/ije/dyu058

Klijn, P. H., van der Baan-Slootweg, O. H., & van Stel, H. F. (2007). Aerobic exercise in adolescents with obesity: preliminary evaluation of a modular training program and the modified shuttle test. BMC pediatrics, 7, 19. https://doi.org/10.1186/1471-2431-7-19

Koga, S., Poole, D. C., Kondo, N., Oue, A., Ohmae, E., & Barstow, T. J. (2015). Effects of increased skin blood flow on muscle oxygenation/deoxygenation: comparison of time-resolved and continuous-wave near-infrared spectroscopy signals. European journal of applied physiology, 115(2), 335–343. https://doi.org/10.1007/s00421-014-3019-2

Kumar, S., & Kelly, A. S. (2017). Review of Childhood Obesity: From Epidemiology, Etiology, and Comorbidities to Clinical Assessment and Treatment. Mayo Clinic proceedings, 92(2), 251–265. https://doi.org/10.1016/j.mayocp.2016.09.017

Kumar, S., & Kelly, A. S. (2017). Review of Childhood Obesity: From Epidemiology, Etiology, and Comorbidities to Clinical Assessment and Treatment. Mayo Clinic proceedings, 92(2), 251–265. https://doi.org/10.1016/j.mayocp.2016.09.017

Kume, D., Iguchi, A., & Endoh, H. (2018). Onset of Accelerated Muscle Deoxygenation During the 20-m Shuttle Run Test in Boys. Pediatric exercise science, 30(4), 474–479. https://doi.org/10.1123/pes.2017-0210

Lang, J. E., Bunnell, H. T., Hossain, M. J., Wysocki, T., Lima, J. J., Finkel, T. H., Bacharier, L., Dempsey, A., Sarzynski, L., Test, M., & Forrest, C. B. (2018). Being Overweight

or Obese and the Development of Asthma. Pediatrics, 142(6), e20182119. https://doi.org/10.1542/peds.2018-2119

Lang, J. E., Hossain, M. J., & Lima, J. J. (2015). Overweight children report qualitatively distinct asthma symptoms: analysis of validated symptom measures. The Journal of allergy and clinical immunology, 135(4), 886–893.e3. https://doi.org/10.1016/j.jaci.2014.08.029

Lang, J. J., Belanger, K., Poitras, V., Janssen, I., Tomkinson, G. R., & Tremblay, M. S. (2018). Systematic review of the relationship between 20m shuttle run performance and health indicators among children and youth. Journal of science and medicine in sport, 21(4), 383–397. https://doi.org/10.1016/j.jsams.2017.08.002

Lang, J. J., Tremblay, M. S., Ortega, F. B., Ruiz, J. R., & Tomkinson, G. R. (2019). Review of criterion-referenced standards for cardiorespiratory fitness: what percentage of 1 142 026 international children and youth are apparently healthy?. British journal of sports medicine, 53(15), 953–958. https://doi.org/10.1136/bjsports-2016-096955

Lascar, N., Brown, J., Pattison, H., Barnett, A. H., Bailey, C. J., & Bellary, S. (2018). Type 2 diabetes in adolescents and young adults. The lancet. Diabetes & endocrinology, 6(1), 69–80. https://doi.org/10.1016/S2213-8587(17)30186-9

Lazzer, S., Boirie, Y., Bitar, A., Petit, I., Meyer, M., & Vermorel, M. (2005). Relationship between percentage of VO2max and type of physical activity in obese and non-obese adolescents. The Journal of sports medicine and physical fitness, 45(1), 13–19. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16208285/

Lazzer, S., Salvadego, D., Porcelli, S., Rejc, E., Agosti, F., Sartorio, A., & Grassi, B. (2013). Skeletal muscle oxygen uptake in obese patients: functional evaluation by knee-extension exercise. European journal of applied physiology, 113(8), 2125–2132. https://doi.org/10.1007/s00421-013-2647-2

Léger, L. A., Mercier, D., Gadoury, C., & Lambert, J. (1988). The multistage 20 metre shuttle run test for aerobic fitness. Journal of sports sciences, 6(2), 93–101. https://doi.org/10.1080/02640418808729800

Legrand, R., Marles, A., Prieur, F., Lazzari, S., Blondel, N., & Mucci, P. (2007). Related trends in locomotor and respiratory muscle oxygenation during exercise. Medicine and science in sports and exercise, 39(1), 91–100. https://doi.org/10.1249/01.mss.0000241638.90348.67

Lukaski, H. C., Bolonchuk, W. W., & Klevay, L. M. (1989). Comparison of metabolic responses and oxygen cost during maximal exercise using three treadmill protocols. The Journal

of sports medicine and physical fitness, 29(3), 223–229. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/2635252/

Maciejczyk, M., Szymura, J., Cempla, J., Gradek, J., Więcek, M., & Bawelski, M. (2014). Respiratory compensation point during incremental test in overweight and normoweight boys: is it useful in assessing aerobic performance? A longitudinal study. Clinical physiology and functional imaging, 34(1), 56–63. https://doi.org/10.1111/cpf.12064

Malatesta, D., Simar, D., Dauvilliers, Y., Candau, R., Borrani, F., Prefaut, C., & Caillaud, C. (2003). Energy cost of walking and gait instability in healthy 65- and 80-yr-olds. Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985), 95(6), 2248–2256. https://doi.org/10.1152/japplphysiol.01106.2002

Marinov, B., Kostianev, S., & Turnovska, T. (2002). Ventilatory efficiency and rate of perceived exertion in obese and non-obese children performing standardized exercise. Clinical physiology and functional imaging, 22(4), 254–260. https://doi.org/10.1046/j.1475-097x.2002.00427.x

Marinov, B., Kostianev, S., & Turnovska, T. (2003). Modified treadmill protocol for evaluation of physical fitness in pediatric age group--comparison with Bruce and Balke protocols. Acta physiologica et pharmacologica Bulgarica, 27(2-3), 47–51. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/14570147/

Marinus, N., Bervoets, L., Massa, G., Verboven, K., Stevens, A., Takken, T., & Hansen, D. (2017). Altered gas-exchange at peak exercise in obese adolescents: implications for verification of effort during cardiopulmonary exercise testing. The Journal of sports medicine and physical fitness, 57(12), 1687–1694. https://doi.org/10.23736/S0022-4707.16.06607-X

Mark, A. E., & Janssen, I. (2008). Relationship between screen time and metabolic syndrome in adolescents. Journal of public health (Oxford, England), 30(2), 153–160. https://doi.org/10.1093/pubmed/fdn022

Martinez-Gomez, D., Ruiz, J. R., Ortega, F. B., Veiga, O. L., Moliner-Urdiales, D., Mauro, B., Galfo, M., Manios, Y., Widhalm, K., Béghin, L., Moreno, L. A., Molnar, D., Marcos, A., Sjöström, M., & HELENA Study Group (2010). Recommended levels of physical activity to avoid an excess of body fat in European adolescents: the HELENA Study. American journal of preventive medicine, 39(3), 203–211. https://doi.org/10.1016/j.amepre.2010.05.003

Martínez-López, E. J., De La Torre-Cruz, M. J., Suárez-Manzano, S., & Ruiz-Ariza, A. (2018). Analysis of the Effect Size of Overweight in Muscular Strength Tests Among Adolescents: Reference Values According to Sex, Age, and Body Mass Index. Journal of

strength and conditioning research, 32(5), 1404–1414. https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001967

Martin-Smith, R., Cox, A., Buchan, D. S., Baker, J. S., Grace, F., & Sculthorpe, N. (2020). High Intensity Interval Training (HIIT) Improves Cardiorespiratory Fitness (CRF) in Healthy, Overweight and Obese Adolescents: A Systematic Review and Meta-Analysis of Controlled Studies. International journal of environmental research and public health, 17(8), 2955. https://doi.org/10.3390/ijerph17082955

McCormack, W. P., Cureton, K. J., Bullock, T. A., & Weyand, P. G. (1991). Metabolic determinants of 1-mile run/walk performance in children. Medicine and science in sports and exercise, 23(5), 611–617. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/2072840/

McNarry, M. A., Farr, C., Middlebrooke, A., Welford, D., Breese, B., Armstrong, N., & Barker, A. R. (2015). Aerobic Function and Muscle Deoxygenation Dynamics during Ramp Exercise in Children. Medicine and science in sports and exercise, 47(9), 1877–1884. https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000609

Mendelson, M., Michallet, A. S., Estève, F., Perrin, C., Levy, P., Wuyam, B., & Flore, P. (2012). Ventilatory responses to exercise training in obese adolescents. Respiratory physiology & neurobiology, 184(1), 73–79. https://doi.org/10.1016/j.resp.2012.08.001

Mendelson, M., Michallet, A. S., Tonini, J., Favre-Juvin, A., Guinot, M., Wuyam, B., & Flore, P. (2016). Low Cardiorespiratory Fitness is Partially Linked to Ventilatory Factors in Obese Adolescents. Pediatric exercise science, 28(1), 87–97. https://doi.org/10.1123/pes.2013-0151

Mendoza-Muñoz, M., Adsuar, J. C., Pérez-Gómez, J., Muñoz-Bermejo, L., Garcia-Gordillo, M. Á., & Carlos-Vivas, J. (2020). Influence of Body Composition on Physical Fitness in Adolescents. Medicina (Kaunas, Lithuania), 56(7), 328. https://doi.org/10.3390/medicina56070328

Midgley, A. W., Marchant, D. C., & Levy, A. R. (2018). A call to action towards an evidence-based approach to using verbal encouragement during maximal exercise testing. Clinical physiology and functional imaging, 38(4), 547–553. https://doi.org/10.1111/cpf.12454

Midgley, A. W., McNaughton, L. R., Polman, R., & Marchant, D. (2007). Criteria for determination of maximal oxygen uptake: a brief critique and recommendations for future research. Sports medicine (Auckland, N.Z.), 37(12), 1019–1028. https://doi.org/10.2165/00007256-200737120-00002

Midgley, A. W., McNaughton, L. R., Polman, R., & Marchant, D. (2007). Criteria for determination of maximal oxygen uptake: a brief critique and recommendations for future

research. Sports medicine (Auckland, N.Z.), 37(12), 1019–1028. https://doi.org/10.2165/00007256-200737120-00002

Mirwald, R. L., Baxter-Jones, A. D., Bailey, D. A., & Beunen, G. P. (2002). An assessment of maturity from anthropometric measurements. Medicine and science in sports and exercise, 34(4), 689–694. https://doi.org/10.1097/00005768-200204000-00020

Moalla, W., Dupont, G., Berthoin, S., & Ahmaidi, S. (2005). Respiratory muscle deoxygenation and ventilatory threshold assessments using near infrared spectroscopy in children. International journal of sports medicine, 26(7), 576–582. https://doi.org/10.1055/s-2004-830332

Moran, C. A., Peccin, M. S., Bombig, M. T., Pereira, S. A., & Dal Corso, S. (2017). Performance and reproducibility on shuttle run test between obese and non-obese children: a cross-sectional study. BMC pediatrics, 17(1), 68. https://doi.org/10.1186/s12887-017-0825-9

Murias, J. M., Keir, D. A., Spencer, M. D., & Paterson, D. H. (2014). Sex-related differences in muscle deoxygenation during ramp incremental exercise: response to Peltonen et al. Respiratory physiology & neurobiology, 195, 61–62. https://doi.org/10.1016/j.resp.2014.01.010

Murias, J. M., Keir, D. A., Spencer, M. D., & Paterson, D. H. (2014). Sex-related differences in muscle deoxygenation during ramp incremental exercise: response to Peltonen et al. Respiratory physiology & neurobiology, 195, 61–62. https://doi.org/10.1016/j.resp.2014.01.010

Murias, J. M., Keir, D. A., Spencer, M. D., & Paterson, D. H. (2013). Sex-related differences in muscle deoxygenation during ramp incremental exercise. Respiratory physiology & neurobiology, 189(3), 530–536. https://doi.org/10.1016/j.resp.2013.08.011

Myers, J., & Bellin, D. (2000). Ramp exercise protocols for clinical and cardiopulmonary exercise testing. Sports medicine (Auckland, N.Z.), 30(1), 23–29. https://doi.org/10.2165/00007256-200030010-00003

Myers, J., & Bellin, D. (2000). Ramp exercise protocols for clinical and cardiopulmonary exercise testing. Sports medicine (Auckland, N.Z.), 30(1), 23–29. https://doi.org/10.2165/00007256-200030010-00003

Myers, J., Buchanan, N., Smith, D., Neutel, J., Bowes, E., Walsh, D., & Froelicher, V. F. (1992). Individualized ramp treadmill. Observations on a new protocol. Chest, 101(5 Suppl), 236S–241S. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/1576842/

Myers, J., Walsh, D., Sullivan, M., & Froelicher, V. (1990). Effect of sampling on variability and plateau in oxygen uptake. Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985), 68(1), 404–410. https://doi.org/10.1152/jappl.1990.68.1.404

Nadeau, K. J., Zeitler, P. S., Bauer, T. A., Brown, M. S., Dorosz, J. L., Draznin, B., Reusch, J. E., & Regensteiner, J. G. (2009). Insulin resistance in adolescents with type 2 diabetes is associated with impaired exercise capacity. The Journal of clinical endocrinology and metabolism, 94(10), 3687–3695. https://doi.org/10.1210/jc.2008-2844

Nantel, J., Brochu, M., & Prince, F. (2006). Locomotor strategies in obese and non-obese children. Obesity (Silver Spring, Md.), 14(10), 1789–1794. https://doi.org/10.1038/oby.2006.206

Nassis, G. P., Psarra, G., & Sidossis, L. S. (2005). Central and total adiposity are lower in overweight and obese children with high cardiorespiratory fitness. European journal of clinical nutrition, 59(1), 137–141. https://doi.org/10.1038/sj.ejcn.1602061

Nemeth, B. A., Carrel, A. L., Eickhoff, J., Clark, R. R., Peterson, S. E., & Allen, D. B. (2009). Submaximal treadmill test predicts VO2max in overweight children. The Journal of pediatrics, 154(5), 677–681. https://doi.org/10.1016/j.jpeds.2008.11.032

Niemeyer, M., Bergmann, T., & Beneke, R. (2020). Oxygen uptake plateau: calculation artifact or physiological reality?. European journal of applied physiology, 120(1), 231–242. https://doi.org/10.1007/s00421-019-04267-7

Niemeyer, M., Bergmann, T., & Beneke, R. (2020). Oxygen uptake plateau: calculation artifact or physiological reality?. European journal of applied physiology, 120(1), 231–242. https://doi.org/10.1007/s00421-019-04267-7

Ninot, G., Fortes, M., & Delignières, D. (2006). Validation of a shortened assessment of physical self in adults. Perceptual and motor skills, 103(2), 531–542. https://doi.org/10.2466/pms.103.2.531-542

Noakes T. D. (1988). Implications of exercise testing for prediction of athletic performance: a contemporary perspective. Medicine and science in sports and exercise, 20(4), 319–330. https://doi.org/10.1249/00005768-198808000-00001

Noakes T. D. (2008). How did A V Hill understand the VO2max and the "plateau phenomenon"? Still no clarity?. British journal of sports medicine, 42(7), 574–580. https://doi.org/10.1136/bjsm.2008.046771

ObEpi (2003). 3ème enquête épidémiologique nationale sur l'obésité et le surpoids en France. https://www.mangerbouger.fr/pro/IMG/pdf/EtudeObepi_obesite.pdf

ObEpi-Roche (2012) Enquête épidémiologique nationale sur l'obésité et le surpoids Inserm / Kantar Health / Roche sur le site: groupe Roche. Dernière consultation le 10 mars 2021. http://www.roche.fr/content/dam/corporate/roche_fr/doc/obepi_2012.pdf

Obesity: preventing and managing the global epidemic. Report of a WHO consultation. (2000). World Health Organization technical report series, 894, i–253.

Olds, T., Maher, C., Zumin, S., Péneau, S., Lioret, S., Castetbon, K., Bellisle, de Wilde, J., Hohepa, M., Maddison, R., Lissner, L., Sjöberg, A., Zimmermann, M., Aeberli, I., Ogden, C., Flegal, K., & Summerbell, C. (2011). Evidence that the prevalence of childhood overweight is plateauing: data from nine countries. *International journal of pediatric obesity : IJPO : an official journal of the International Association for the Study of Obesity*, *6*(5-6), 342–360. https://doi.org/10.3109/17477166.2011.605895

OMS (2010) Stratégie mondiale pour l'alimentation, l'exercice physique et la santé. URL : https://www.who.int/dietphysicalactivity/factsheet_inactivity/fr/

OMS (2016). Rapport de la commission pour mettre fin à l'obésité de l'enfant. URL : https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/206451/9789242510065_fre.pdf;jsessionid=E9DD36C894BC7EB57AD063CA6996759D?sequence=1

ONAPS (2016). Bulletin trimestriel N° 1 sur la sédentarité (juin 2016). URL : http://www.onaps.fr/data/documents/Onaps_Bulletin1.pdf

Ortega, F. B., Lavie, C. J., & Blair, S. N. (2016). Obesity and Cardiovascular Disease. Circulation research, 118(11), 1752–1770. https://doi.org/10.1161/CIRCRESAHA.115.306883

Ortega, F. B., Ruiz, J. R., Castillo, M. J., & Sjöström, M. (2008). Physical fitness in childhood and adolescence: a powerful marker of health. International journal of obesity (2005), 32(1), 1–11. https://doi.org/10.1038/sj.ijo.0803774

Ortega, F. B., Ruiz, J. R., Hurtig-Wennlöf, A., Vicente-Rodríguez, G., Rizzo, N. S., Castillo, M. J., & Sjöström, M. (2010). Cardiovascular fitness modifies the associations between physical activity and abdominal adiposity in children and adolescents: the European Youth Heart Study. British journal of sports medicine, 44(4), 256–262. https://doi.org/10.1136/bjsm.2008.046391

Osawa, T., Kime, R., Hamaoka, T., Katsumura, T., & Yamamoto, M. (2011). Attenuation of muscle deoxygenation precedes EMG threshold in normoxia and hypoxia. Medicine and science in sports and exercise, 43(8), 1406–1413. https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3182100261

Paridon, S. M., Alpert, B. S., Boas, S. R., Cabrera, M. E., Caldarera, L. L., Daniels, S. R., Kimball, T. R., Knilans, T. K., Nixon, P. A., Rhodes, J., Yetman, A. T., & American Heart

Association Council on Cardiovascular Disease in the Young, Committee on Atherosclerosis, Hypertension, and Obesity in Youth (2006). Clinical stress testing in the pediatric age group: a statement from the American Heart Association Council on Cardiovascular Disease in the Young, Committee on Atherosclerosis, Hypertension, and Obesity in Youth. Circulation, 113(15), 1905–1920. https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.106.174375

Patikas, D. A., Williams, C. A., & Ratel, S. (2018). Exercise-induced fatigue in young people: advances and future perspectives. European journal of applied physiology, 118(5), 899–910. https://doi.org/10.1007/s00421-018-3823-1

Peyrot, N., Morin, J. B., Thivel, D., Isacco, L., Taillardat, M., Belli, A., & Duche, P. (2010). Mechanical work and metabolic cost of walking after weight loss in obese adolescents. Medicine and science in sports and exercise, 42(10), 1914–1922. https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181da8d1e

Peyrot, N., Thivel, D., Isacco, L., Morin, J. B., Belli, A., & Duche, P. (2012). Why does walking economy improve after weight loss in obese adolescents?. Medicine and science in sports and exercise, 44(4), 659–665. https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e318236edd8

Peyrot, N., Thivel, D., Isacco, L., Morin, J. B., Duche, P., & Belli, A. (2009). Do mechanical gait parameters explain the higher metabolic cost of walking in obese adolescents?. Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985), 106(6), 1763–1770. https://doi.org/10.1152/japplphysiol.91240.2008

Poole, D. C., & Jones, A. M. (2017). Measurement of the maximum oxygen uptake V̇o2max: V̇o2peak is no longer acceptable. Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985), 122(4), 997–1002. https://doi.org/10.1152/japplphysiol.01063.2016

Poole, D. C., & Jones, A. M. (2017). Measurement of the maximum oxygen uptake V̇o2max: V̇o2peak is no longer acceptable. Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985), 122(4), 997–1002. https://doi.org/10.1152/japplphysiol.01063.2016

Poole, D. C., & Richardson, R. S. (1997). Determinants of oxygen uptake. Implications for exercise testing. Sports medicine (Auckland, N.Z.), 24(5), 308–320. https://doi.org/10.2165/00007256-199724050-00003

Poole, D. C., Wilkerson, D. P., & Jones, A. M. (2008). Validity of criteria for establishing maximal O2 uptake during ramp exercise tests. European journal of applied physiology, 102(4), 403–410. https://doi.org/10.1007/s00421-007-0596-3

Poole, D. C., Wilkerson, D. P., & Jones, A. M. (2008). Validity of criteria for establishing maximal O2 uptake during ramp exercise tests. European journal of applied physiology, 102(4), 403–410. https://doi.org/10.1007/s00421-007-0596-3

Poole, D. C., Wilkerson, D. P., & Jones, A. M. (2008). Validity of criteria for establishing maximal O2 uptake during ramp exercise tests. European journal of applied physiology, 102(4), 403–410. https://doi.org/10.1007/s00421-007-0596-3

Prado, D. M., Silva, A. G., Trombetta, I. C., Ribeiro, M. M., Nicolau, C. M., Guazzelli, I. C., Matos, L. N., Negrao, C. E., & Villares, S. M. (2009). Weight loss associated with exercise training restores ventilatory efficiency in obese children. International journal of sports medicine, 30(11), 821–826. https://doi.org/10.1055/s-0029-1233486

Prince, S. A., Melvin, A., Roberts, K. C., Butler, G. P., & Thompson, W. (2020). Sedentary behaviour surveillance in Canada: trends, challenges and lessons learned. The international journal of behavioral nutrition and physical activity, 17(1), 34. https://doi.org/10.1186/s12966-020-00925-8

Quaresima, V., & Ferrari, M. (2009). Muscle oxygenation by near-infrared-based tissue oximeters. Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985), 107(1), 371–373. https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00215.2009

Quinart, S., Groslambert, A., Ecarnot, F., Simon-Rigaud, M. L., Nicolet-Guénat, M., Nègre, V., & Mougin, F. (2016). Validation of a new scale to measure perceived exertion in obese adolescents: the Childhood Obesity Perceived Exertion (Cope-10) Scale. The Journal of sports medicine and physical fitness, 56(9), 1013–1020. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26129916/

Quinart, S., Mougin, F., Simon-Rigaud, M. L., Nicolet-Guénat, M., Nègre, V., & Regnard, J. (2014). Evaluation of cardiorespiratory fitness using three field tests in obese adolescents: validity, sensitivity and prediction of peak VO2. Journal of science and medicine in sport, 17(5), 521–525. https://doi.org/10.1016/j.jsams.2013.07.010

Quinart, S., Mougin-Guillaume, F., Simon-Rigaud, M. L., Bertrand, A. M., & Nègre, V. (2010). Le sport pour les enfants en surpoids: comment conseiller efficacement? [Sports counseling for overweight children]. Archives de pediatrie : organe officiel de la Societe francaise de pediatrie, 17(6), 894–895. https://doi.org/10.1016/S0929-693X(10)70166-4

Racinais, S., Buchheit, M., & Girard, O. (2014). Breakpoints in ventilation, cerebral and muscle oxygenation, and muscle activity during an incremental cycling exercise. Frontiers in physiology, 5, 142. https://doi.org/10.3389/fphys.2014.00142

Rastogi D. (2018). Quantifying the Contribution of Obesity to Incident Childhood Asthma: It's About Time. Pediatrics, 142(6), e20182979. https://doi.org/10.1542/peds.2018-2979

Ratel, S., Duché, P., & Williams, C. A. (2006). Muscle fatigue during high-intensity exercise in children. Sports medicine (Auckland, N.Z.), 36(12), 1031–1065. https://doi.org/10.2165/00007256-200636120-00004

Ratel, S., Kluka, V., Vicencio, S. G., Jegu, A. G., Cardenoux, C., Morio, C., Coudeyre, E., & Martin, V. (2015). Insights into the Mechanisms of Neuromuscular Fatigue in Boys and Men. Medicine and science in sports and exercise, 47(11), 2319–2328. https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000697

Ratel, S., Kluka, V., Vicencio, S. G., Jegu, A. G., Cardenoux, C., Morio, C., Coudeyre, E., & Martin, V. (2015). Insights into the Mechanisms of Neuromuscular Fatigue in Boys and Men. Medicine and science in sports and exercise, 47(11), 2319–2328. https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000697

Redline, S., Tishler, P. V., Schluchter, M., Aylor, J., Clark, K., & Graham, G. (1999). Risk factors for sleep-disordered breathing in children. Associations with obesity, race, and respiratory problems. American journal of respiratory and critical care medicine, 159(5 Pt 1), 1527–1532. https://doi.org/10.1164/ajrccm.159.5.9809079

Rey O., Rossi D., Nicol C., Mercier C.-S., Vallier J.-M., Maïano C. (2013). Évaluation indirecte de la capacité aérobie d'adolescents obèses : intérêt d'un test de course à pied intermittent court, progressif et maximal. Science & Sports, Elsevier 2013, 28 (5), pp.e133-e139. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0765159713000592

Rey, O., Maïano, C., Nicol, C., Mercier, C. S., & Vallier, J. M. (2016). Psycho-Physiological Responses of Obese Adolescents to an Intermittent Run Test Compared with a 20-M Shuttle Run. Journal of sports science & medicine, 15(3), 451–459. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27803623/

Rey, O., Vallier, J. M., Nicol, C., Mercier, C. S., & Maïano, C. (2017). Effects of Combined Vigorous Interval Training Program and Diet on Body Composition, Physical Fitness, and Physical Self-Perceptions Among Obese Adolescent Boys and Girls. Pediatric exercise science, 29(1), 73–83. https://doi.org/10.1123/pes.2016-0105

Richardson, R. S., Grassi, B., Gavin, T. P., Haseler, L. J., Tagore, K., Roca, J., & Wagner, P. D. (1999). Evidence of O2 supply-dependent VO2 max in the exercise-trained human quadriceps. Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985), 86(3), 1048–1053. https://doi.org/10.1152/jappl.1999.86.3.1048

Riebe, D., Franklin, B. A., Thompson, P. D., Garber, C. E., Whitfield, G. P., Magal, M., & Pescatello, L. S. (2015). Updating ACSM's Recommendations for Exercise Preparticipation

Health Screening. Medicine and science in sports and exercise, 47(11), 2473–2479. https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000664

Robertson, R. J., Goss, F. L., Boer, N. F., Peoples, J. A., Foreman, A. J., Dabayebeh, I. M., Millich, N. B., Balasekaran, G., Riechman, S. E., Gallagher, J. D., & Thompkins, T. (2000). Children's OMNI scale of perceived exertion: mixed gender and race validation. Medicine and science in sports and exercise, 32(2), 452–458. https://doi.org/10.1097/00005768-200002000-00029

Rolland-Cachera M. F. (2012). Towards a simplified definition of childhood obesity? A focus on the extended IOTF references. Pediatric obesity, 7(4), 259–260. https://doi.org/10.1111/j.2047-6310.2012.00077.x

Rolland-Cachera, M. F., Cole, T. J., Sempé, M., Tichet, J., Rossignol, C., & Charraud, A. (1991). Body Mass Index variations: centiles from birth to 87 years. European journal of clinical nutrition, 45(1), 13–21.

Rolland-Cachera, M. F., Deheeger, M., Maillot, M., & Bellisle, F. (2006). Early adiposity rebound: causes and consequences for obesity in children and adults. International journal of obesity (2005), 30 Suppl 4, S11–S17. https://doi.org/10.1038/sj.ijo.0803514

Rolland-Cachera, M. F., Deheeger, M., Maillot, M., & Bellisle, F. (2006). Early adiposity rebound: causes and consequences for obesity in children and adults. International journal of obesity (2005), 30 Suppl 4, S11–S17. https://doi.org/10.1038/sj.ijo.0803514

Rosenbaum, M., Vandenborne, K., Goldsmith, R., Simoneau, J. A., Heymsfield, S., Joanisse, D. R., Hirsch, J., Murphy, E., Matthews, D., Segal, K. R., & Leibel, R. L. (2003). Effects of experimental weight perturbation on skeletal muscle work efficiency in human subjects. American journal of physiology. Regulatory, integrative and comparative physiology, 285(1), R183–R192. https://doi.org/10.1152/ajpregu.00474.2002

Rowland, T. W., & Cunningham, L. N. (1992). Oxygen uptake plateau during maximal treadmill exercise in children. Chest, 101(2), 485–489. https://doi.org/10.1378/chest.101.2.485

Ruiz, J. R., Castro-Piñero, J., Artero, E. G., Ortega, F. B., Sjöström, M., Suni, J., & Castillo, M. J. (2009). Predictive validity of health-related fitness in youth: a systematic review. British journal of sports medicine, 43(12), 909–923. https://doi.org/10.1136/bjsm.2008.056499

Ruiz, J. R., Castro-Piñero, J., Artero, E. G., Ortega, F. B., Sjöström, M., Suni, J., & Castillo, M. J. (2009). Predictive validity of health-related fitness in youth: a systematic review. British journal of sports medicine, 43(12), 909–923. https://doi.org/10.1136/bjsm.2008.056499

Ruiz, J. R., Cavero-Redondo, I., Ortega, F. B., Welk, G. J., Andersen, L. B., & Martinez-Vizcaino, V. (2016). Cardiorespiratory fitness cut points to avoid cardiovascular disease risk in

children and adolescents; what level of fitness should raise a red flag? A systematic review and meta-analysis. British journal of sports medicine, 50(23), 1451–1458. https://doi.org/10.1136/bjsports-2015-095903

Ruiz, J. R., Rizzo, N. S., Hurtig-Wennlöf, A., Ortega, F. B., Wärnberg, J., & Sjöström, M. (2006). Relations of total physical activity and intensity to fitness and fatness in children: the European Youth Heart Study. The American journal of clinical nutrition, 84(2), 299–303. https://doi.org/10.1093/ajcn/84.1.299

Sansum, K. M., Weston, M. E., Bond, B., Cockcroft, E. J., O'Connor, A., Tomlinson, O. W., Williams, C. A., & Barker, A. R. (2019). Validity of the Supramaximal Test to Verify Maximal Oxygen Uptake in Children and Adolescents. Pediatric exercise science, 31(2), 213–222. https://doi.org/10.1123/pes.2018-0129

Santana, M., Kliszczewicz, B., Vanderlei, F. M., Monteiro, L., Martiniano, E. C., de Moraes, Y. M., Mangueira, L. B., Alcantara, G. C., da Silva, J., Benjamim, C., Oliveira, F. R., & Valenti, V. E. (2019). Autonomic responses induced by aerobic submaximal exercise in obese and overweight adolescents. Cardiology in the young, 29(2), 169–173. https://doi.org/10.1017/S1047951118002007

Saunders, T. J., Chaput, J. P., & Tremblay, M. S. (2014). Sedentary behaviour as an emerging risk factor for cardiometabolic diseases in children and youth. Canadian journal of diabetes, 38(1), 53–61. https://doi.org/10.1016/j.jcjd.2013.08.266

Scholkmann, F., Kleiser, S., Metz, A. J., Zimmermann, R., Mata Pavia, J., Wolf, U., & Wolf, M. (2014). A review on continuous wave functional near-infrared spectroscopy and imaging instrumentation and methodology. NeuroImage, 85 Pt 1, 6–27. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.05.004

Sheehan K., Gormley J. (2012). Gait and increased body weight (potential implications for musculoskeletal disease). Physical Therapy Reviews, 17(2), 91-98. https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1179/1743288X11Y.0000000057?journalCode=yptr20

Smith, S. K., & Perito, E. R. (2018). Nonalcoholic Liver Disease in Children and Adolescents. Clinics in liver disease, 22(4), 723–733. https://doi.org/10.1016/j.cld.2018.07.001

Soares, R. N., & Murias, J. M. (2018). Near-infrared spectroscopy assessment of microvasculature detects difference in lower limb vascular responsiveness in obese compared to lean individuals. Microvascular research, 118, 31–35. https://doi.org/10.1016/j.mvr.2018.01.008

Spencer, M. D., Murias, J. M., & Paterson, D. H. (2012). Characterizing the profile of muscle deoxygenation during ramp incremental exercise in young men. European journal of applied physiology, 112(9), 3349–3360. https://doi.org/10.1007/s00421-012-2323-y

Spinks, A. B., Macpherson, A. K., Bain, C., & McClure, R. J. (2007). Compliance with the Australian national physical activity guidelines for children: relationship to overweight status. Journal of science and medicine in sport, 10(3), 156–163. https://doi.org/10.1016/j.jsams.2006.06.008

Steimers, A., Vafiadou, M., Koukourakis, G., Geraskin, D., Neary, P., & Kohl-Bareis, M. (2016). Muscle Oxygenation During Running Assessed by Broad Band NIRS. Advances in experimental medicine and biology, 876, 41–47. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3023-4_5

Stoner, L., Pontzer, H., Barone Gibbs, B., Moore, J. B., Castro, N., Skidmore, P., Lark, S., Williams, M. A., Hamlin, M. J., & Faulkner, J. (2020). Fitness and Fatness Are Both Associated with Cardiometabolic Risk in Preadolescents. The Journal of pediatrics, 217, 39–45.e1. https://doi.org/10.1016/j.jpeds.2019.09.076

Strutzenberger, G., Alexander, N., Bamboschek, D., Claas, E., Langhof, H., & Schwameder, H. (2017). Uphill walking: Biomechanical demand on the lower extremities of obese adolescents. Gait & posture, 54, 20–26. https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.02.013

Strutzenberger, G., Alexander, N., Bamboschek, D., Claas, E., Langhof, H., & Schwameder, H. (2017). Uphill walking: Biomechanical demand on the lower extremities of obese adolescents. Gait & posture, 54, 20–26. https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.02.013

Suárez-Ortegón, M. F., Echeverri, I., Prats-Puig, A., Bassols, J., Carreras-Badosa, G., López-Bermejo, A., & Fernández-Real, J. M. (2019). Iron Status and Metabolically Unhealthy Obesity in Prepubertal Children. Obesity (Silver Spring, Md.), 27(4), 636–644. https://doi.org/10.1002/oby.22425

Takagi, S., Kime, R., Midorikawa, T., Niwayama, M., Sakamoto, S., & Katsumura, T. (2014). Skeletal muscle deoxygenation responses during treadmill exercise in children. Advances in experimental medicine and biology, 812, 341–346. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-0620-8_45

Takagi, S., Kime, R., Midorikawa, T., Niwayama, M., Sakamoto, S., & Katsumura, T. (2020). Differences in Muscle O2 Dynamics During Treadmill Exercise Between Aerobic Capacity-Matched Overweight and Normal-Weight Adults. Advances in experimental medicine and biology, 1232, 223–229. https://doi.org/10.1007/978-3-030-34461-0_28

Takagi, S., Kime, R., Midorikawa, T., Niwayama, M., Sakamoto, S., & Katsumura, T. (2014). Skeletal muscle deoxygenation responses during treadmill exercise in children.

Advances in experimental medicine and biology, 812, 341–346. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-0620-8_45

Tanaka, H., Monahan, K. D., & Seals, D. R. (2001). Age-predicted maximal heart rate revisited. Journal of the American College of Cardiology, 37(1), 153–156. https://doi.org/10.1016/s0735-1097(00)01054-8

Tanaka, H., Monahan, K. D., & Seals, D. R. (2001). Age-predicted maximal heart rate revisited. Journal of the American College of Cardiology, 37(1), 153–156. https://doi.org/10.1016/s0735-1097(00)01054-8

TAYLOR, H. L., BUSKIRK, E., & HENSCHEL, A. (1955). Maximal oxygen intake as an objective measure of cardio-respiratory performance. Journal of applied physiology, 8(1), 73–80. https://doi.org/10.1152/jappl.1955.8.1.73

Thivel D., Aucouturier J. (2016). Évaluation des aptitudes cardiorespiratoires en obésité pédiatrique. European Children Obesity Group (ECOG), 2016. https://ebook.ecog-obesity.eu/fr/depense-energetique-activite-physique/evaluation-des-aptitudes-cardiorespiratoires-en-obesite-pediatrique/

Thivel, D., Isacco, L., O'Malley, G., & Duché, P. (2016). Pediatric Obesity and Perceived Exertion: Difference Between Weight-Bearing and Non-Weight-Bearing Exercises Performed at Different Intensities. Journal of sports sciences, 34(5), 389–394. https://doi.org/10.1080/02640414.2015.1061200

Thivel, D., Masurier, J., Baquet, G., Timmons, B. W., Pereira, B., Berthoin, S., Duclos, M., & Aucouturier, J. (2019). High-intensity interval training in overweight and obese children and adolescents: systematic review and meta-analysis. The Journal of sports medicine and physical fitness, 59(2), 310–324. https://doi.org/10.23736/S0022-4707.18.08075-1

Thivel, D., O'Malley, G., Blourdier, D., Tremeaux, M., Zanchet, C., Pereira, B., & Ratel, S. (2017). Reproducibility of the intermittent Spartacus Run Test in obese adolescents. The Journal of sports medicine and physical fitness, 57(9), 1083–1088. https://doi.org/10.23736/S0022-4707.16.06534-8

Thivel, D., O'Malley, G., Blourdier, D., Tremeaux, M., Zanchet, C., Pereira, B., & Ratel, S. (2017). Reproducibility of the intermittent Spartacus Run Test in obese adolescents. The Journal of sports medicine and physical fitness, 57(9), 1083–1088. https://doi.org/10.23736/S0022-4707.16.06534-8

Tomkinson, G. R., Lang, J. J., Blanchard, J., Léger, L. A., & Tremblay, M. S. (2019). The 20-m Shuttle Run: Assessment and Interpretation of Data in Relation to Youth Aerobic

Fitness and Health. Pediatric exercise science, 31(2), 152–163. https://doi.org/10.1123/pes.2018-0179

Tompuri, T., Lintu, N., Savonen, K., Laitinen, T., Laaksonen, D., Jääskeläinen, J., & Lakka, T. A. (2015). Measures of cardiorespiratory fitness in relation to measures of body size and composition among children. Clinical physiology and functional imaging, 35(6), 469–477. https://doi.org/10.1111/cpf.12185

Tremblay, M. S., Carson, V., Chaput, J. P., Connor Gorber, S., Dinh, T., Duggan, M., Faulkner, G., Gray, C. E., Gruber, R., Janson, K., Janssen, I., Katzmarzyk, P. T., Kho, M. E., Latimer-Cheung, A. E., LeBlanc, C., Okely, A. D., Olds, T., Pate, R. R., Phillips, A., Poitras, V. J., … Zehr, L. (2016). Canadian 24-Hour Movement Guidelines for Children and Youth: An Integration of Physical Activity, Sedentary Behaviour, and Sleep. Applied physiology, nutrition, and metabolism = Physiologie appliquee, nutrition et metabolisme, 41(6 Suppl 3), S311–S327. https://doi.org/10.1139/apnm-2016-0151

Trowbridge, C. A., Gower, B. A., Nagy, T. R., Hunter, G. R., Treuth, M. S., & Goran, M. I. (1997). Maximal aerobic capacity in African-American and Caucasian prepubertal children. The American journal of physiology, 273(4), E809–E814. https://doi.org/10.1152/ajpendo.1997.273.4.E809

Tsiros, M. D., Buckley, J. D., Howe, P. R., Walkley, J., Hills, A. P., & Coates, A. M. (2014). Musculoskeletal pain in obese compared with healthy-weight children. The Clinical journal of pain, 30(7), 583–588. https://doi.org/10.1097/AJP.0000000000000017

Vandekerckhove, K., Coomans, I., Moerman, A., De Wolf, D., & Boone, J. (2016). Characterizing cerebral and locomotor muscle oxygenation to incremental ramp exercise in healthy children: relationship with pulmonary gas exchange. European journal of applied physiology, 116(11-12), 2345–2355. https://doi.org/10.1007/s00421-016-3486-8

Vanderburgh, P. M., & Katch, F. I. (1996). Ratio scaling of VO2max penalizes women with larger percent body fat, not lean body mass. Medicine and science in sports and exercise, 28(9), 1204–1208. https://doi.org/10.1097/00005768-199609000-00019

Vanderburgh, P. M., & Katch, F. I. (1996). Ratio scaling of VO2max penalizes women with larger percent body fat, not lean body mass. Medicine and science in sports and exercise, 28(9), 1204–1208. https://doi.org/10.1097/00005768-199609000-00019

Vanhelst, J., Baudelet, J. B., Fardy, P. S., Béghin, L., Mikulovic, J., & Ulmer, Z. (2017). Prevalence of overweight, obesity, underweight and normal weight in French youth from 2009 to 2013. Public health nutrition, 20(6), 959–964. https://doi.org/10.1017/S1368980016003244

Verdot C, Torres M, Salanave B, Deschamps V. Corpulence des enfants et des adultes en France métropolitaine en 2015. Résultats de l'étude ESTEBAN et évolution depuis 2006. Bull Epidémiol Hebd. 2017;(13):234-41. http://invs.santepubliquefrance.fr/beh/2017/13/2017_13_1.html

Vermorel, M., Lazzer, S., Bitar, A., Ribeyre, J., Montaurier, C., Fellmann, N., Coudert, J., Meyer, M., & Boirie, Y. (2005). Contributing factors and variability of energy expenditure in non-obese, obese, and post-obese adolescents. Reproduction, nutrition, development, 45(2), 129–142. https://doi.org/10.1051/rnd:2005014

Vinet, A., Mandigout, S., Nottin, S., Nguyen, L., Lecoq, A. M., Courteix, D., & Obert, P. (2003). Influence of body composition, hemoglobin concentration, and cardiac size and function of gender differences in maximal oxygen uptake in prepubertal children. Chest, 124(4), 1494–1499. https://doi.org/10.1378/chest.124.4.1494

Vøllestad N. K. (1997). Measurement of human muscle fatigue. Journal of neuroscience methods, 74(2), 219–227. https://doi.org/10.1016/s0165-0270(97)02251-6

Vollrath, M. E., Hampson, S. E., Péneau, S., Rolland-Cachera, M. F., & Ystrom, E. (2018). Child temperament predicts the adiposity rebound. A 9-year prospective sibling control study. PloS one, 13(11), e0207279. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0207279

Wang, L., Yoshikawa, T., Hara, T., Nakao, H., Suzuki, T., & Fujimoto, S. (2006). Which common NIRS variable reflects muscle estimated lactate threshold most closely?. Applied physiology, nutrition, and metabolism = Physiologie appliquee, nutrition et metabolisme, 31(5), 612–620. https://doi.org/10.1139/h06-069

Weir, C. B., & Jan, A. (2020). BMI Classification Percentile And Cut Off Points. In StatPearls. StatPearls Publishing.

Wigmore, D. M., Propert, K., & Kent-Braun, J. A. (2006). Blood flow does not limit skeletal muscle force production during incremental isometric contractions. European journal of applied physiology, 96(4), 370–378. https://doi.org/10.1007/s00421-005-0037-0

Williams, J. G., Eston, R., & Furlong, B. (1994). CERT: a perceived exertion scale for young children. Perceptual and motor skills, 79(3 Pt 2), 1451–1458. https://doi.org/10.2466/pms.1994.79.3f.1451

Winsley, R. J., Fulford, J., Roberts, A. C., Welsman, J. R., & Armstrong, N. (2009). Sex difference in peak oxygen uptake in prepubertal children. Journal of science and medicine in sport, 12(6), 647–651. https://doi.org/10.1016/j.jsams.2008.05.006

Wittekind, S. G., Powell, A. W., Opotowsky, A. R., Mays, W. W., Knecht, S. K., Rivin, G., & Chin, C. (2020). Skeletal Muscle Mass Is Linked to Cardiorespiratory Fitness in Youth.

Medicine and science in sports and exercise, 52(12), 2574–2580. https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000002424

Wood, R. E., Hills, A. P., Hunter, G. R., King, N. A., & Byrne, N. M. (2010). Vo2max in overweight and obese adults: do they meet the threshold criteria?. Medicine and science in sports and exercise, 42(3), 470–477. https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181b666ad

Wood, R. E., Hills, A. P., Hunter, G. R., King, N. A., & Byrne, N. M. (2010). Vo2max in overweight and obese adults: do they meet the threshold criteria?. Medicine and science in sports and exercise, 42(3), 470–477. https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181b666ad

Workman, J. M., & Armstrong, B. W. (1986). Metabolic cost of walking: equation and model. Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985), 61(4), 1369–1374. https://doi.org/10.1152/jappl.1986.61.4.1369

Zanconato, S., Baraldi, E., Santuz, P., Rigon, F., Vido, L., Da Dalt, L., & Zacchello, F. (1989). Gas exchange during exercise in obese children. European journal of pediatrics, 148(7), 614–617. https://doi.org/10.1007/BF00441512

Zavorsky, G. S., Murias, J. M., Kim, D. J., Gow, J., Sylvestre, J. L., & Christou, N. V. (2007). Waist-to-hip ratio is associated with pulmonary gas exchange in the morbidly obese. Chest, 131(2), 362–367. https://doi.org/10.1378/chest.06-1513

Zonios, G., Bykowski, J., & Kollias, N. (2001). Skin melanin, hemoglobin, and light scattering properties can be quantitatively assessed in vivo using diffuse reflectance spectroscopy. The Journal of investigative dermatology, 117(6), 1452–1457. https://doi.org/10.1046/j.0022-202x.2001.01577.x