

Aspects méthodologiques de la mesure du lipoxmax : conditions d'application pour les personnes atteintes de pathologies métaboliques

Monique Mendelson^{1,2,3}, Michel Guinot^{1,2,3}, Anne Favre-Juvin³, Bernard Wuyam^{1,2,3} et Patrice Flore^{1,2,3}

¹ Université Grenoble Alpes, Laboratoire HP2, Grenoble, France

² Inserm U1042, 38042 Grenoble, France

³ CHU de Grenoble, Clinique Universitaire de Physiologie, Sommeil et Exercice, Pôle Rééducation et Physiologie, Hôpital SUD, BP338, 38434 Échirolles Cedex, France

Reçu le 4 décembre 2012 – Accepté le 8 mai 2012

Résumé. Le lipoxmax correspond à l'intensité d'exercice pour laquelle l'oxydation des lipides est maximale. Cet indice métabolique est déterminé par calorimétrie lors d'une épreuve d'effort progressive. Le lipoxmax peut être utilisé comme cible d'entraînement dans différentes pathologies, dont l'obésité et le diabète. L'objectif de cette revue de question est d'énoncer les aspects méthodologiques de la mesure du lipoxmax en portant une attention particulière à la validité des échanges gazeux, les particularités du protocole de détermination et les facteurs de variabilité et de fiabilité. Dans un deuxième temps, l'intérêt et la faisabilité des activités physiques adaptées ciblant le lipoxmax chez les personnes présentant des troubles métaboliques seront explorés.

Mots clés : Lipoxmax, oxydation lipidique maximale, activité physique adaptée, méthodologie, anomalies métaboliques

Abstract. Methodological aspects of measuring lipoxmax: applications for individuals with metabolic defects.

The exercise intensity that elicits maximal lipid oxidation is called lipoxmax. This metabolic measurement is determined during an exercise calorimetry test and can be used as a target for exercise training in populations with metabolic defects (i.e. obesity, diabetes). The aim of this short review is to state methodological considerations when measuring lipoxmax. We will mainly focus on the validity of gas exchanges, specifications of the exercise protocol and factors of variability and reliability. Secondly, the interest and feasibility of using adapted physical activities targeting lipoxmax in individuals with metabolic defects will be explored.

Key words: Lipoxmax, maximal fat oxidation, adapted physical activity, methodology, metabolic defects

1 Introduction

L'intensité d'exercice pour laquelle l'oxydation des lipides est maximale est dénommée lipoxmax, mais aussi fatoxmax ou fatmax. Dans le cadre de cette revue de question, nous emploierons le terme lipoxmax. Le lipoxmax a été décrit dans le début des années 2000 (Achten, Gleeson, & Jeukendrup, 2002; Perez-Martin, *et al.*, 2001) et depuis, plusieurs équipes ré-entraînent les individus atteints d'obésité et de diabète à cette intensité d'exercice. Les recommandations nationales françaises font référence à cette intensité d'exercice dans leurs communications (Thibault, Duche, Meyer, & Peres, 2008) alors que, à ce

jour, les recommandations internationales ne le font pas encore (Donnelly, *et al.*, 2009).

Ce lipoxmax découle de la cinétique de la balance de l'oxydation des substrats à l'exercice et notamment du concept de « *crossover* » qui stipule qu'à partir d'une production énergétique au repos, en majorité à partir de l'oxydation des lipides (60 % au repos), celle-ci diminue en faveur de l'oxydation glucidique au fur et à mesure que l'intensité de l'exercice augmente (Brooks & Mercier, 1994). L'évolution en miroir de la participation énergétique des deux substrats au cours d'un exercice d'intensité croissante se traduit par un croisement lorsque l'oxydation lipidique contribue pour 30 % et celle

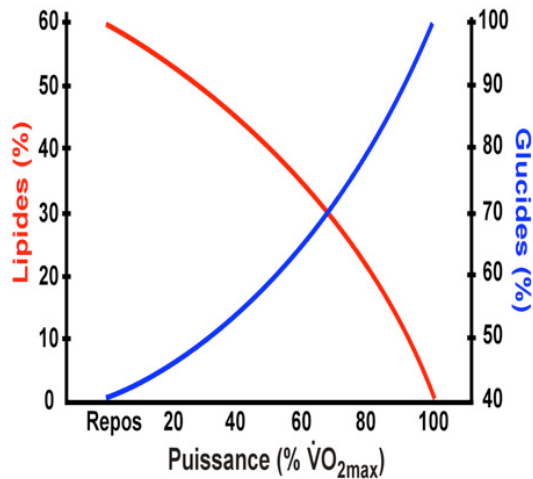


Fig. 1. Évolution de l'utilisation respective des glucides et des lipides en fonction de l'intensité relative d'exercice (Brooks & Mercier, 1994).

des glucides pour 70 % à la dépense énergétique totale (Fig. 1). Lorsque l'oxydation glucidique contribue de façon prépondérante à la dépense énergétique (ceci se produit près du point de croisement), il en résulte une élévation de la lactatémie et l'apparition des seuils ventilatoire et lactique (Brooks & Mercier, 1994 ; Michallet, *et al.*, 2008). Ces trois phénomènes sont souvent, mais pas systématiquement concomitants (Brun, Jean, Ghanassia, Flavier, & Mercier, 2007).

Un entraînement en endurance, parce qu'il améliore les possibilités aérobies, modifie le niveau d'oxydation lipidique, qui, selon Brooks (1997), reste minoritaire relativement à celle des glucides lorsque l'intensité d'exercice augmente alors que pour Coggan (1997), ce niveau d'oxydation lipidique peut devenir tout à fait conséquent y compris à l'exercice intense.

La cinétique d'évolution de la quantité de lipides oxydés (en mg/min) décrite ci-après (Section 2) et notamment la diminution de l'oxydation lipidique alors que l'on approche de l'intensité au point de croisement, n'est pas complètement élucidée (Sahlin, Sallstedt, Bishop, & Tonkonogi, 2008). En accord avec le concept du *crossover*, l'intensité de l'exercice est le déterminant le plus important de la balance énergétique au cours de l'exercice. Lorsque cette intensité s'élève, elle limite l'entrée des acyl-CoA dans la mitochondrie par une inhibition de la carnitine palmitoyl transférase I (sensible au malonyl-CoA et au lactate). Ces activités enzymatiques sont déprimées par une augmentation de l'utilisation des glucides (inhibition compétitive). Ainsi, l'étude de la cinétique de l'oxydation des lipides par calorimétrie indirecte donne accès au lipoxmax, intensité d'exercice utilisée par de nombreux auteurs pour stimuler l'oxydation lipidique chez des sujets présentant des troubles métaboliques. Cette individualisation de l'intensité de l'exercice qui a fait ses preuves (Romain, *et al.*, 2012), bien qu'elle soit contestée (Peronnet, Thibault, & Tremblay, 2010), ne prend du

sens que si la détermination de cette intensité cible, basée sur la calorimétrie indirecte, est valide et fiable. Or, les sources de variations des mesures calorimétriques sont nombreuses (Brooks, 2012).

L'objectif de cette revue est de considérer, dans un premier temps, les aspects méthodologiques de la mesure du lipoxmax en portant une attention particulière à la validité des échanges gazeux, les particularités du protocole de détermination et les facteurs de variabilité et de fiabilité. Dans un deuxième temps, l'intérêt et la faisabilité des activités physiques adaptées ciblant le lipoxmax chez les personnes présentant des troubles métaboliques seront explorés.

2 Aspects méthodologiques

La détermination du lipoxmax dans un cadre clinique se fait à l'aide d'une épreuve d'effort incrémentale sous-maximale avec mesure des échanges gazeux, le plus souvent sur ergocycle. Le choix des intensités se base sur les capacités maximales (en France, le plus souvent théoriques) du sujet. Les valeurs de VO_2 et VCO_2 sont moyennées dans la dernière minute de chaque palier, et permettent d'apprécier la part respective des oxydations glucidiques et lipidiques (Peronnet & Massicotte, 1991) :

$$\begin{aligned} \text{Oxydation des glucides (mg.min}^{-1}\text{)} &= \\ &4,585 VCO_2 - 3,2255 VO_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Oxydation des lipides (mg.min}^{-1}\text{)} &= \\ &-1,7012 VCO_2 + 1,6946 VO_2 \end{aligned}$$

Sont retenues les valeurs des échanges moyennées sur la dernière minute de chaque palier puisque cette zone est considérée comme celle où la production de CO_2 à partir des bicarbonates pour compenser la production de lactate, devient négligeable. L'augmentation de l'intensité de l'exercice est responsable d'une oxydation lipidique dont la cinétique suit une fonction parabolique. La formule empirique qui fournit le débit d'oxydation lipidique est la suivante :

$$\text{Lipides (mg.min}^{-1}\text{)} = 1,6946 VO_2 - 1,7012 VCO_2$$

Après lissage de la courbe en cloche entre la puissance de l'exercice (en % de PMA) et l'oxydation lipidique (Lox), on peut calculer la puissance pour laquelle l'utilisation des lipides est maximale (débit d'oxydation maximale lipidique), qui est le point où la dérivée de cette courbe s'annule (Ghanassia, Brun, Fedou, Raynaud, & Mercier, 2006) (Fig. 2).

2.1 Validité de la mesure des échanges gazeux

Un défaut de validité/fiabilité de la mesure des échanges gazeux, en raison d'une dérive fréquente des mesures

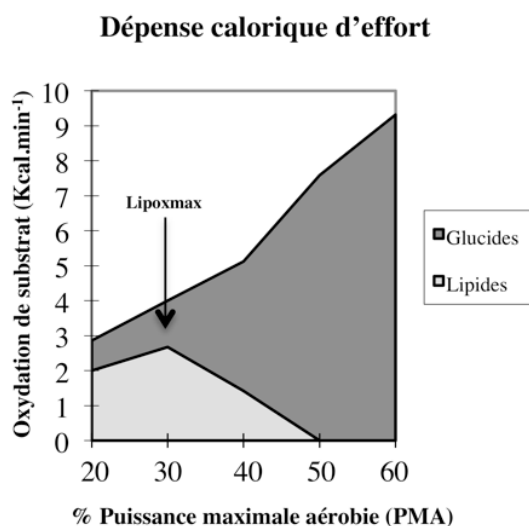


Fig. 2. Exemple de calorimétrie d'effort chez un sujet présentant un lipoxmax à 30 % de sa puissance maximale aérobie (PMA).

faites par les analyseurs de gaz (Atkinson, Davison, & Nevill, 2005) susceptible de se produire lors d'exercices prolongés, peut remettre en cause la qualité de la mesure du lipoxmax. Nous avons montré que certains dispositifs commerciaux de mesure des échanges gazeux n'étaient pas valides (14 % de valeurs de lipoxmax ininterprétables), et pouvaient donc perturber la qualité de la mesure du lipoxmax (Michallet, *et al.*, 2008). Ces erreurs de mesure peuvent, par exemple, être la conséquence d'une pression saturante de vapeur d'eau trop importante (défaillance du dessiccateur en amont de la cellule de l'analyseur de gaz) ou encore d'un déphasage dans l'alignement des signaux de débit ventilatoire et de fractions de gaz. Ceci est en accord avec plusieurs études précédentes qui ont montré que les systèmes automatisés ne permettent pas toujours des mesures fiables et valides par rapport à la méthode traditionnelle des sacs de Douglas, considérée comme la méthode de référence pour la mesure de calorimétrie indirecte (Carter & Jeukendrup, 2002; Gore, Clark, Shipp, Van Der Ploeg, & Withers, 2003). Des erreurs faibles sur la VO_2 et la VCO_2 peuvent avoir des effets relativement importants sur les valeurs calculées d'oxydation glucidique et lipidique. Ainsi, un étalonnage minutieux et une validation régulière est nécessaire lors de l'utilisation des systèmes automatisés (Gore, Catcheside, French, Bennett, & Laforgia, 1997) surtout lorsqu'une épreuve se prolonge.

2.2 Protocole de détermination du Lipoxmax

À partir de la PMA théorique *versus* réelle.

Le choix du protocole d'exercice permettant de déterminer le lipoxmax doit permettre d'encadrer l'intensité correspondant à cette variable. Pour ce faire, en accord avec la théorie du *crossover* et les fondements de

la calorimétrie indirecte, il est souhaitable que la gamme d'intensité d'exercices proposés induise une augmentation progressive du quotient respiratoire des échanges gazeux (QR) entre la valeur de repos (voisine de 0,7 si le sujet a bien respecté le jeûne) et celle de fin d'effort, sans qu'il soit nécessaire de pousser les sujets jusqu'au maximum de leurs possibilités. Idéalement, lors du dernier palier, le QR doit être supérieur à 0,92, ce qui correspond à l'intensité au point de croisement glucido-lipidique défini par Brooks et Mercier (1994), ou au seuil lactique (Michallet, *et al.*, 2008), intensités qui sont voisines mais souvent supérieures à celles du lipoxmax.

Les protocoles permettant de mesurer le lipoxmax par calorimétrie d'effort à charge croissante peuvent être basés sur la puissance maximale aérobie réelle (rPMA) (Gmada, *et al.*, 2012; Michallet, *et al.*, 2008) ou sur la puissance maximale aérobie théorique (tPMA) calculée à partir de l'équation de Wasserman (1987). Gmada, *et al.* (2012) ont récemment montré que l'utilisation d'un protocole basé sur la tPMA chez des sujets sédentaires mais en bonne santé, sous-estimait le lipoxmax par rapport aux résultats obtenus grâce à un protocole basé sur la rPMA. En accord avec ces résultats, Aucouturier, *et al.* (2009) rapportent une sous-estimation de lipoxmax de l'ordre de 6-14 % selon la méthode de référence pour le calcul de la tPMA. Michallet, *et al.* (2008) ne rapportent pas de différence significative entre les valeurs de lipoxmax mesurées à l'aide de la tPMA ou rPMA chez des sujets en bonne condition physique. Toutefois, ces auteurs ont observé une variabilité interindividuelle très importante avec une différence maximale allant jusqu'à 150 watts (plus de 100 %) chez les sujets plus entraînés. Ces auteurs suggèrent ainsi que l'approche optimale pour déterminer le lipoxmax est d'obtenir une valeur réelle de la PMA au préalable. Il semble ainsi qu'en fonction des spécificités des populations testées (sportifs entraînés) ou des limites des équations de prédiction, le risque d'erreur dans la détermination de lipoxmax au moyen d'un protocole conçu à partir de la tPMA soit non négligeable. Ainsi, il paraît souhaitable, malgré la lourdeur méthodologique, d'évaluer les possibilités maximales du sujet en vue de bâtir un protocole qui permettra une évolution progressive du QR et une détermination valide et fiable du lipoxmax.

2.2.1 Durée des paliers

La calorimétrie d'effort est basée sur l'hypothèse que la production de lactate à l'exercice aurait une influence minimale sur le quotient respiratoire après trois à quatre minutes d'effort à l'état stable. Différentes équipes de recherche ont validé leurs protocoles respectifs permettant de mesurer le lipoxmax. Chez les individus modérément entraînés et en bonne santé, Achten, Venables, et Jeukendrup (2003) proposent un protocole avec des paliers d'une durée de trois minutes, prolongé jusqu'aux capacités maximales des sujets. Ceci permet

la mise en place d'un plus grand nombre de paliers afin de déterminer l'intensité d'exercice à laquelle l'oxydation des lipides est maximale. Toutefois, ce protocole n'est pas applicable à des obèses et des diabétiques de type 2, qui ont une condition physique souvent faible (Katoh, Hara, Kurusu, Miyaji, & Narutaki, 1996; Michallet, *et al.*, 2007). Chez ces individus, un palier de trois minutes est trop court pour que les échanges gazeux atteignent un état stable (Bordenave, Flavier, Fedou, Brun, & Mercier, 2007). Bordenave, *et al.* (2007) ont comparé les données obtenues par calorimétrie entre la deuxième et la troisième minute et entre la cinquième et la sixième minute de chaque palier, à partir d'un protocole utilisant quatre paliers sous-maximaux dans une population de sujets sédentaires incluant des obèses et des diabétiques. Ces auteurs ont démontré que les paliers de trois minutes sous-estimaient le QR, les taux d'oxydation des glucides et le lipoxmax alors que l'oxydation des lipides était sur-estimée. Enfin, une analyse en Bland-Altman montrait qu'il existe une grande variabilité inter-individuelle entre ces deux méthodes. Ces auteurs recommandent donc un protocole utilisant des paliers de six minutes dans le cas d'une prescription ciblée d'activité physique. L'impact de la prolongation des paliers au-delà de six minutes a également été étudié dans d'autres populations. En effet, une étude récente réalisée chez des garçons en surpoids a comparé l'effet d'un exercice incrémental plus court (21 minutes) *versus* un exercice prolongé de 30 minutes à différentes intensités d'exercice (40, 45, 50, 55 et 60 % de VO_{2pic}) sur le lipoxmax (Crisp, Guelfi, Licari, Braham, & Fournier, 2012). Ces auteurs ont montré que la durée de l'exercice n'influençait pas le lipoxmax ni le taux d'oxydation lipidique absolu lors de l'exercice prolongé. Toutefois, il existait une variabilité individuelle importante entre les deux protocoles (prolongé *vs* incrémental court).

2.2.2 Précautions alimentaires

Ainsi, afin d'éviter une influence de l'apport énergétique sur les indicateurs métaboliques mesurés, la plupart des auteurs recommandent que l'épreuve soit réalisée le matin après un jeûne de 12 heures (Brun, *et al.*, 2007; Michallet, *et al.*, 2008). Plusieurs études ont montré une augmentation de l'oxydation glucidique à l'exercice après un repas pris jusqu'à quatre heures avant l'épreuve (Bergman & Brooks, 1999; Coyle, Coggan, Hemmert, Lowe, & Walters, 1985; Montain, Hopper, Coggan, & Coyle, 1991). Ainsi, le non respect du jeûne augmente l'oxydation des glucides quels que soient l'intensité de l'exercice ou l'état d'entraînement des sujets. Plus récemment, il a été montré que le lipoxmax est diminué et décalé vers une intensité plus faible lorsque le repas précédent l'épreuve est pris moins de trois heures avant celle-ci (Bergman & Brooks, 1999; Friedlander, *et al.*, 2007; Jeukendrup, 2003).

2.3 Facteurs de variabilité et fiabilité du Lipoxmax

2.3.1 Fiabilité

Les premières études sur la calorimétrie d'effort ont rapporté une fiabilité acceptable avec des coefficients de variations de 11,4 %, 9,6 % et 8,7 % (Achten, *et al.*, 2003; Michallet, *et al.*, 2008; Perez-Martin, *et al.*, 2001) lorsque les conditions de réalisation de l'épreuve sont bien standardisées (pas d'activité physique réalisée avant ni de prise de repas).

2.3.2 Stabilité de la ventilation et hyperventilation à l'exercice

Des réponses ventilatoires anormalement élevées ou faibles au repos ou à l'exercice modéré telles qu'observées chez des individus déconditionnés, ou à l'inverse des athlètes très entraînés, peuvent modifier le débit de CO_2 rejeté et ainsi altérer le quotient respiratoire. Michallet, *et al.* (2008) rapportent une relation entre la ventilation et le quotient respiratoire et la ventilation et le point de croisement, confirmant ainsi le rôle potentiel de la ventilation dans le calcul des indices métaboliques, même si l'effet est relativement faible (la ventilation expliquait 10 % de la variance du lipoxmax). Enfin, afin de s'assurer que les sujets n'hyperventilent pas avant le début de l'épreuve permettant de déterminer le lipoxmax, il faut veiller à ce que le quotient respiratoire ne dépasse pas 0,85.

2.3.3 Condition physique

Les individus présentant une condition physique aérobie élevée présentent une meilleure capacité à oxyder les lipides à l'exercice (Achten, *et al.*, 2003; Bergman & Brooks, 1999; Gonzalez-Haro, Galilea, Gonzalez-de-Suso, Drobnic, & Escanero, 2007; Venables, Achten, & Jeukendrup, 2005). Venables, *et al.* (2005) ont montré que la consommation maximale d'oxygène (VO_{2max}) permettait de prédire l'oxydation lipidique, que cette dernière soit exprimée en valeur absolue rapportée au poids ou à la masse maigre. Plusieurs études longitudinales (Carter, Rennie, Hamilton, & Tarnopolsky, 2001; Friedlander, *et al.*, 1998; Phillips, *et al.*, 1996) et transversales (Coggan, Raguso, Gastaldelli, Sidossis, & Yeckel, 2000; Jeukendrup, 2003; Klein, *et al.*, 1994; Sidossis, Wolfe, & Coggan, 1998) évaluant les effets de l'entraînement en endurance ont montré que les individus entraînés oxydaient plus de lipides à la même intensité relative (supérieure en valeur absolue) que des individus non-entraînés. Enfin, en ce qui concerne les mécanismes explicatifs de l'amélioration du débit d'oxydation des lipides après entraînement, en endurance, on constate des modifications biochimiques au niveau musculaire ainsi que des adaptations endocriniennes qui favorisent l'épargne du glycogène, adaptent le débit de la glycolyse à celui du cycle

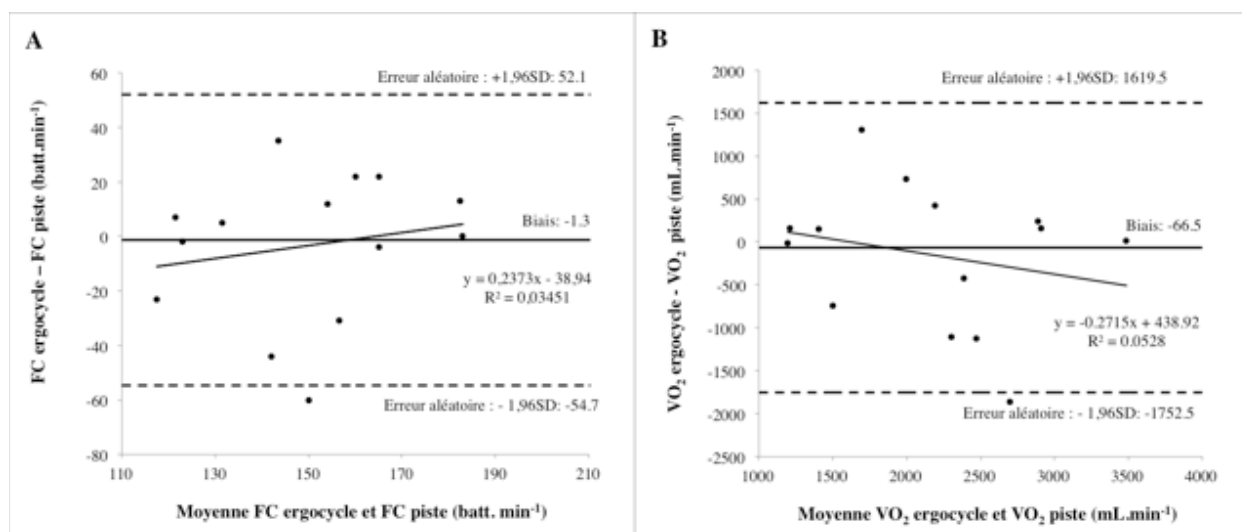


Fig. 3. Analyse en Bland et Altman pour la fréquence cardiaque (FC) et la consommation d'oxygène (VO₂) au lipoxmax sur ergocycle et sur piste (Mendelson, *et al.* 2012).

de Krebs et accroissent l'oxydation des lipides à des puissances d'exercice plus faibles. Ainsi, une condition physique plus élevée est associée à une augmentation du lipoxmax.

2.3.4 Type d'exercice

Les études évaluant l'effet du type d'exercice sur l'oxydation lipidique ont surtout été réalisées chez des individus très entraînés (*e.g.* triathlète, cycliste). Elles ont démontré les nombreuses différences physiologiques entre la course et le cyclisme avec notamment des fréquences cardiaques différentes à l'exercice sous-maximal et maximal (Millet, Vleck, & Bentley, 2009). Une autre étude, réalisée chez des cyclistes, a montré une oxydation lipidique supérieure (+ 28 %) lors de la marche/course par rapport à un exercice réalisé sur ergocycle, même si l'intensité d'exercice à lipoxmax ne différait pas entre ces deux modes d'exercice (Achten, *et al.*, 2003). Ces résultats contrastent avec une étude plus récente, dans laquelle le lipoxmax était plus élevé lors de la course (Cheneviere, Malatesta, Gojanovic, & Borrani, 2010). Ces auteurs expliquent leurs résultats par les différences physiologiques et mécaniques entre ces deux types d'exercice. Une masse musculaire plus importante pour stabiliser le tronc et les bras lors de la course à pied est requise ce qui pourrait contribuer à un taux d'oxydation lipidique plus élevé. De plus, lors d'un exercice sur ergocycle, le type de contraction musculaire dominant est la contraction concentrique alors que la course à pied met en jeu une phase excentrique en plus de la phase concentrique (Arkinstall, Bruce, Nikolopoulos, Garnham, & Hawley, 2001).

Ces données ont été confortées chez l'enfant par une étude montrant que l'oxydation lipidique était plus élevée lors d'un exercice sur tapis roulant comparé à un exercice

sur ergocycle à différentes intensités d'exercice (absolues et relatives). Cette différence était plus prononcée à des intensités plus élevées (Zakrzewski & Tolfrey, 2012). De plus, le lipoxmax (ou fatmax dans cette étude) était plus élevé lors de l'exercice sur tapis roulant, par rapport à l'exercice sur ergocycle.

Nous avons récemment montré que les indicateurs métaboliques (lipoxmax, débit d'oxydation maximale lipidique) déterminés en laboratoire sur ergocycle n'étaient pas applicables à la marche/course sur piste, chez des sujets de condition physique hétérogène (Mendelson, Jinwala, Wuyam, Levy, & Flore, 2012). Dans cette étude, 15 sujets sains ont effectué deux tests sous-maximaux sur ergocycle ou sur piste durant lesquels les échanges gazeux et l'oxydation des substrats ont été mesurés. En moyenne, la fréquence cardiaque et la consommation d'oxygène au lipoxmax ne différaient pas entre les deux modes d'exercice. Toutefois, une analyse en Bland et Altman montrait une grande variabilité individuelle (Fig. 3). Ce résultat était surprenant puisque nous avons émis l'hypothèse que l'oxydation lipidique dépendrait du type d'exercice dû aux différences physiologiques entre le cyclisme (ergocycle) et la marche/course, conformément aux résultats mentionnés préalablement (Achten, *et al.*, 2003; Cheneviere, *et al.*, 2010). De plus, six sujets sur quinze présentent des valeurs de lipoxmax plus élevées lors de l'exercice sur ergocycle. Ainsi, nos résultats suggèrent que l'utilisation de ces indicateurs métaboliques sur le terrain nécessite une détermination spécifique de l'activité physique adaptée envisagée. Enfin, ces résultats sont à confirmer chez des patients atteints de troubles métaboliques.

2.3.5 Effets de l'entraînement

L'entraînement en endurance, pratiqué régulièrement, modifie favorablement la balance des substrats

énergétiques, en particulier chez des patients présentant des anomalies métaboliques telles que l'obésité (van Aggel-Leijssen, Saris, Wagenmakers, Hul, & van Baak, 2001; van Aggel-Leijssen, Saris, Wagenmakers, Senden, & van Baak, 2002) et le diabète de type 2 (Goodpaster, Katsiaras, & Kelley, 2003). L'intensité d'exercice nécessaire pour induire des améliorations de l'oxydation lipidique dans ces études est relativement faible (40 % VO_{2max}).

À titre d'exemple, une étude comparant des programmes d'exercice de différentes intensités sur l'oxydation lipidique d'hommes obèses a montré que l'exercice de faible intensité (environ 40 % VO_{2max}) augmentait l'oxydation lipidique de 40 % alors que l'exercice d'intensité élevée n'avait aucun effet (van Aggel-Leijssen, *et al.*, 2002). L'intensité d'exercice utilisée dans les programmes d'entraînement de ces études correspond approximativement à l'intensité à lipoxmax dans les populations porteuses d'anomalies métaboliques.

En ce qui concerne l'entraînement ciblé spécifiquement au lipoxmax, des études ont été réalisées auprès d'adolescents et d'adultes obèses ainsi que chez des diabétiques de type 2 (Brandou, Dumortier, Garandeau, Mercier, & Brun, 2003; Dumortier, *et al.*, 2003; Jean, *et al.*, 2006). Dans ces études, les participants ont perdu de la masse grasse et du poids et ont maintenu leur masse maigre tout en augmentant la puissance brute au lipoxmax (+ 20–23 W) et le débit d'oxydation lipidique au lipoxmax (+ 34–65,8 mg/min).

2.4 Anomalies métaboliques et Lipoxmax

Une diminution de la capacité à oxyder les lipides semble être un facteur étiologique important de l'obésité. L'obésité est une condition associée à un niveau de triglycérides intramusculaires et d'acide gras non estérifiés métaboliquement actifs (Acyl-CoA) accru et une insulino-résistance (Bruce & Hawley, 2004), pour laquelle les niveaux d'oxydation lipidique de repos sont perturbés (Kelley, Goodpaster, Wing, & Simoneau, 1999). L'obésité et le diabète sont des facteurs susceptibles de modifier l'équilibre des substrats énergétiques à l'exercice. Plusieurs études montrent que les valeurs de lipoxmax sont plus faibles chez des individus obèses (Perez-Martin, *et al.*, 2001; Sardinoux, *et al.*, 2009). De plus, Wade, Marbut, et Round (1990) ont trouvé une relation positive entre la masse grasse corporelle et l'oxydation lipidique à l'exercice; la masse grasse était responsable de 40 % de la variance de l'oxydation lipidique. Cependant, d'autres études contradictoires ont montré qu'au repos et à l'exercice, il n'y a pas de relation entre la masse grasse et l'oxydation lipidique (Geerling, *et al.*, 1994; Goedecke, *et al.*, 2000; Helge, *et al.*, 1999). Concernant l'utilisation des lipides à l'exercice chez les individus obèses par rapport aux individus non-obèses, les résultats sont contrastés (Goodpaster, Wolfe, & Kelley, 2002; Mittendorfer, Fields, & Klein, 2004). Mittendorfer,

et al. (2004) ont trouvé une relation inverse entre la masse grasse totale et l'oxydation d'acides gras libres plasmatiques et ces auteurs concluent que le taux d'oxydation lipidique est diminué chez les individus obèses et en surpoids par rapport aux individus normopondérés, ce qui limite la disponibilité des acides gras libres plasmatiques comme source d'énergie. Toutefois, dans cette étude, le taux d'oxydation lipidique totale ne différait pas entre les groupes en raison d'une augmentation compensatrice d'oxydation des acides gras non-systémiques (intramusculaires). À l'inverse, dans l'étude de Goodpaster, *et al.* (2002), les individus obèses présentaient une augmentation des taux d'oxydation d'acides gras non-plasmatiques (+50 %) par rapport à des individus normopondérés, ce qui confirme une étude réalisée chez la femme obèse (Kanaley, Weatherup-Dentes, Alvarado, & Whitehead, 2001).

2.5 Le lipoxmax peut-il être déterminé sans effectuer de calorimétrie d'effort ?

La calorimétrie d'effort permet de cibler les intensités d'entraînement et de mieux comprendre l'utilisation des substrats énergétiques à l'exercice. Toutefois, cette technique, pas toujours accessible, ne peut pas être appliquée à la population générale. Pour l'instant, les tentatives de prédire le lipoxmax à partir d'autres données que celles du test d'effort n'ont pas été couronnées de succès, du fait de la grande variabilité interindividuelle de ce paramètre, (Brun, *et al.*, 2007) bien qu'une intensité d'exercice à 40 % de VO_{2max} soit parfois utilisée pour cibler l'entraînement à lipoxmax (Lazzer, *et al.*, 2007).

La mesure du lipoxmax est reproductible chez un même individu si le niveau d'entraînement ne varie pas (Brandou, *et al.*, 2003); cependant, cette mesure diffère énormément entre les individus. À ce jour, il n'existe pas encore de protocole simplifié à l'aide de méthodes moins sophistiquées permettant de déterminer précisément le lipoxmax.

La calorimétrie d'effort permet de cibler les intensités d'entraînement et de mieux comprendre l'utilisation des substrats énergétiques à l'exercice. Néanmoins, cette technique complexe et sophistiquée ne peut pas être appliquée à la population générale. La prédiction du lipoxmax, à l'aide de données anthropométriques, conduit à des résultats incohérents (Perez-Martin, *et al.*, 2001) et ce, en raison d'une grande variabilité interindividuelle et bien qu'une intensité d'exercice à 40 % de VO_{2max} soit parfois utilisée pour cibler l'entraînement à lipoxmax (Lazzer, *et al.*, 2007).

La mesure du lipoxmax est reproductible chez un même individu si le niveau d'entraînement ne varie pas (Brandou, *et al.*, 2003), toutefois cette mesure diffère énormément entre les individus. À ce jour, il n'existe pas encore de protocole simplifié à l'aide de méthodes moins sophistiquées permettant de déterminer précisément le lipoxmax.

3 Intérêt et faisabilité des activités physiques adaptées ciblant le lipoxmax chez les personnes présentant des troubles métaboliques

La littérature foisonnante illustrant les bienfaits de l'exercice sur la prévention du diabète de type 2 (Lindstrom, *et al.*, 2006), l'amélioration de l'équilibre glycémique du diabétique (Snowling & Hopkins, 2006), la prévention de la reprise de poids après amaigrissement (Bensimhon, Kraus, & Donahue, 2006), ainsi que l'amélioration de l'estime de soi (Colberg, *et al.*, 2010; Folkins & Sime, 1981) témoigne de l'importance de promouvoir l'activité physique comme une thérapeutique à part entière au sein d'individus porteurs d'anomalies métaboliques.

Plusieurs études ont démontré les effets bénéfiques d'un ciblage de l'entraînement au lipoxmax chez l'adulte obèse présentant un syndrome métabolique (Dumortier, *et al.*, 2003), chez l'adolescent obèse (Brandou, *et al.*, 2003) ainsi que chez le diabétique de type 2 (Jean, *et al.*, 2006) sur la capacité à oxyder les lipides à l'exercice.

3.1 Le Lipoxmax chez la personne obèse

Tel que mentionné préalablement, l'intensité à lipoxmax est plus faible chez les individus obèses (Perez-Martin, *et al.*, 2001; Sardinoux, *et al.*, 2009) et apparaît à une intensité d'exercice avoisinant 30-35 % de la tPMA. Certains auteurs affirment que la perte de masse grasse dépend du déficit énergétique seulement et est indépendante de la méthode utilisée pour induire une perte de poids (Strasser, Spreitzer, & Haber, 2007). Il existe aussi une relation dose-réponse entre le volume d'activité physique, exprimée en METs et la perte de masse grasse viscérale (Ohkawara, Tanaka, Miyachi, Ishikawa-Takata, & Tabata, 2007).

Cependant, des études récentes suggèrent que la capacité à oxyder les lipides pourrait expliquer la variabilité interindividuelle dans l'efficacité des programmes d'exercice à induire une perte de poids. Ainsi, les individus oxydant plus de lipides au repos (Barwell, Malkova, Leggate, & Gill, 2009; Rosenkilde, Nordby, Nielsen, Stallknecht, & Helge, 2010), ou à l'exercice (Lavault, *et al.*, 2011), répondraient mieux à une intervention basée sur l'exercice physique. Ceci expliquerait, en partie, la relative inefficacité de l'exercice physique comme moyen de perte de poids chez la personne obèse.

Une méta-analyse récente confirme les effets bénéfiques d'un entraînement à lipoxmax sur le poids, la masse grasse, le tour de taille et le cholestérol total (Romain, *et al.*, 2012). Toutefois, cette méta-analyse ne fait état que de cinq études avec des groupes contrôle. Par conséquent, ces résultats restent à confirmer lorsqu'un plus grand nombre d'études seront publiées.

De plus, une étude réalisée chez l'adulte obèse montre qu'un entraînement ciblé au lipoxmax de quatre semaines

induit une amélioration du taux d'oxydation lipidique de 44 % à l'exercice ($0,24 \pm 0,01$ vs. $0,35 \pm 0,03$ g/min; $p < 0,05$) par rapport à un entraînement par intervalles isocalorique (Venables & Jeukendrup, 2008). Une autre étude évaluant l'effet d'un entraînement ciblé au lipoxmax, cette fois-ci réalisée chez l'enfant obèse, a également révélé une amélioration de l'oxydation des lipides au cours de l'exercice (Ben Ounis, *et al.*, 2011).

Évoquée précédemment, la méta-analyse soulève aussi la question des effets de l'exercice sur la régulation de l'appétit. Les auteurs spéculent sur des effets « satiogènes » d'un exercice réalisé au lipoxmax car ce dernier entraînerait un moindre déplétion glycolipidique limitant ainsi le risque d'hypoglycémie (Hopkins, Jeukendrup, King, & Blundell, 2011). Ces données semblent cependant contredites par les études mettant en œuvre des intensités d'exercice supérieure à 70 % de VO_{2max} , au moins chez l'adolescent obèse (Thivel, Blundell, Duche, & Morio, 2012). L'interaction entre l'exercice, la régulation de l'appétit et la prise alimentaire reste complexe et pourrait dépendre de l'âge et des caractéristiques des populations étudiées.

3.2 Lipoxmax et applicabilité sur le terrain : prescription d'activités physiques adaptées

Nous avons récemment publié un article dont le but était de vérifier si le lipoxmax déterminé sur ergocycle en laboratoire était transférable à la marche/course sur le terrain, dans le but de prescrire des activités physiques adaptées à l'aide de cet indice métabolique (Mendelson, Jinwala, Wuyam, Levy, & Flore, 2012) (*cf.* Facteurs de variabilité et fiabilité du lipoxmax : type d'exercice). Dans ce but, des sujets sains ont effectué deux tests sous-maximaux afin de déterminer leur lipoxmax : sur ergocycle et sur piste d'athlétisme. La détermination du lipoxmax sur piste a été permise par l'utilisation d'un metabographe portable. Nous avons montré que l'utilisation de cet indicateur métabolique sur le terrain nécessite une détermination spécifique par rapport à l'activité physique adaptée envisagée (par exemple, marche nordique) (Mendelson, *et al.*, 2012). Toutefois, nos résultats n'ont pas encore été confirmés chez des personnes porteuses d'anomalies métaboliques. Par exemple, chez la personne obèse, le coût énergétique à la marche est majoré puisqu'il s'agit d'une activité nécessitant le port du poids. Ainsi, chez l'obèse morbide (indice de masse corporelle $> 40 \text{ kg m}^{-2}$), l'intensité métabolique d'exercice à la marche pourrait dépasser celle du lipoxmax, ce qui proscrierait l'utilisation du lipoxmax dans des activités adaptées mettant en jeu la marche ou la course. Dans ces conditions, seul un entraînement en laboratoire sur ergocycle serait possible ou alors au cours d'activités physiques adaptées dans lesquelles le poids est porté; par exemple, randonnée à bicyclette sur le plat. Néanmoins, chez des personnes présentant des anomalies métaboliques (diabète, obésité), il est envisageable de

réaliser un test de terrain à l'aide d'un métabographe portable afin de mesurer le lipoxmax en adaptant le protocole décrit préalablement (*cf.* Protocole de détermination).

4 Conclusion

Le lipoxmax est une mesure reproductible, modifiable par de nombreuses conditions physiologiques qui permet de prédire la quantité de lipides oxydés à l'exercice. En vue d'utiliser cet indice métabolique, il est essentiel de veiller à respecter des précautions méthodologiques afin d'obtenir une mesure fiable et valide. Dans le cadre de la prescription d'activités physiques adaptées (passage du laboratoire au terrain) au sein d'individus atteints d'anomalies métaboliques, l'utilisation du lipoxmax peut s'avérer difficile chez certains patients (*ex.* : obèse morbide) mais est tout à fait envisageable chez d'autres en réalisant une évaluation spécifique de l'activité physique adaptée proposée (*cycle vs. marche/course*).

Bibliographie

- Achten, J., Gleeson, M., & Jeukendrup, A.E. (2002). Determination of the exercise intensity that elicits maximal fat oxidation. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 34 (1), 92–97.
- Achten, J., Venables, M.C., & Jeukendrup, A.E. (2003). Fat oxidation rates are higher during running compared with cycling over a wide range of intensities. *Metabolism*, 52 (6), 747–752.
- Arkininstall, M.J., Bruce, C.R., Nikolopoulos, V., Garnham, A.P., & Hawley, J.A. (2001). Effect of carbohydrate ingestion on metabolism during running and cycling. *Journal of Applied Physiology*, 91 (5), 2125–2134.
- Atkinson, G., Davison, R.C., & Nevill, A.M. (2005). Performance characteristics of gas analysis systems: what we know and what we need to know. *International Journal of Sports Medicine*, 26 (Suppl 1), S2–10.
- Aucouturier, J., Rance, M., Meyer, M., Isacco, L., Thivel, D., Fellmann, N., *et al.* (2009). Determination of the maximal fat oxidation point in obese children and adolescents: validity of methods to assess maximal aerobic power. *European Journal of Applied Physiology*, 105 (2), 325–331.
- Barwell, N.D., Malkova, D., Leggate, M., & Gill, J.M. (2009). Individual responsiveness to exercise-induced fat loss is associated with change in resting substrate utilization. *Metabolism*, 58 (9), 1320–1328.
- Ben Ounis, O., Elloumi, M., Zouhal, H., Makni, E., Lac, G., Tabka, Z., & Amri, M. (2011). Effect of an individualized physical training program on resting cortisol and growth hormone levels and fat oxidation during exercise in obese children. *Annales d'Endocrinologie (Paris)*, 72 (1), 34–41.
- Bensimhon, D.R., Kraus, W.E., & Donahue, M.P. (2006). Obesity and physical activity: a review. *American Heart Journal*, 151 (3), 598–603.
- Bergman, B.C., & Brooks, G.A. (1999). Respiratory gas-exchange ratios during graded exercise in fed and fasted trained and untrained men. *Journal of Applied Physiology*, 86 (2), 479–487.
- Bordenave, S., Flavier, S., Fedou, C., Brun, J.F., & Mercier, J. (2007). Exercise calorimetry in sedentary patients: procedures based on short 3 min steps underestimate carbohydrate oxidation and overestimate lipid oxidation. *Diabetes & Metabolism*, 33 (5), 379–384.
- Brandou, F., Dumortier, M., Garandeau, P., Mercier, J., & Brun, J.F. (2003). Effects of a two-month rehabilitation program on substrate utilization during exercise in obese adolescents. *Diabetes & Metabolism*, 29 (1), 20–27.
- Brooks, G.A. (1997). Importance of the 'crossover' concept in exercise metabolism. *Clinical and Experimental Pharmacology and physiology*, 24 (11), 889–895.
- Brooks, G.A. (2012). Bioenergetics of Exercising Humans. *Comprehensive Physiology*, 2, 537–562.
- Brooks, G.A., & Mercier, J. (1994). Balance of carbohydrate and lipid utilization during exercise: the "crossover" concept. *Journal of Applied Physiology*, 76 (6), 2253–2261.
- Bruce, C.R., & Hawley, J.A. (2004). Improvements in insulin resistance with aerobic exercise training: a lipocentric approach. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 36 (7), 1196–1201.
- Brun, J.F., Jean, E., Ghanassia, E., Flavier, S., & Mercier, J. (2007). Metabolic training: new paradigms of exercise training for metabolic diseases with exercise calorimetry targeting individuals. *Annales de Réadaptation et de Médecine Physique*, 50 (6), 528–534, 520–527.
- Carter, S.L., Rennie, C.D., Hamilton, S.J., & Tarnopolsky. (2001). Changes in skeletal muscle in males and females following endurance training. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*, 79 (5), 386–392.
- Carter, J., & Jeukendrup, A.E. (2002). Validity and reliability of three commercially available breath-by-breath respiratory systems. *European Journal of Applied Physiology*, 86 (5), 435–441.
- Cheneviere, X., Malatesta, D., Gojanovic, B., & Borrani, F. (2010). Differences in whole-body fat oxidation kinetics between cycling and running. *European Journal of Applied Physiology*, 109 (6), 1037–1045.
- Coggan, A.R. (1997). The glucose crossover concept is not an important new concept in exercise metabolism. *Clinical and Experimental Pharmacology and Physiology*, 24 (11), 896–900.
- Coggan, A.R., Raguso, C.A., Gastaldelli, A., Sidossis, L.S., & Yeckel, C.W. (2000). Fat metabolism during high-intensity exercise in endurance-trained and untrained men. *Metabolism*, 49 (1), 122–128.
- Colberg, S.R., Sigal, R.J., Fernhall, B., Regensteiner, J.G., Blissmer, B.J., Rubin, R.R., Chasan-Taber, L., Albright, A.L., Braun, B., *et al.* (2010). Exercise and type 2 diabetes: the American College of Sports Medicine and the American Diabetes Association: joint position statement executive summary. *Diabetes care*, 33 (12), 2692–2696.

- Coyle, E.F., Coggan, A.R., Hemmert, M.K., Lowe, R.C., & Walters, T.J. (1985). Substrate usage during prolonged exercise following a preexercise meal. *Journal of Applied Physiology*, *59* (2), 429–433.
- Crisp, N.A., Guelfi, K.J., Licari, M.K., Braham, R., & Fournier, P.A. (2012). Does exercise duration affect Fatmax in overweight boys? *European Journal of Applied Physiology*, *112* (7), 2557–2564.
- Donnelly, J.E., Blair, S.N., Jakicic, J.M., Manore, M.M., Rankin, J.W., & Smith, B.K. (2009). American College of Sports Medicine Position Stand. Appropriate physical activity intervention strategies for weight loss and prevention of weight regain for adults. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *41* (2), 459–471.
- Dumortier, M., Brandou, F., Perez-Martin, A., Fedou, C., Mercier, J., & Brun, J.F. (2003). Low intensity endurance exercise targeted for lipid oxidation improves body composition and insulin sensitivity in patients with the metabolic syndrome. *Diabetes & Metabolism*, *29* (5), 509–518.
- Folkens, C.H., & Sime, W.E. (1981). Physical fitness training and mental health. *American Psychology*, *36* (4), 373–389.
- Friedlander, A.L., Casazza, G.A., Horning, M.A., Huie, M.J., Piacentini, M.F., Trimmer, J.K., *et al.* (1998). Training-induced alterations of carbohydrate metabolism in women: women respond differently from men. *Journal of Applied Physiology*, *85* (3), 1175–1186.
- Friedlander, A.L., Jacobs, K.A., Fattor, J.A., Horning, M.A., Hagobian, T.A., Bauer, T.A., *et al.* (2007). Contributions of working muscle to whole body lipid metabolism are altered by exercise intensity and training. *American Journal of Physiology. Endocrinology and Metabolism*, *292* (1), E107–116.
- Geerling, B.J., Alles, M.S., Murgatroyd, P.R., Goldberg, G.R., Harding, M., & Prentice, A.M. (1994). Fatness in relation to substrate oxidation during exercise. *International Journal of Obesity and Related Metabolic Disorders*, *18* (7), 453–459.
- Ghanassia, E., Brun, J.F., Fedou, C., Raynaud, E., & Mercier, J. (2006). Substrate oxidation during exercise: type 2 diabetes is associated with a decrease in lipid oxidation and an earlier shift towards carbohydrate utilization. *Diabetes & Metabolism*, *32* (6), 604–610.
- Gmada, N., Marzouki, H., Haboubi, M., Tabka, Z., Shephard, R.J., & Bouhleb, E. (2012). Crossover and maximal fat-oxidation points in sedentary healthy subjects: methodological issues. *Diabetes & Metabolism*, *38* (1), 40–45.
- Goedecke, J.H., St Clair Gibson, A., Grobler, L., Collins, M., Noakes, T. D., & Lambert, E.V. (2000). Determinants of the variability in respiratory exchange ratio at rest and during exercise in trained athletes. *American Journal of Physiology. Endocrinology and Metabolism*, *279* (6), E1325–1334.
- Gonzalez-Haro, C., Galilea, P.A., Gonzalez-de-Suso, J.M., Drobnic, F., & Escanero, J.F. (2007). Maximal lipidic power in high competitive level triathletes and cyclists. *British Journal of Sports Medicine*, *41*(1), 23–28.
- Goodpaster, B.H., Wolfe, R.R., & Kelley, D.E. (2002). Effects of obesity on substrate utilization during exercise. *Obesity Research*, *10* (7), 575–584.
- Goodpaster, B.H., Katsiaras, A., & Kelley, D.E. (2003). Enhanced fat oxidation through physical activity is associated with improvements in insulin sensitivity in obesity. *Diabetes*, *52* (9), 2191–2197.
- Gore, C.J., Catcheside, P.G., French, S.N., Bennett, J.M., & Laforgia, J. (1997). Automated VO₂max calibrator for open-circuit indirect calorimetry systems. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *29* (8), 1095–1103.
- Gore, C.J., Clark, R.J., Shipp, N.J., Van Der Ploeg, G.E., & Withers, R.T. (2003). CPX/D underestimates VO(2) in athletes compared with an automated Douglas bag system. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *35* (8), 1341–1347.
- Helge, J.W., Fraser, A.M., Kriketos, A.D., Jenkins, A.B., Calvert, G. D., Ayre, K.J., *et al.* (1999). Interrelationships between muscle fibre type, substrate oxidation and body fat. *International Journal of Obesity and Related Metabolic Disorders*, *23* (9), 986–991.
- Hopkins, M., Jeukendrup, A., King, N.A., & Blundell, J.E. (2011). The relationship between substrate metabolism, exercise and appetite control: does glycogen availability influence the motivation to eat, energy intake or food choice? *Sports Medicine*, *41* (6), 507–521.
- Jean, E., Grubka, E., Karafiat, M., Flavier, S., Fédou, C., Mercier, J., *et al.* (2006). Effets d'un entraînement en endurance ciblé par la calorimétrie à l'effort chez des diabétiques de type 2. *Annales d'Endocrinologie (Paris)*, *67*, 462.
- Jeukendrup, A.E. (2003). Modulation of carbohydrate and fat utilization by diet, exercise and environment. *Biochemical Society Transactions*, *31* (Pt 6), 1270–1273.
- Kanaley, J.A., Weatherup-Dentes, M.M., Alvarado, C.R., & Whitehead, G. (2001). Substrate oxidation during acute exercise and with exercise training in lean and obese women. *European Journal of Applied Physiology*, *85* (1–2), 68–73.
- Katoh, J., Hara, Y., Kurusu, M., Miyaji, J., & Narutaki, K. (1996). Cardiorespiratory function as assessed by exercise testing in patients with non-insulin-dependent diabetes mellitus. *Journal of International Medical Research*, *24* (2), 209–213.
- Kelley, D.E., Goodpaster, B., Wing, R.R., & Simoneau, J.A. (1999). Skeletal muscle fatty acid metabolism in association with insulin resistance, obesity, and weight loss. *American Journal of Physiology*, *277* (6 Pt 1), E1130–1141.
- Klein, S., Coyle, E.F., & Wolfe, R.R. (1994). Fat metabolism during low-intensity exercise in endurance-trained and untrained men. *American Journal of Physiology*, *267* (6 Pt 1), E934–E940.
- Lavault, P., Deaux, S., Romain, A.J., Fedou, C., Mercier, J., & Brun, J. F. (2011). Interest of quantification of muscle mass for interpreting exercise calorimetry. *Science and Sports*, *26* (2), 88–91.

- Lazzer, S., Busti, C., Agosti, F., De Col, A., Pozzo, R., & Sartorio, A. (2007). Optimizing fat oxidation through exercise in severely obese Caucasian adolescents. *Clinical Endocrinology (Oxf)*, *67* (4), 582–588.
- Lindstrom, J., Ilanne-Parikka, P., Peltonen, M., Aunola, S., Eriksson, J. G., Hemiö, K., Finnish Diabetes Prevention Study group (2006). Sustained reduction in the incidence of type 2 diabetes by lifestyle intervention: follow-up of the Finnish Diabetes Prevention Study. *Lancet*, *368* (9548), 1673–1679.
- Mendelson, M., Jinwala, K., Wuyam, B., Levy, P., & Flore, P. (2012). Can crossover and maximal fat oxidation rate points be used equally for ergocycling and walking/running on a track? *Diabetes & Metabolism*, *38* (3), 264–270.
- Michallet, A.S., Tonini, J., Perrin, C., Favre-Juvin, A., Wuyam, B., & Flore, P. (2007). Implication des facteurs cardiorespiratoires dans l'intolérance à l'effort de l'adolescent obèse. *Science et Sport*, *22*, 309–311.
- Michallet, A.S., Tonini, J., Regnier, J., Guinot, M., Favre-Juvin, A., Bricout, V., et al. (2008). Methodological aspects of crossover and maximum fat-oxidation rate point determination. *Diabetes & Metabolism*, *34* (5), 514–523.
- Millet, G.P., Vleck, V.E., & Bentley, D.J. (2009). Physiological differences between cycling and running: lessons from triathletes. *Sports and Medicine*, *39* (3), 179–206.
- Mittendorfer, B., Fields, D.A., & Klein, S. (2004). Excess body fat in men decreases plasma fatty acid availability and oxidation during endurance exercise. *American Journal of Physiology. Endocrinology and Metabolism*, *286* (3), E354–E362.
- Montain, S.J., Hopper, M.K., Coggan, A.R., & Coyle, E.F. (1991). Exercise metabolism at different time intervals after a meal. *Journal of Applied Physiology*, *70* (2), 882–888.
- Ohkawara, K., Tanaka, S., Miyachi, M., Ishikawa-Takata, K., & Tabata, I. (2007). A dose-response relation between aerobic exercise and visceral fat reduction: systematic review of clinical trials. *International Journal of Obesity (Lond)*, *31* (12), 1786–1797.
- Perez-Martin, A., Dumortier, M., Raynaud, E., Brun, J.F., Fedou, C., Bringer, J., et al. (2001). Balance of substrate oxidation during submaximal exercise in lean and obese people. *Diabetes & Metabolism*, *27* (4 Pt 1), 466–474.
- Peronnet, F., & Massicotte, D. (1991). Table of nonprotein respiratory quotient: an update. *Canadian Journal of Sport Sciences*, *16* (1), 23–29.
- Peronnet, F., Thibault, G., & Tremblay, J. (2010). Lipoxmax : mythe ou réalité? *Sport & Vie*, *119*, 27–32.
- Phillips, S.M., Green, H.J., Tarnopolsky, M.A., Heigenhauser, G.F., Hill, R.E., & Grant, S.M. (1996). Effects of training duration on substrate turnover and oxidation during exercise. *Journal of Applied Physiology*, *81* (5), 2182–2191.
- Romain, A.J., Carayol, M., Desplan, M., Fedou, C., Ninot, G., Mercier, J., Avignon, A., Brun, J.F. (2012). Physical activity targeted at maximal lipid oxidation: a meta-analysis. *Journal of Nutrition and Metabolism*, *2012*, 285–395.
- Rosenkilde, M., Nordby, P., Nielsen, L.B., Stallknecht, B.M., & Helge, J.W. (2010). Fat oxidation at rest predicts peak fat oxidation during exercise and metabolic phenotype in overweight men. *International Journal of Obesity (Lond)*, *34* (5), 871–877.
- Sahlin, K., Sallstedt, E.K., Bishop, D., & Tonkonogi, M. (2008). Turning down lipid oxidation during heavy exercise—what is the mechanism? *Journal of Physiology and Pharmacology*, *59* (Suppl 7), 19–30.
- Sardinoux, M., Brun, J.F., Lefebvre, P., Bringer, J., Fabre, G., Salsano, V. (2009). Influence of bariatric surgery on exercise maximal lipid oxidation point in grade 3 obese patients. *Fund Clin Pharmacol*, *23*, 57.
- Sidossis, L.S., Wolfe, R.R., & Coggan, A.R. (1998). Regulation of fatty acid oxidation in untrained vs. trained men during exercise. *American Journal of Physiology*, *274* (3 Pt 1), E510–E515.
- Snowling, N.J., & Hopkins, W.G. (2006). Effects of different modes of exercise training on glucose control and risk factors for complications in type 2 diabetic patients: a meta-analysis. *Diabetes Care*, *29* (11), 2518–2527.
- Strasser, B., Spreitzer, A., & Haber, P. (2007). Fat loss depends on energy deficit only, independently of the method for weight loss. *Annals of Nutrition and Metabolism*, *51* (5), 428–432.
- Thibault, H., Duche, P., Meyer, M., & Peres, G. (2008). Recommandations d'activité physique, dans : activité physique et obésité de l'enfant : bases pour une prescription adaptée. *Dicom*, 53–69.
- Thivel, D., Blundell, J.E., Duche, P., & Morio, B. (2012). Acute exercise and subsequent nutritional adaptations: what about obese youths? *Sports Medicine*, *42* (7), 607–613.
- van Aggel-Leijssen, D.P., Saris, W.H., Wagenmakers, A.J., Hul, G.B., & van Baak, M.A. (2001). The effect of low-intensity exercise training on fat metabolism of obese women. *Obesity Research*, *9* (2), 86–96.
- van Aggel-Leijssen, D.P., Saris, W.H., Wagenmakers, A.J., Senden, J.M., & van Baak, M.A. (2002). Effect of exercise training at different intensities on fat metabolism of obese men. *Journal of Applied Physiology*, *92* (3), 1300–1309.
- Venables, M.C., Achten, J., & Jeukendrup, A.E. (2005). Determinants of fat oxidation during exercise in healthy men and women: a cross-sectional study. *Journal of Applied Physiology*, *98* (1), 160–167.
- Venables, M.C., & Jeukendrup, A.E. (2008). Endurance training and obesity: effect on substrate metabolism and insulin sensitivity. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *40* (3), 495–502.
- Wade, A.J., Marbut, M.M., & Round, J.M. (1990). Muscle fibre type and aetiology of obesity. *Lancet*, *335* (8693), 805–808.
- Wasserman, K. (1987). *Principles of exercise testing and interpretation*. Philadelphia PA, USA: Lea and Febiger ed.
- Zakrzewski, J.K., & Tolfrey, K. (2012). Comparison of fat oxidation over a range of intensities during treadmill and cycling exercise in children. *European Journal of Applied Physiology*, *112* (1), 163–171.