

**En quoi les nouvelles stratégies glucidiques à l'effort redéfinissent-elles l'optimisation de la performance en endurance, tout en repoussant les limites digestives et en soulevant des questionnements inédits sur la santé de l'athlète ?**

**MEYER Robin**

**Bachelor of Science Nutrition Sportive**

**3ème année**

**Aix-en-Provence**

*Nutrition du Sportif, Physiologie et métabolisme*

# Sommaire

<b>Introduction</b> .....	1
<b>I. Physiologie de l'absorption et de l'utilisation des glucides pendant l'effort</b> .....	2
1. Mécanismes d'absorption intestinale.....	2
2. Absorption au niveau musculaire et utilisation .....	2
3. Impact des apports sur la performance .....	3
<b>II. Troubles intestinaux à l'effort et leurs déterminants</b> .....	4
1. Prévalence et causes des troubles gastro-intestinaux en endurance .....	4
2. L'influence de l'ingestion des glucides.....	4
<b>III. L'importance des types de glucides et du ratio</b> .....	5
1. Capacité d'absorption des transporteurs.....	5
2. Mélanges de glucides et les meilleurs ratios.....	5
<b>IV. Doses recommandées et nouvelles stratégies d'apports « massifs » de glucides</b> .....	7
1. Evolution des recommandations classiques .....	7
2. Stratégies à « très hautes doses » avantages et limites.....	7
<b>V. Gut training et individualisation des stratégies glucidiques</b> .....	11
1. Concept et mécanisme du Gut training .....	11
2. Intérêts de l'individualisation des apports glucidiques .....	12
3. Les tests d'oxydation des glucides : plus qu'une simple tendance .....	13
<b>Conclusion</b> .....	15
<b>Abstract</b> .....	16
<b>Bibliographie</b> .....	17
<b>Annexes</b> .....	19

## Introduction

Dans le domaine de la haute performance, la nutrition est désormais traitée comme un pilier fondamental, au même titre que l'entraînement physique. L'augmentation constante des records et de l'intensité des épreuves d'endurance ne repose plus uniquement sur l'optimisation physiologique, mais sur une gestion millimétrée de l'apport énergétique. Le cyclisme professionnel, à cet égard, fait figure de référence : l'intégration de nutritionnistes et de cuisiniers au sein des staffs techniques a permis de transformer les données scientifiques en protocoles nutritionnels ultra-précis et individualisés, expliquant en partie l'évolution des performances actuelles. Alors que les recommandations classiques plafonnaient longtemps à 90g de glucides par heure, de nouvelles stratégies poussent désormais ces seuils vers des doses massives, atteignant 120 g/h voir plus chez l'élite mondiale.

Cette quête de l'apport maximal soulève des défis physiologiques majeurs. La performance dépend de la capacité de l'organisme à transporter les glucides vers les muscles via des transporteurs intestinaux spécifiques. Dépasser leur capacité de saturation expose l'athlète à des troubles gastro-intestinaux souvent invalidants. Par ailleurs, si l'efficacité énergétique à court terme est documentée, la science manque de recul sur les répercussions à long terme de ces charges glycémiques extrêmes. L'impact de ces protocoles sur la santé métabolique et générale du sportif doit être au centre de l'attention.

L'optimisation de la performance se joue donc désormais sur l'équilibre entre efficacité énergétique, tolérance digestive et préservation de la santé. Dès lors, nous pouvons nous demander : **en quoi les nouvelles stratégies glucidiques à l'effort redéfinissent-elles l'optimisation de la performance en endurance, tout en repoussant les limites digestives et en soulevant des questionnements inédits sur la santé de l'athlète ?**

Pour répondre à cette problématique, nous analyserons d'abord la physiologie de l'absorption et les plafonds d'oxydation. Nous aborderons ensuite la genèse des troubles intestinaux avant de détailler l'importance du ratio glucose-fructose. Enfin, après avoir étudié les stratégies de « *Gut Training* » et les protocoles à doses massives, nous conclurons sur la nécessaire individualisation des apports face au manque de données longitudinales concernant la santé des athlètes.

# I. **Physiologie de l'absorption et de l'utilisation des glucides pendant l'effort**

## **1. Mécanismes d'absorption intestinale**

L'absorption intestinale des glucides se déroule principalement au niveau de l'intestin grêle et concerne majoritairement les monosaccharides issus de la digestion des polysaccharides et disaccharides alimentaires. Le glucose et le galactose sont absorbés par les entérocytes via un mécanisme de transport actif secondaire dépendant du sodium, assuré par le cotransporteur SGLT1, localisé sur la membrane apicale. Ce transport est rendu possible grâce au gradient électrochimique du sodium, maintenu par la pompe  $\text{Na}^+/\text{K}^+$ -ATPase située sur la membrane basolatérale.

Une fois à l'intérieur de l'entérocyte, le glucose est majoritairement transféré vers la circulation sanguine par diffusion facilitée via le transporteur GLUT2, exprimé sur la membrane basolatérale. En situation de forte charge glucidique luminale, GLUT2 peut également être transloqué de manière transitoire vers la membrane apicale, augmentant ainsi la capacité d'absorption intestinale du glucose. Ces mécanismes permettent une adaptation rapide et efficace de l'intestin aux apports glucidiques, assurant l'homéostasie énergétique de l'organisme.[1], [2]

Concernant le fructose, il est absorbé par diffusion facilitée via le transporteur GLUT5, situé sur la membrane apicale des entérocytes. Ce mécanisme est indépendant du sodium et présente une capacité limitée, rendant l'absorption du fructose facilement saturable. Une fois dans l'entérocyte, le fructose est transféré vers la circulation sanguine principalement par le transporteur GLUT2 localisé sur la membrane basolatérale. [3]

Ces mécanismes d'absorption sont schématisés en annexe 1.

## **2. Absorption au niveau musculaire et utilisation**

Une fois dans la circulation sanguine, les glucides vont être absorbés par les différents organes et les muscles. Nous allons particulièrement nous intéresser aux processus physiologiques qui entrent en jeu dans les muscles squelettiques.

### **a. Absorption musculaire**

Au niveau du muscle squelettique, l'entrée du glucose dans les fibres musculaires est principalement assurée par le transporteur GLUT4. En condition basale, ce transporteur est majoritairement stocké dans des vésicules intracellulaires. Suite à l'ingestion de glucides, l'élévation de l'insulinémie stimule la translocation de GLUT4 vers la membrane cellulaire, augmentant ainsi la captation du glucose par le muscle. Ce mécanisme permet l'utilisation immédiate du glucose comme substrat énergétique ou son stockage sous forme de glycogène musculaire. L'activation de GLUT4 constitue donc un élément central de la régulation de l'homéostasie glucidique et du métabolisme énergétique musculaire.[4]

### **b. Utilisation par les muscles**

Le métabolisme glucidique musculaire est dicté principalement par l'intensité de l'effort. Le but sera la production d'ATP qui est la véritable « monnaie énergétique » de l'organisme. En amont de l'exercice, la glycogénogenèse permet de condenser le glucose sous forme de glycogène, constituant une réserve

d'énergie immédiate au cœur même de la cellule musculaire. Lors d'un effort d'endurance, le muscle sollicite prioritairement la glycolyse aérobie : le glucose, qu'il provienne de ces réserves internes ou de l'apport exogène via la circulation sanguine, est dégradé puis totalement oxydé au sein des mitochondries grâce à l'oxygène. Le  $\text{CO}_2$ , principal déchet de cette dégradation sera alors éliminé par la respiration. Ce processus offre le rendement énergétique le plus élevé et permet de soutenir la puissance sur le long terme. Cependant, lorsque l'intensité dépasse les capacités d'oxygénation, le muscle active la glycolyse anaérobie, une voie de secours ultra-rapide mais moins rentable, qui transforme le glucose sans oxygène tout en générant des lactates. L'enjeu des stratégies nutritionnelles modernes est alors de maximiser la disponibilité du glucose sanguin pour alimenter la voie aérobie, préservant ainsi le précieux stock de glycogène pour les phases les plus intenses de l'effort.[5]

Un schéma récapitulatif des voies métaboliques est à retrouver en annexe 2.

### 3. Impact des apports sur la performance

Sur le plan énergétique, la performance repose sur une double exigence : la constitution de réserves de glycogène optimales et la capacité à différer leur épuisement. L'organisme ne dispose toutefois que de stocks limités, estimés en moyenne entre 400 et 600g dans les muscles et environ 100g au niveau hépatique. Ces capacités de stockage sont hautement individuelles et varient selon le niveau d'entraînement, la masse musculaire ainsi que le sexe de l'athlète. À une intensité de 70 à 80% du  $\text{VO}_2\text{max}$ , ces réserves s'épuisent en seulement 90 à 120 minutes, marquant une limite physiologique critique pour l'effort d'endurance.

L'apport de glucides exogènes durant l'effort constitue un levier de performance majeur qui agit au-delà d'un simple apport calorique. Son premier rôle est métabolique : en fournissant une source d'énergie directe via la circulation sanguine, l'ingestion de glucides préserve les stocks de glycogène, au niveau hépatique et musculaire. Cette épargne du foie est cruciale, car elle garantit le maintien de la glycémie sur le long terme, retardant ainsi la fatigue centrale liée à l'hypoglycémie. De plus, les muscles peuvent conserver leurs réserves afin de les utiliser au moment opportun. Au-delà de cet aspect purement énergétique, les glucides exercent une influence directe sur le système nerveux central. Même sur des efforts de courte durée (<60min), le simple contact des molécules glucidiques avec la cavité buccale stimule des zones cérébrales liées à la motivation et réduit la perception de l'effort. Ce signal neurologique positif permet au cerveau de moduler la performance à la hausse en fonction de la disponibilité énergétique perçue, indépendamment de l'état réel des stocks musculaires. Dans leur article, Jeukendrup et Al, suggèrent que le glucose seul améliorerait la puissance de 9% par rapport au placebo, et le mélange glucose-fructose ajoutait 8% de gain supplémentaire par rapport au glucose seul. [6] En résumé, le ravitaillement exogène sécurise les réserves internes tout en optimisant le message nerveux envoyé aux muscles.[7]

## II. Troubles intestinaux à l'effort et leurs déterminants

### 1. Prévalence et causes des troubles gastro-intestinaux en endurance

Lors de l'exercice physique, en particulier à intensité modérée à élevée, une redistribution du débit sanguin s'opère au profit des muscles actifs et de la peau, au détriment des organes splanchniques. Cette hypoperfusion intestinale peut atteindre 60 à 80%, entraînant une ischémie transitoire de la muqueuse digestive.

La diminution du flux sanguin splanchnique observée à l'effort compromet l'apport en oxygène et en nutriments aux entérocytes, entraînant une altération des jonctions serrées (« tight junctions ») de l'épithélium intestinal. Cette atteinte de l'intégrité épithéliale est objectivée par l'augmentation de l'intestinal fatty acid binding protein (I-FABP), biomarqueur spécifique des lésions des entérocytes, dont l'élévation reflète la sévérité de l'ischémie intestinale induite par l'exercice. Cette hypoxie intestinale, associée au stress oxydatif généré lors de la phase de reperfusion (retour du sang au niveau intestinal après l'effort), perturbe la barrière intestinale, facilitant le passage de macromolécules et de composés bactériens tels que les lipopolysaccharides (LPS) vers la circulation systémique. Ce phénomène stimule une réponse inflammatoire systémique, marquée notamment par l'augmentation de cytokines pro-inflammatoires telles que l'interleukine-6 (IL-6).

Ces mécanismes expliquent en partie l'apparition de troubles gastro-intestinaux à l'effort tels que douleurs abdominales, nausées, diarrhées, fréquemment observés chez les sportifs d'endurance. L'intensité et la durée de l'effort, ainsi que l'état d'hydratation et la stratégie nutritionnelle, modulent fortement l'ampleur de ces perturbations.[8] [9] [10]

### 2. L'influence de l'ingestion des glucides

L'ingestion de glucides pendant l'exercice joue un rôle ambivalent sur la fonction gastro-intestinale et l'intégrité de la barrière intestinale. D'une part, des apports glucidiques excessifs, mal adaptés ou sous forme de solutions hypertoniques peuvent aggraver les troubles gastro-intestinaux à l'effort. Lorsque la capacité d'absorption intestinale est dépassée, les glucides non absorbés s'accumulent dans la lumière intestinale, augmentant la charge osmotique et favorisant des symptômes tels que ballonnements, diarrhées ou inconfort digestif. [6] Dans un contexte d'hypoperfusion splanchnique induite par l'exercice, cette accumulation de glucides dans la lumière peut accentuer le stress exercé sur une muqueuse déjà fragilisée et contribuer à une altération transitoire de la barrière intestinale. [8]

À l'inverse, plusieurs travaux suggèrent qu'une stratégie glucidique adaptée peut exercer un effet protecteur sur l'intégrité intestinale. L'ingestion de glucides exogènes pendant l'effort permet de fournir un substrat énergétique directement utilisable par les entérocytes, contribuant à limiter les dommages épithéliaux induits par l'ischémie et le stress oxydatif. [11] [12]

Par ailleurs, les boissons énergétiques glucidiques, à une concentration appropriée, favorisent la réabsorption de l'eau au niveau intestinal via des mécanismes de co-transport glucose-sodium, participant ainsi au maintien de l'hydratation et du volume plasmatique. [13]

L'impact des glucides sur la barrière intestinale dépend donc étroitement de leur quantité, de leur forme et de leur capacité d'absorption au niveau intestinal. Cette notion souligne l'importance des mécanismes

de transport des glucides, dont la saturation peut limiter l'absorption et favoriser les effets délétères. L'utilisation de plusieurs sources de glucides mobilisant des transporteurs intestinaux distincts apparaît ainsi comme une stratégie pertinente pour optimiser l'absorption, améliorer la tolérance digestive et limiter les perturbations de la barrière intestinale à l'effort.

### **III. L'importance des types de glucides et du ratio**

L'optimisation des apports glucidiques pendant l'exercice ne repose pas uniquement sur la quantité totale ingérée, mais également sur le type de glucides consommés et sur leur ratio d'association. Les données scientifiques montrent que l'utilisation de glucides multiples permet d'augmenter l'oxydation exogène, d'améliorer les troubles digestifs, de retarder la fatigue et d'améliorer la performance lors d'efforts prolongés.

#### **1. Capacité d'absorption des transporteurs**

L'absorption des glucides au niveau intestinal repose sur des transporteurs spécifiques situés à la membrane apicale des entérocytes. Le glucose et le galactose sont absorbés via le transporteur sodium-dépendant SGLT1 (Sodium-Glucose Linked Transporter 1), dont la capacité maximale est estimée à environ 60g par heure. Lorsque cette capacité est atteinte, l'absorption devient limitante et l'excès de glucose demeure dans la lumière intestinale, pouvant entraîner une augmentation de l'osmolarité et des troubles digestifs.

Le fructose, quant à lui, est absorbé par un transporteur distinct, GLUT5, dont la capacité est estimée à environ 30g par heure. En combinant glucose et fructose, il est donc possible de solliciter simultanément deux voies de transport différentes (SGLT1 et GLUT5), ce qui augmente la capacité totale d'absorption intestinale et permet d'atteindre des apports supérieurs à 60g/h sans majorer significativement le risque d'inconfort digestif.

Les travaux de Jeukendrup et Al ont démontré que l'oxydation exogène des glucides plafonne à environ 1 g/min ( $\approx 60$  g/h) lorsque seule une source de glucose est consommée, alors qu'elle peut atteindre 1,5 à 1,75 g/min avec l'ingestion combinée de glucose et de fructose. [13]

#### **2. Mélanges de glucides et les meilleurs ratios**

##### **a. Combiner plusieurs sources de glucides permet une meilleure oxydation totale**

Les travaux de Wallis et al. constituent une étape pionnière dans la compréhension du métabolisme glucidique à l'effort, ils ont rapporté des taux d'oxydation de glucides exogènes dépassant le seuil symbolique de 1,1 g/min pour atteindre environ 1,26 g/min. Ces recherches ont mis en évidence que si l'ingestion de glucose seul plafonne entre 0,8 et 1,1 g/min en raison de la saturation des transporteurs SGLT1, l'ajout de fructose permet d'augmenter ces taux d'oxydation de près de 55% par rapport à une dose isoénergétique de glucose seul. Cette avancée s'explique par l'utilisation de voies de transport intestinales distinctes, le fructose utilisant les transporteurs GLUT-5, ce qui évite l'accumulation de

substrats non absorbés dans le tube digestif et réduit ainsi le risque de complications gastro-intestinales.[14]

Depuis, de nombreuses études ont démontré que l'utilisation de multi-sources de glucides permettait d'augmenter leur absorption. Une méta-analyse a montré que le mélange glucose-fructose entraîne une augmentation moyenne du taux d'oxydation exogène d'environ 0,27 g/min par rapport au glucose seul. Un autre point crucial de cette méta-analyse est que l'ingestion de glucose seul a tendance à augmenter l'oxydation des glucides endogènes (glycogène musculaire et hépatique), alors que le mélange Glu-Fru permet d'utiliser davantage l'énergie venant de l'apport exogène, épargnant ainsi les réserves internes pour la fin de l'effort.[15]

#### **b. Le ratio 1:0.8 permet les meilleurs taux d'oxydation**

Concernant les meilleurs ratios, historiquement, un ratio glucose:fructose (Glu-Fru) de 2:1 a été largement étudié et recommandé pour les efforts d'endurance de longue durée (>2–3 heures). Ce ratio permet d'atteindre des apports de l'ordre de 90 g/h avec une bonne tolérance digestive et une amélioration significative de la performance comparativement à une ingestion de glucose seul.

Des recherches plus récentes suggèrent qu'un ratio proche de 1:0,8 (Glu-Fru) pourrait optimiser davantage l'oxydation exogène et améliorer la tolérance gastro-intestinale lors d'apports élevés (90 à 120 g/h), notamment chez les athlètes entraînés à ces stratégies nutritionnelles. En effet, les travaux de O'Brien et Al ont démontré que l'optimisation de la performance en endurance repose sur l'utilisation d'un mélange de fructose, de maltodextrine et de glucose selon un ratio spécifique de 1:0.8 lequel surpasse nettement les ratios traditionnels de 0,5 (2:1) et 1,25 (1:1,25). Ce ratio de 1:0.8 permet d'atteindre des taux d'oxydation des glucides exogènes 6 % à 13 % plus élevés que les autres formulations, tout en maximisant l'efficacité nette d'oxydation. Sur le plan physiologique, ils expliquent cette efficacité accrue par une synergie d'absorption où le fructose stimule le transport du glucose, probablement via le recrutement de transporteurs GLUT2, tout en étant lui-même converti en glucose et en lactate par le foie pour alimenter les muscles actifs. Cette dynamique métabolique se traduit par un avantage sur le terrain : la puissance moyenne lors des sprints finaux est augmentée d'environ 3% avec le ratio 1:0.8 par rapport aux autres mélanges. De plus, malgré des taux d'ingestion élevés, la tolérance digestive reste bonne, avec des niveaux de gêne gastro-intestinale très faibles, suggérant que le ratio 1:0.8 offre le meilleur compromis entre apport énergétique massif et confort intestinal.[16] Les graphiques en annexe 4 démontrent ces résultats.

Jeukendrup et Al ont résumé les recommandations actuelles dans un tableau présent en annexe 5. Dont les résultats sont présentés ci-dessous.[6]

- Jusqu'à 60 g/h : une seule source de glucose (ou maltodextrine) est suffisante ;
- Entre 60 et 90 g/h : l'association glucose + fructose est recommandée ;
- Au-delà de 90 g/h : un ratio optimisé (2:1 ou 1:0,8) peut être envisagé chez des athlètes entraînés et habitués

## IV. Doses recommandées et nouvelles stratégies d'apports « massifs » de glucides

### 1. Evolution des recommandations classiques

La compréhension de l'absorption intestinale a marqué un tournant décisif dans l'histoire de la nutrition de l'effort. Comme nous l'avons vu, la mise en évidence des transporteurs SGLT1 (pour le glucose) et GLUT5 (pour le fructose) a permis de briser le plafond de verre des 60g de glucides par heure. En exploitant ces voies de passage multiples via des ratios précis (comme le 2:1 ou le 1:0.8), la science a ouvert la voie à une utilisation bien plus efficace du carburant exogène.

Petit à petit, les glucides se sont imposés comme le nutriment principal et essentiel à la performance. Si, par le passé, les stratégies étaient parfois floues ou basées sur un apport hydrique simple, l'apparition massive des boissons énergétiques, des gels et, plus récemment, des gummies, a transformé la gestion de l'effort. Ces formats modernes offrent une praticité et une densité énergétique que les aliments solides traditionnels ne pouvaient égaler, permettant de maintenir une glycémie stable et de préserver les stocks de glycogène plus longtemps et donc de hauts niveaux de performance.

Aujourd'hui, la nutrition sportive ne se contente plus de répondre à un besoin ; elle est devenue un moteur de performance entouré d'un marketing colossal. Les gammes de produits se sont multipliées, s'adaptant à chaque discipline et chaque besoin spécifique (textures, saveurs, digestibilité). Cette expansion est portée par une recherche scientifique omniprésente qui cherche sans cesse à repousser les limites de la tolérance gastrique et de l'oxydation des glucides.

Les produits énergétiques sont désormais de plus en plus concentrés, intégrant des technologies comme l'encapsulation (hydrogels) pour faciliter le passage gastrique. Nous assistons à un véritable changement de paradigme : là où 60g/h semblaient être une limite haute il y a dix ans, les stratégies nutritionnelles actuelles évoluent vers des apports massifs, dépassant fréquemment les 90g voire 120g de glucides par heure pour les athlètes d'élite.

### 2. Stratégies à « très hautes doses » avantages et limites

Il n'y a pas si longtemps, le sportif d'endurance devait faire attention à son apport calorique pour ne pas prendre de poids voir même en perdre. Désormais la tendance s'est inversée puisque les sportifs et nutritionniste vont chercher à compenser les dépenses caloriques qui peuvent être colossal dans le sport d'endurance. Les apports seront adaptés pendant les différents repas et collations mais aussi pendant l'effort. En effet, il est important de noter que les sportifs d'endurance peuvent passer de longues heures à s'entraîner et donc sauter un ou plusieurs repas tout en ayant d'importantes dépenses. Au-delà de l'apport énergétique pour l'effort, l'apport en glucides pendant l'effort permet donc d'apporter des calories facilement assimilables pendant l'activité. Les nouvelles stratégies d'apport glucidiques massifs sont donc la nouvelle tendance actuelle avec des apports pouvant être de 120g de glucides/heure voir plus notamment dans le cyclisme. Cette tendance suit la vague du marketing et de la communication autour des produits énergétiques mais aussi de l'évolution impressionnante des performances dans le sport de

haut niveau. Mais nous devons nous interroger sur les réels avantages mais aussi sur les potentiels conséquences physiques, physiologiques et métaboliques de ces nouvelles stratégies.

#### a. Intérêts et conséquences

##### **Oxydation des glucides exogène**

Les études montrent que consommer 120g glucides versus 90g de glucides par heure sur un effort ponctuel permet d'améliorer l'oxydation des glucides exogènes. Dans leur article, Podlogar et al. Montrent une augmentation de 17% malgré une efficacité d'oxydation réduite (75,5% VS 85,9%).[17] Ce qui signifie que même si le corps "gaspille" une plus grande part de ce qu'il consomme, la quantité totale de sucre qui réussit à passer dans le sang reste plus élevée, ce qui permet aux muscles d'en brûler davantage au total. À noter cependant que dans leur étude, les deux groupes comparés n'ont pas le même ratio en glucides (1 :2 VS 1 :0.8), ce qui peut représenter un biais. L'annexe 6 illustre ces résultats.

##### **Oxydation des glucides endogènes**

En revanche les études ne montrent pas d'amélioration dans « l'économie » des réserves en glycogène, bien au contraire. Contrairement à l'idée reçue, ingérer des doses très élevées de glucides pourrait paradoxalement augmenter l'utilisation de vos propres réserves de glycogène musculaire par rapport à une dose plus « conventionnelle », probablement en raison d'une intensité d'oxydation globale plus élevée. [18].

L'annexe 6 illustre ces résultats.

##### **Oxydation des lipides et adaptation à l'entraînement**

L'apport massif de glucides modifie le profil métabolique de l'athlète en provoquant une inhibition de l'oxydation des lipides. En saturant l'organisme de glucides exogènes, le corps réduit la lipolyse et le transport des acides gras vers les mitochondries, rendant le métabolisme presque exclusivement dépendant des glucides pour produire de l'énergie. Si cette stratégie est redoutable pour la performance en compétition, l'article souligne qu'elle peut limiter les adaptations mitochondriales à long terme, comme la capacité à brûler efficacement les graisses, si elle est utilisée systématiquement à l'entraînement. [18]

##### **Performances « ponctuelles »**

Au niveau des performances sur un effort ponctuel, les études actuelles ne montrent aucun impact positif sur les performances. Selon, Johneric et al, le bénéfice maximal est atteint à 78 g/h, tandis que des doses supérieures (111 g/h, 225 g/h) s'avèrent même contre-productives ou moins efficaces que des apports modérés. [19]

À l'heure actuelle, nous ne disposons pas de données concernant les possibles gains purs lors d'effort d'ultra-endurance sur plusieurs jours comme peuvent l'être les courses à étapes en cyclisme.

##### **Apport énergétique**

En revanche, Wilson s'est intéressé à l'intérêt de l'apport calorifique apportait par d'importantes doses de glucides à l'effort pour compenser les très fortes dépenses énergétiques lors d'épreuves d'ultra endurance pouvant s'enchaîner sur plusieurs jours. L'adoption d'apports glucidiques supérieurs à 100 g/h représente une stratégie de compensation énergétique cruciale pour pallier les dépenses caloriques extrêmes du

cyclisme professionnel, permettant de couvrir jusqu'à 50% des besoins métaboliques directement pendant l'effort. En maximisant l'apport exogène, l'athlète réduit drastiquement le déficit énergétique accumulé durant la course, ce qui limite le catabolisme musculaire et préserve le glycogène hépatique nécessaire au maintien de la glycémie. Cette gestion proactive de la balance énergétique ne se limite pas à la performance immédiate, mais optimise la « durabilité » de l'athlète en facilitant une resynthèse plus rapide du glycogène post-exercice, facteur déterminant pour la répétition des efforts lors des courses par étapes. Il est important de savoir que lors d'épreuves comme le Tour de France, les cyclistes ont des besoins énergétiques très élevés aux alentours de 6000-8000 kcal/jour voir plus. Le nombre de repas journaliers étant limité et l'appétit pouvant être impacté par l'effort, la consommation de glucides pendant l'effort représente donc une part importante et non négligeable de l'apport énergétique journalier. Ceci permet ainsi de limiter le déficit énergétique journalier et donc une meilleure récupération et de meilleures performance au cours de l'épreuve. [18]

Les graphiques en annexe 7 illustrent les résultats.

### **Système nerveux central**

Au-delà de l'apport énergétique, les doses massives exercent un rôle protecteur déterminant sur le système nerveux central (SNC) en retardant l'apparition de la fatigue centrale, souvent responsable de la baisse de performance avant même l'épuisement musculaire. En maintenant une glycémie stable et élevée, ces apports garantissent un flux constant de glucose vers le cerveau, évitant ainsi la dérive des neurotransmetteurs (comme l'augmentation du ratio tryptophane libre/acides gras) qui signale au cerveau de réduire la commande motrice. Ce soutien métabolique permet de préserver la « durabilité » de l'athlète, c'est-à-dire sa capacité à maintenir une puissance élevée et une lucidité tactique après plusieurs heures d'effort intense. En somme, l'ingestion de hautes doses de glucides agit comme un signal de sécurité pour le SNC, lui indiquant que les ressources énergétiques sont abondantes, ce qui lève les mécanismes d'inhibition neuronale et permet de prolonger l'effort à haute intensité. [18]

### **Troubles gastro-intestinaux**

Bien que la consommation excessive de glucides exogènes puisse entraîner des troubles gastro-intestinaux, les études actuelles montrent que ces effets restent très limités avec le nouveau ratio 1 : 0,8. D'autre part, la revue de Wilson souligne que cette tolérance n'est pas innée mais résulte d'un « entraînement de l'intestin » (*Gut Training*), une adaptation fonctionnelle qui permet d'augmenter la capacité d'absorption et la vitesse de vidange gastrique. En somme, la barrière aux hautes doses de glucides n'est plus une limite biologique fixe, mais un paramètre modulable par le choix d'un ratio de sucres optimal et une exposition chronique à l'entraînement, permettant ainsi d'atteindre 120 g/h avec un confort digestif similaire aux doses standards de 90 g/h. [17][18]

Les résultats de l'étude de Podlogar concernant les troubles gastriques sont illustrés sur les graphiques en annexe 8.

## **b. Limites et risques**

Bien que la révolution glucidique offre des avantages indéniables en termes de performance et de récupération, l'adoption généralisée de doses massives ( $\geq 100$  g/h) soulève des interrogations majeures quant à ses répercussions physiologiques et sanitaires à moyen et long terme.

### **Incertitudes métaboliques et manque de recul scientifique**

Le principal risque réside dans l'absence de données longitudinales sur l'impact de ces charges glycémiques extrêmes et répétées. Si l'oxydation exogène est efficace pendant l'effort, l'exposition chronique à une hyperglycémie induite pourrait altérer la sensibilité à l'insuline sur le long terme. Comme le suggère la revue de Wilson, le passage d'une « flexibilité métabolique » (capacité à utiliser les graisses et les sucres) à une dépendance quasi exclusive aux glucides pourrait fragiliser l'équilibre métabolique des athlètes, avec des conséquences encore méconnues sur la santé pancréatique et le risque de troubles métaboliques post-carrière.[18]

### **Détérioration de la santé bucco-dentaire**

L'ingestion continue de produits d'effort hautement concentrés en sucres simples, souvent associée à une baisse du pH buccal et à une réduction de la salivation liée à la déshydratation, crée un environnement propice à l'érosion de l'émail et au développement de caries. Pour atteindre  $\geq 100$  g/h, les athlètes multiplient les contacts fréquents avec des substrats fermentescibles, faisant de la santé bucco-dentaire un point sensible pouvant paradoxalement nuire à la performance globale (douleurs, infections, inflammation systémique).

### **Problématique des produits ultra-transformés**

Dans le sport de haut niveau, la consommation très régulière de glucides sous forme de produits de nutrition sportive industriels conduit inévitablement à consommer des produits ultra-transformés (par exemple gels énergétiques, boissons sucrées et barres industrielles). La majeure partie de ces produits s'inscrit dans une catégorie d'aliments définie par le système NOVA comme hautement transformée. Plusieurs méta-analyses et revues systématiques basées sur des données épidémiologiques prospectives montrent que l'apport élevé en aliments ultra-transformés est associé à un risque accru de plusieurs maladies chroniques documentées dans la littérature scientifique : un risque plus élevé de mortalité toutes causes confondues et une augmentation du risque de diabète de type 2. Une revue par méta-analyses a également établi des associations entre une forte consommation d'aliments ultra-transformés et des risques accrus de syndrome métabolique et de maladies cardiovasculaires. Bien que ces études soient observationnelles et ne démontrent pas une causalité directe, elles suggèrent que l'usage fréquent de glucides ultra-transformés pour répondre aux besoins énergétiques durant l'effort pourrait contribuer à une exposition globale accrue aux facteurs de risque métabolique et cardiométabolique à long terme, comparativement à des apports privilégiant des sources de glucides moins transformées.[20], [21]

## V. Gut training et individualisation des stratégies glucidiques

### 1. Concept et mécanisme du Gut training

L'évolution des stratégies nutritionnelles vers des apports massifs a mis en évidence que le système gastro-intestinal n'est pas un simple conduit passif, mais un organe hautement adaptable. Le «Gut Training» (= entraînement de l'intestin) consiste à induire des adaptations physiologiques spécifiques pour repousser les limites de la tolérance et de l'absorption digestive.

Cox et Al au travers de leur étude de 28 jours chez 16 cyclistes ou triathlètes entraînés ont montré que l'oxygénation des glucides exogènes augmentait significativement chez les sportifs ayant suivi un gut training. [22]

De leur côté, Costa et Al grâce à leur étude de 2 semaines sur 25 coureurs d'endurance ont montré que les sportifs ayant suivi un gut training avaient considérablement augmenté leurs performances (+4-5%) mais aussi réduit les troubles gastro-intestinaux à l'effort. [23]

L'entraînement digestif repose sur des piliers physiologiques fondamentaux. Tout d'abord, l'augmentation du nombre de transporteurs (SGLT1 et GLUT5) proportionnellement à la consommation de glucides. Puis l'accélération de la vidange gastrique : Une exposition répétée à des volumes de fluides et des charges glucidiques élevés réduit la sensation de plénitude gastrique. L'estomac apprend à se vider plus rapidement vers l'intestin grêle, même sous stress métabolique. De plus, la réduction de la perception de l'inconfort : Le système nerveux s'habitue à la présence de nutriments pendant l'effort, augmentant le seuil de tolérance aux symptômes gastro-intestinaux (ballonnements, nausées).

#### a. Intérêt de la pratique et performance

L'intérêt du Gut Training est d'abord de rendre possible les apports élevés nécessaires aux efforts de longue durée. L'autre objectif majeur sera aussi de limiter les troubles intestinaux. L'étude de Smith et al. a montré une relation dose-réponse curviligne où la performance culminait autour de 78 g/h, mais les recherches plus récentes de Podlogar et al. prouvent qu'avec un entraînement adéquat et un ratio optimal, des doses de 120 g/h sont métaboliquement utilisables sans dégradation du confort digestif.[17], [19]. Finalement on distingue deux types de gut training ; le premier concernera le sportif débutant ou alors pas encore habitué à consommer des glucides à l'effort et consistera à augmenter petit à petit les doses de glucides à l'effort pour arriver aux doses adéquates. Le second concerne le sportif déjà habitué et dans ce cas il sera question d'apporter volontairement d'importantes quantités de glucides sur des séances qui se rapprochent de la compétition par la durée et l'intensité. Cet entraînement permettra de repousser les limites d'absorption et d'oxydation des glucides et de limiter les troubles gastro intestinaux le jour J (qui peut le plus, peut le moins).

#### b. Mise en pratique

Pour être efficace, le Gut Training doit être progressif et périodisé :

La spécificité : Selon Jeukendrup, il doit être pratiqué à l'intensité de la compétition pour simuler la réduction du débit sanguin splanchnique.[24]

**Le ratio optimal** : L'étude d'O'Brien et al. démontre qu'un ratio de 1 :0.8 (maltodextrine:fructose) est idéal pour maximiser l'oxydation exogène et minimiser l'inconfort pendant ces phases d'entraînement.[25]

**La progression :** Commencer par des doses maîtrisées et augmenter par paliers de 10 à 15g toutes les deux semaines lors des séances spécifiques, jusqu'à atteindre l'objectif cible de la compétition (ex: 100 ou 120 g/h).

## 2. Intérêts de l'individualisation des apports glucidiques

L'approche traditionnelle de la nutrition sportive repose sur des recommandations générales basées principalement sur la durée de l'effort (ex: 60 à 90 g/h pour des efforts de plus de 2-3h). Cependant, des recherches récentes soulignent la nécessité de passer d'un modèle "taille unique" à une stratégie personnalisée grâce à la mesure de l'oxydation des glucides exogènes.

### a. L'influence de la morphologie sur la capacité d'oxydation

L'étude de Ijaz et al démontre que la capacité à oxyder le glucose ingéré n'est pas uniforme chez tous les athlètes. En effet, il existe une corrélation positive importante entre la taille de l'athlète (masse corporelle, taille et surface corporelle) et son taux maximal d'oxydation du glucose exogène. On constate que les athlètes ayant une masse corporelle plus importante présentent, en moyenne, des taux d'oxydation plus élevés que les athlètes plus légers (environ 45 g/h contre 33 g/h dans l'étude citée). Cela suggère que les recommandations devraient être ajustées selon la morphologie, car un athlète plus grand possède potentiellement une surface intestinale et une masse métabolique (foie, muscles) plus importantes pour traiter ces glucides.[26]

### b. Dimorphisme sexuel dans l'oxydation des substrats énergétiques

Bien que les recommandations nutritionnelles aient longtemps été basées sur des études menées quasi exclusivement sur des cohortes masculines, la recherche scientifique met en évidence des différences physiologiques notables entre les hommes et les femmes dans l'utilisation des glucides à l'effort.

#### **Une dépendance moindre aux glucides chez les femmes**

De nombreuses études (dont celles de *Tarnopolsky et al.*) ont démontré qu'à une intensité d'exercice relative identique (par exemple 65-75% du VO<sub>2</sub>max), les femmes présentent une oxydation des lipides plus élevée et une oxydation des glucides totaux plus faible que les hommes.[27]

En raison d'un environnement hormonal différent (notamment l'influence de l'œstrogène), les femmes ont tendance à épargner davantage leur glycogène musculaire et hépatique lors d'efforts d'endurance prolongés. Cette utilisation plus efficace des graisses suggère que, proportionnellement à leur dépense énergétique, les besoins en glucides exogènes pourraient être légèrement inférieurs chez les femmes pour maintenir une performance identique sur des durées modérées.

#### **Capacité d'oxydation des glucides exogènes**

Concernant spécifiquement les glucides ingérés pendant l'effort (glucides exogènes), les résultats sont plus nuancés. L'étude de Wallis et al suggère que si l'on rapporte l'oxydation à la masse grasse ou à la masse musculaire, les capacités métaboliques d'oxydation du glucose ingéré sont assez proches entre les deux sexes.[28]

Comme vu précédemment avec l'étude sur la taille corporelle, les femmes, ayant généralement une surface corporelle et une masse métabolique (foie/intestin) plus petites que les hommes, atteignent plus

rapidement le "plafond" d'oxydation des glucides. Une dose de 90g/h, standard pour un homme de 80kg, pourrait représenter une charge digestive excessive pour une femme de 55kg, augmentant ainsi le risque de troubles gastro-intestinaux sans bénéfice métabolique supplémentaire.

### **Influence du cycle menstruel**

L'oxydation des glucides fluctue également selon les phases du cycle menstruel. En phase lutéale (progestérone élevée), l'oxydation des glucides est souvent plus faible au profit des lipides par rapport à la phase folliculaire. Cela renforce l'idée qu'un test d'oxydation individuel est encore plus pertinent pour une athlète féminine afin de calibrer ses apports selon son propre profil et sa cyclicité.[29]

#### **c. La génétique : le déterminant métabolique invisible**

L'efficacité de l'oxydation des glucides exogènes est étroitement régulée par le patrimoine génétique de l'athlète, agissant à deux niveaux critiques : l'absorption et l'utilisation cellulaire. Au niveau intestinal, l'expression du gène SLC5A1, qui code pour le transporteur SGLT1, dicte le débit maximal de glucose pouvant franchir la barrière digestive. Une variation dans la densité ou l'activité de ces transporteurs explique pourquoi certains individus saturent prématurément, limitant leur capacité d'oxydation indépendamment de leur entraînement ou de leur gabarit.

Au niveau métabolique, les travaux de Hall et al démontrent que le polymorphisme du gène PPARGC1A (codant pour la protéine PGC-1 $\alpha$ ) influence directement la biogenèse mitochondriale. Les athlètes porteurs de variants spécifiques (comme l'allèle Gly) possèdent une capacité supérieure à oxyder les substrats au sein de la cellule musculaire. [30] L'épigénétique pourrait également jouer un rôle majeur.

Cette "programmation" génétique crée une variabilité interindividuelle majeure, confirmant l'intérêt des tests d'oxydation pour identifier le plafond physiologique réel de chaque sportif et adapter les apports en conséquence.

### **3. Les tests d'oxydation des glucides : plus qu'une simple tendance**

Pour passer d'une recommandation théorique à une nutrition de précision, l'athlète doit réaliser un test d'oxydation des glucides exogènes. Ce protocole scientifique permet de quantifier exactement quelle proportion des sucres ingérés est réellement transformée en énergie.

#### **a. Déroulement et charge glucidique**

Le test standard se déroule généralement sur une séance de 1h30 à une intensité constante (souvent au premier seuil ventilatoire). L'objectif est de saturer les capacités d'absorption pour identifier le plafond d'oxydation :

- Fréquence d'ingestion : L'athlète consomme 30g de glucides toutes les 15 minutes.
- Charge totale : Sur la durée de l'effort, cela représente un apport de 160g au total, soit un débit élevé de 120 g/h. Ce débit important permet de tester les limites des transporteurs intestinaux (SGLT1 et GLUT5).

### b. La technique du marquage au Carbone 13 (C<sup>13</sup>)

La mesure repose sur l'utilisation de traceurs isotopiques. La boisson de l'effort est enrichie en Carbone 13, un isotope naturellement présent mais rare.

Le principe métabolique est le suivant :

- Lors de l'effort, le glucose marqué est métabolisé par les muscles.
- L'oxydation des glucides produit du CO<sub>2</sub>, qui est le déchet métabolique final rejeté par les poumons.
- En analysant les gaz expirés via un spectromètre de masse, on compare la concentration de C<sup>13</sup> la fin de la séance par rapport à un prélèvement de référence réalisé au repos ou au tout début de l'effort.
- La différence permet de calculer précisément la quantité de glucides provenant de la boisson qui a été brûlée, par opposition aux glucides provenant des réserves internes (glycogène).

### c. Variabilité des conditions et périodisation

L'intérêt de ces tests réside également dans leur répétition sous différentes contraintes environnementales et temporelles :

- **Conditions neutres vs spécifiques** : Un test est d'abord réalisé en conditions contrôlées (niveau de la mer, température modérée). Il est ensuite crucial de le réitérer en conditions spécifiques (chaleur, humidité, altitude), car ces facteurs peuvent modifier drastiquement la capacité d'oxydation.
- **Périodisation annuelle** : La capacité d'oxydation n'est pas figée. Elle peut être améliorée par l'entraînement digestif (Gut training). Réaliser des tests à différents moments de la saison permet d'ajuster la stratégie nutritionnelle en fonction de l'état de forme et de l'adaptation métabolique de l'athlète.

## Conclusion

L'évolution de la nutrition dans les sports d'endurance, et plus particulièrement dans le cyclisme professionnel, marque un changement radical où l'apport énergétique est devenu un levier de performance aussi crucial que l'entraînement physique lui-même. Ce dossier a permis de mettre en lumière la complexité des mécanismes physiologiques qui régissent l'utilisation des glucides à l'effort et les stratégies déployées pour repousser les limites humaines.

Dans un premier temps, nous avons vu que la performance repose sur la capacité de l'organisme à oxyder des glucides exogènes pour préserver ses stocks limités de glycogène. La compréhension fine des transporteurs intestinaux, notamment le SGLT1 pour le glucose et le GLUT5 pour le fructose, a ouvert la voie à l'utilisation de ratios optimisés (comme le 1:0,8). Cette synergie permet aujourd'hui d'atteindre des taux d'oxydation bien supérieurs aux recommandations historiques, passant du plafond de 60 g/h à des apports massifs de 120 g/h voir plus chez l'élite mondial.

Toutefois, cette quête de l'apport maximal ne se fait pas sans contraintes. L'hypoperfusion splanchnique induite par l'effort fragilise la barrière intestinale, exposant l'athlète à des troubles gastro-intestinaux qui peuvent compromettre la performance. Si des stratégies comme le «Gut Training» permettent une adaptation fonctionnelle remarquable en augmentant la densité des transporteurs et la vitesse de vidange gastrique, elles soulignent également que le système digestif doit désormais être entraîné avec la même rigueur que le système cardiovasculaire.

L'analyse a également révélé que l'approche « taille unique » est désormais obsolète. L'individualisation, fondée sur la morphologie, le sexe, la génétique et validée par des tests d'oxydation au carbone 13, s'impose comme la nouvelle norme de la nutrition de précision. Ces tests permettent de définir le « plafond métabolique » réel de chaque athlète, évitant ainsi les surcharges inutiles et délétères.

Enfin, si les bénéfices à court terme sur la performance et la récupération lors de courses par étapes sont indéniables, ce dossier soulève des interrogations cruciales sur la santé à long terme. L'exposition chronique à des charges glycémiques extrêmes, la consommation massive de produits ultra-transformés et les risques pour la santé métabolique ou bucco-dentaire constituent des zones d'ombre que la science actuelle doit encore explorer.

En conclusion, l'optimisation de la performance en endurance se joue désormais sur un équilibre fragile : maximiser l'apport énergétique sans franchir le seuil de rupture physiologique, tout en préservant l'intégrité de l'athlète pour sa carrière et sa vie future.

## Abstract

**Title:** Redefining Endurance Performance: Strategies, Physiological Limits, and Health Implications of Massive Carbohydrate Intake.

**Abstract:** In the era of high-performance endurance sports, particularly professional cycling, nutritional management has transitioned from simple fueling to a precise physiological lever. This study explores how new carbohydrate strategies are redefining performance limits by pushing intake thresholds from the traditional 60-90 g/h to massive doses of 120 g/h.

The first part of the analysis details the mechanisms of intestinal absorption, emphasizing the crucial role of dual-source carbohydrates (glucose and fructose) in bypassing the saturation of SGLT1 and GLUT5 transporters. Through optimized ratios such as 1:0.8, athletes can significantly increase exogenous carbohydrate oxidation and preserve endogenous glycogen stores. However, such high intake levels face physiological challenges, including exercise-induced gastrointestinal syndrome caused by splanchnic hypoperfusion.

The research highlights "Gut Training" and personalized nutrition as essential tools for modern athletes. By using Carbon-13 oxidation tests, practitioners can now tailor intake based on individual morphology, sex, and genetic profiles, moving away from "one-size-fits-all" recommendations. Finally, while these strategies optimize immediate performance and recovery in multi-stage events, the study raises concerns regarding long-term health. The impact of chronic extreme glycemic loads and the consumption of ultra-processed sports products on metabolic health remains a critical area for future longitudinal research.

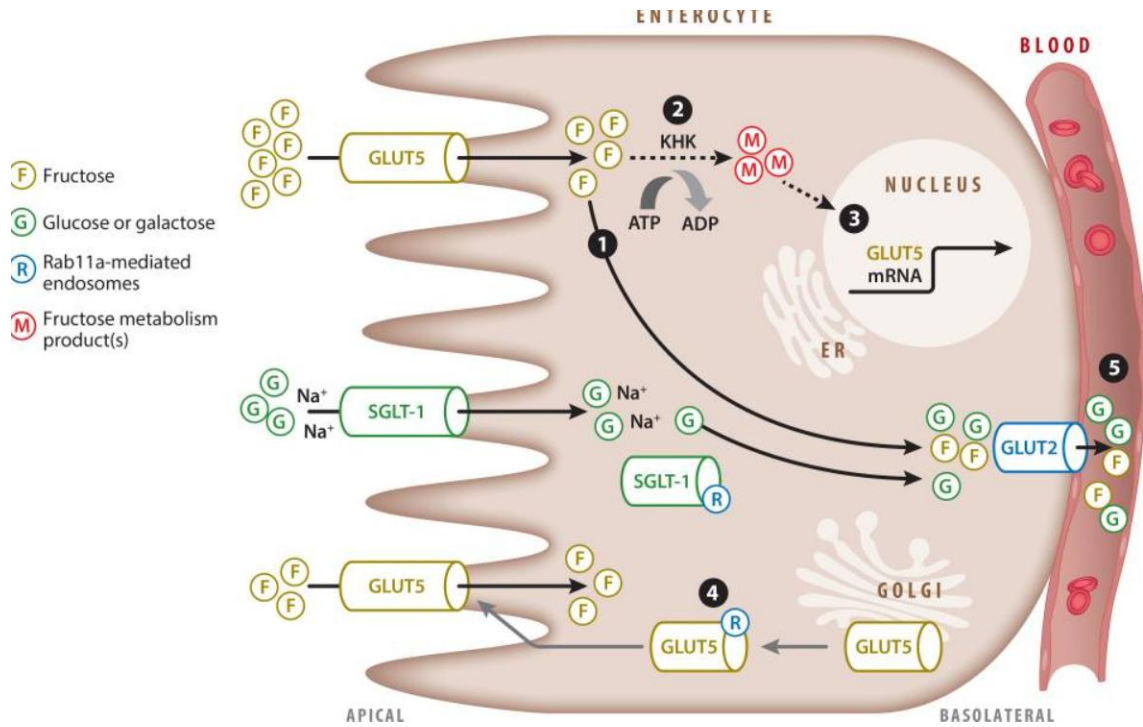
**Keywords:** Endurance performance, Carbohydrates, Gut Training, Glucose-Fructose ratio, Intestinal absorption, Sports Nutrition.

## Bibliographie

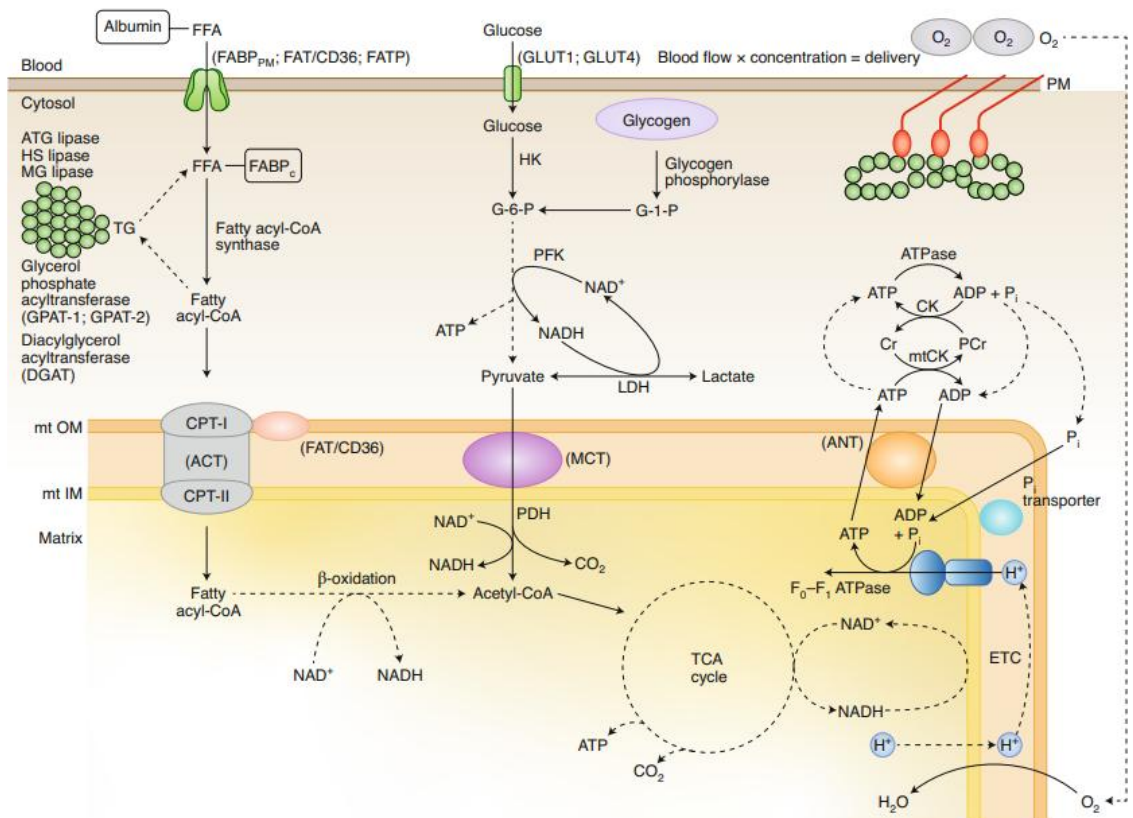
- [1] L. V. Gromova, S. O. Fetissov, et A. A. Gruzdkov, « Mechanisms of Glucose Absorption in the Small Intestine in Health and Metabolic Diseases and Their Role in Appetite Regulation », *Nutrients*, vol. 13, n° 7, p. 2474, juill. 2021, doi: 10.3390/nu13072474.
- [2] P. V. Röder, K. E. Geillinger, T. S. Zietek, B. Thorens, H. Koepsell, et H. Daniel, « The Role of SGLT1 and GLUT2 in Intestinal Glucose Transport and Sensing », *PLoS One*, vol. 9, n° 2, p. e89977, févr. 2014, doi: 10.1371/journal.pone.0089977.
- [3] R. P. Ferraris, J. Choe, et C. R. Patel, « Intestinal Absorption of Fructose », *Annu Rev Nutr*, vol. 38, p. 41-67, août 2018, doi: 10.1146/annurev-nutr-082117-051707.
- [4] L. J. Goodyear *et al.*, « Glucose ingestion causes GLUT4 translocation in human skeletal muscle », *Diabetes*, vol. 45, n° 8, p. 1051-1056, août 1996, doi: 10.2337/diab.45.8.1051.
- [5] M. Hargreaves et L. L. Spriet, « Skeletal muscle energy metabolism during exercise », *Nat Metab*, vol. 2, n° 9, p. 817-828, sept. 2020, doi: 10.1038/s42255-020-0251-4.
- [6] A. E. Jeukendrup et J. McLaughlin, « Carbohydrate ingestion during exercise: effects on performance, training adaptations and trainability of the gut », *Nestle Nutr Inst Workshop Ser*, vol. 69, p. 1-12; discussion 13-17, 2011, doi: 10.1159/000329268.
- [7] M. A. Hearn, K. M. Hammond, J. M. Fell, et J. P. Morton, « Regulation of Muscle Glycogen Metabolism during Exercise: Implications for Endurance Performance and Training Adaptations », *Nutrients*, vol. 10, n° 3, p. 298, mars 2018, doi: 10.3390/nu10030298.
- [8] K. van Wijck, K. Lenaerts, L. J. C. van Loon, W. H. M. Peters, W. A. Buurman, et C. H. C. Dejong, « Exercise-Induced Splanchnic Hypoperfusion Results in Gut Dysfunction in Healthy Men », *PLoS One*, vol. 6, n° 7, p. e22366, juill. 2011, doi: 10.1371/journal.pone.0022366.
- [9] R. Aitkenhead, M. Waldron, G. E. Conway, K. Horner, et S. M. Heffernan, « The Influence of Dietary Supplements on Exercise-Induced Gut Damage and Gastrointestinal Symptoms: A Systematic Review and Meta-Analysis », *Nutrients*, vol. 17, n° 3, p. 443, janv. 2025, doi: 10.3390/nu17030443.
- [10] R. J. S. Costa, R. M. J. Snipe, C. M. Kitic, et P. R. Gibson, « Systematic review: exercise-induced gastrointestinal syndrome—implications for health and intestinal disease », *Alimentary Pharmacology & Therapeutics*, vol. 46, n° 3, p. 246-265, 2017, doi: 10.1111/apt.14157.
- [11] S. Chantler, A. Griffiths, J. Matu, G. Davison, A. Holliday, et B. Jones, « A systematic review: Role of dietary supplements on markers of exercise-associated gut damage and permeability », *PLoS One*, vol. 17, n° 4, p. e0266379, avr. 2022, doi: 10.1371/journal.pone.0266379.
- [12] R. J. S. Costa, R. M. J. Snipe, C. M. Kitic, et P. R. Gibson, « Systematic review: exercise-induced gastrointestinal syndrome—implications for health and intestinal disease », *Aliment Pharmacol Ther*, vol. 46, n° 3, p. 246-265, août 2017, doi: 10.1111/apt.14157.
- [13] A. Jeukendrup, « A Step Towards Personalized Sports Nutrition: Carbohydrate Intake During Exercise », *Sports Med*, vol. 44, n° Suppl 1, p. 25-33, 2014, doi: 10.1007/s40279-014-0148-z.
- [14] G. A. Wallis, D. S. Rowlands, C. Shaw, R. L. P. G. Jentjens, et A. E. Jeukendrup, « Oxidation of Combined Ingestion of Maltodextrins and Fructose during Exercise », *Medicine & Science in Sports & Exercise*, vol. 37, n° 3, p. 426, mars 2005, doi: 10.1249/01.MSS.0000155399.23358.82.
- [15] Z. G. Dezfuli *et al.*, « Comparing the Effects of Glucose-Fructose versus Glucose on the Oxidation Rate: A Systematic Review and Meta-Analysis », *ijph*, avr. 2025, doi: 10.18502/ijph.v54i4.18411.
- [16] W. J. O'Brien et D. S. Rowlands, « Fructose-maltodextrin ratio in a carbohydrate-electrolyte solution differentially affects exogenous carbohydrate oxidation rate, gut comfort, and performance », *American Journal of Physiology-Gastrointestinal and Liver Physiology*, vol. 300, n° 1, p. G181-G189, janv. 2011, doi: 10.1152/ajpgi.00419.2010.
- [17] T. Podlogar, Š. Bokal, S. Cirnski, et G. A. Wallis, « Increased exogenous but unaltered endogenous carbohydrate oxidation with combined fructose-maltodextrin ingested at 120 g h<sup>-1</sup> versus 90 g h<sup>-1</sup> at different ratios », *Eur J Appl Physiol*, vol. 122, n° 11, p. 2393-2401, nov. 2022, doi: 10.1007/s00421-022-05019-w.
- [18] P. B. Wilson, « A Narrative Review of the High-Carbohydrate Fueling Revolution (≥ 100 g/h) in the Professional Peloton », *Sports Med*, déc. 2025, doi: 10.1007/s40279-025-02372-6.
- [19] J. W. Smith *et al.*, « Curvilinear Dose–Response Relationship of Carbohydrate (0–120 g·h<sup>-1</sup>) and Performance », *Medicine & Science in Sports & Exercise*, vol. 45, n° 2, p. 336-341, févr. 2013, doi: 10.1249/MSS.0b013e31827205d1.

- [20] S. Liang, Y. Zhou, Q. Zhang, S. Yu, et S. Wu, « Ultra-processed foods and risk of all-cause mortality: an updated systematic review and dose-response meta-analysis of prospective cohort studies », *Syst Rev*, vol. 14, n° 1, p. 53, mars 2025, doi: 10.1186/s13643-025-02800-8.
- [21] L. Shu, X. Zhang, J. Zhou, Q. Zhu, et C. Si, « Ultra-processed food consumption and increased risk of metabolic syndrome: a systematic review and meta-analysis of observational studies », *Front. Nutr.*, vol. 10, p. 1211797, juin 2023, doi: 10.3389/fnut.2023.1211797.
- [22] G. R. Cox *et al.*, « Daily training with high carbohydrate availability increases exogenous carbohydrate oxidation during endurance cycling », *Journal of Applied Physiology*, vol. 109, n° 1, p. 126-134, juill. 2010, doi: 10.1152/jappphysiol.00950.2009.
- [23] R. J. S. Costa *et al.*, « Gut-training: the impact of two weeks repetitive gut-challenge during exercise on gastrointestinal status, glucose availability, fuel kinetics, and running performance », *Appl. Physiol. Nutr. Metab.*, vol. 42, n° 5, p. 547-557, mai 2017, doi: 10.1139/apnm-2016-0453.
- [24] A. E. Jeukendrup, « Training the Gut for Athletes », *Sports Med*, vol. 47, n° S1, p. 101-110, mars 2017, doi: 10.1007/s40279-017-0690-6.
- [25] W. J. O'brien, S. R. Stannard, J. A. Clarke, et D. S. Rowlands, « Fructose–Maltodextrin Ratio Governs Exogenous and Other CHO Oxidation and Performance », *Medicine & Science in Sports & Exercise*, vol. 45, n° 9, p. 1814, sept. 2013, doi: 10.1249/MSS.0b013e31828e12d4.
- [26] A. Ijaz *et al.*, « Exogenous Glucose Oxidation During Exercise Is Positively Related to Body Size », *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, vol. 35, n° 1, p. 12-23, sept. 2024, doi: 10.1123/ijsnem.2024-0097.
- [27] M. A. Tarnopolsky et B. C. Ruby, « Sex differences in carbohydrate metabolism », *Curr Opin Clin Nutr Metab Care*, vol. 4, n° 6, p. 521-526, nov. 2001, doi: 10.1097/00075197-200111000-00010.
- [28] G. A. Wallis, R. Dawson, J. Achten, J. Webber, et A. E. Jeukendrup, « Metabolic response to carbohydrate ingestion during exercise in males and females », *Am J Physiol Endocrinol Metab*, vol. 290, n° 4, p. E708-715, avr. 2006, doi: 10.1152/ajpendo.00357.2005.
- [29] K. L. McNulty *et al.*, « The Effects of Menstrual Cycle Phase on Exercise Performance in Eumenorrheic Women: A Systematic Review and Meta-Analysis », *Sports Med*, vol. 50, n° 10, p. 1813-1827, oct. 2020, doi: 10.1007/s40279-020-01319-3.
- [30] E. C. R. Hall *et al.*, « The PPARGC1A Gly482Ser polymorphism is associated with elite long-distance running performance », *J Sports Sci*, vol. 41, n° 1, p. 56-62, janv. 2023, doi: 10.1080/02640414.2023.2195737.

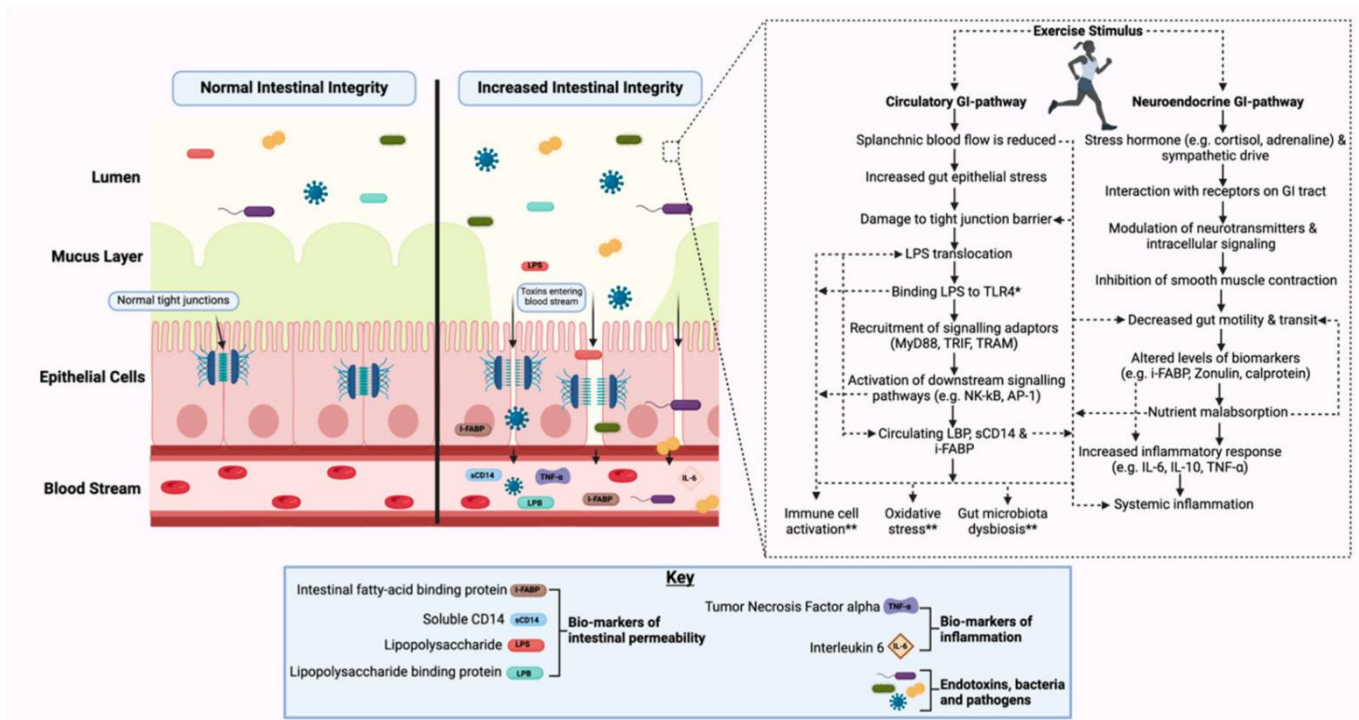
## Annexes



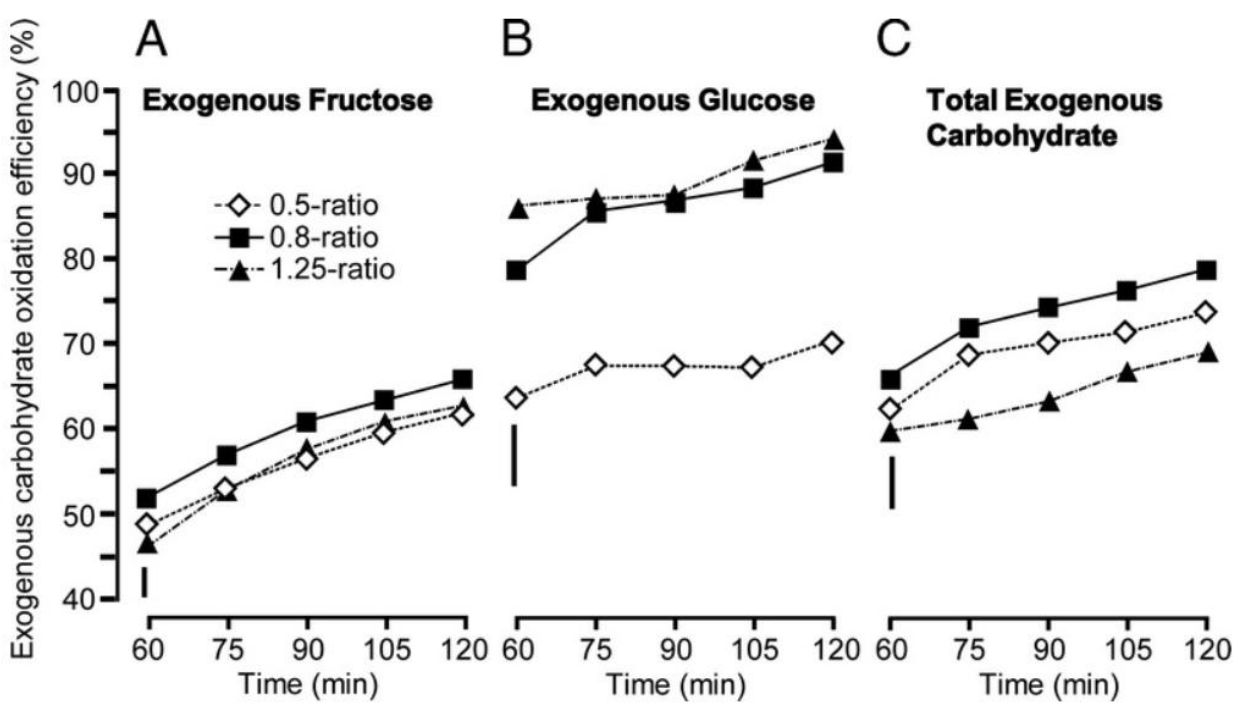
**Annexe 1** (Ferraris et Al, 2019) : Mécanismes de l'absorption du glucose, galactose et fructose dans un entérocyte puis relargage dans la circulation sanguine.



**Annexe 2** (Hargreaves et Al, 2020) : Récapitulatif des voies métaboliques conduisant à la production d'ATP dans les muscles squelettiques.



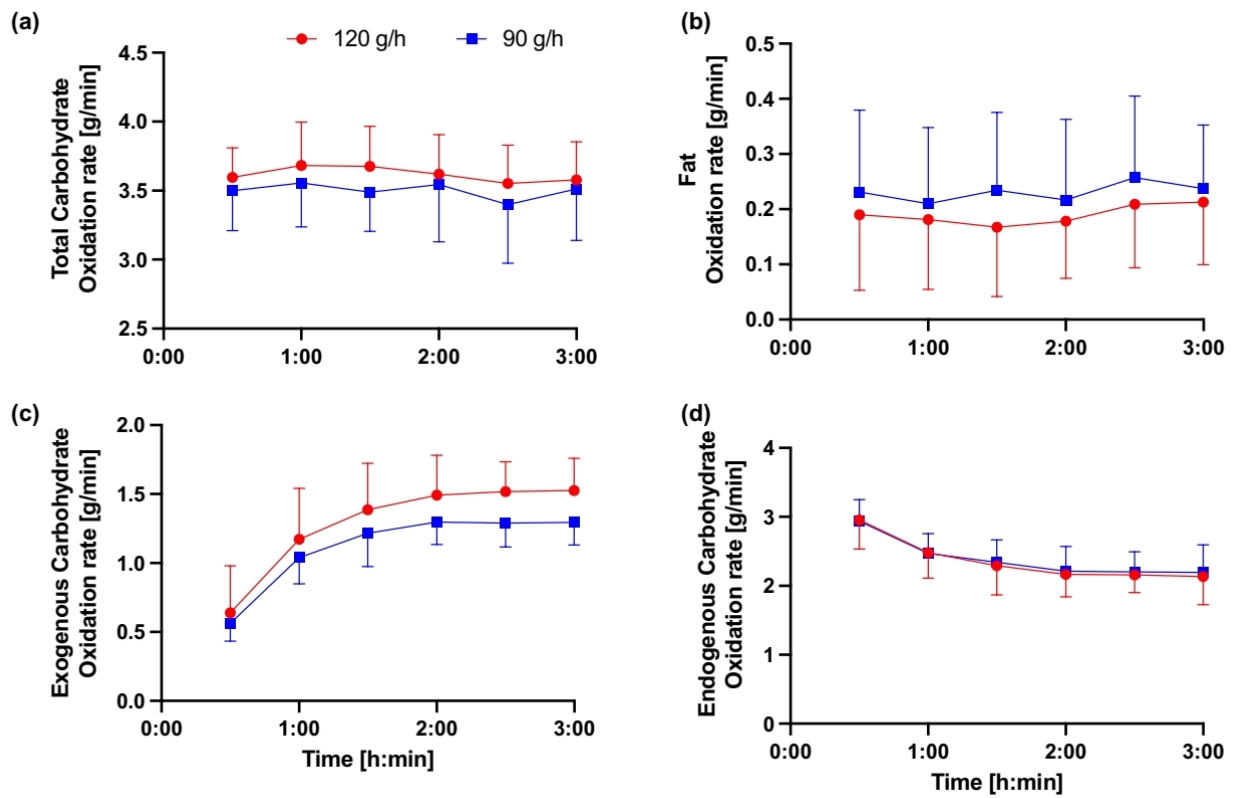
Annexe 3 (Aitkenhead et Al, 2025) : Schéma des impacts de l'exercice sur l'intégrité de la membrane intestinale.



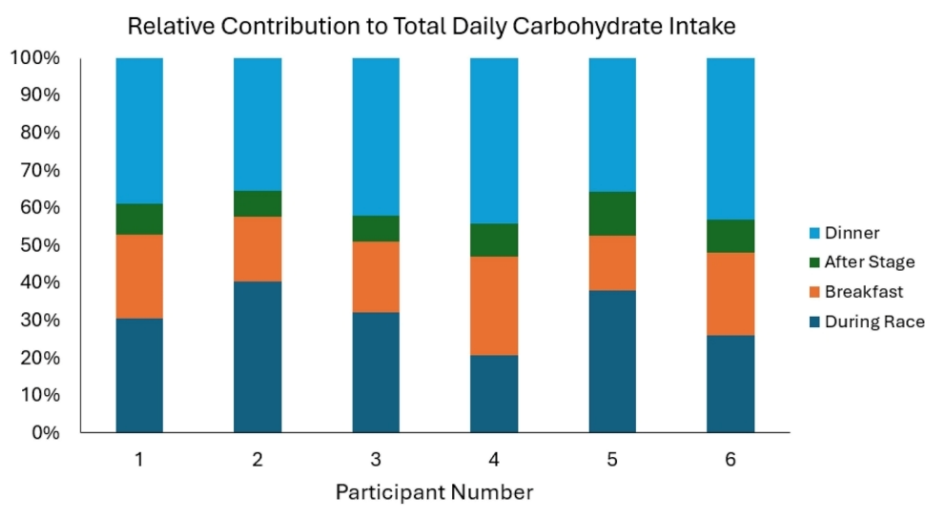
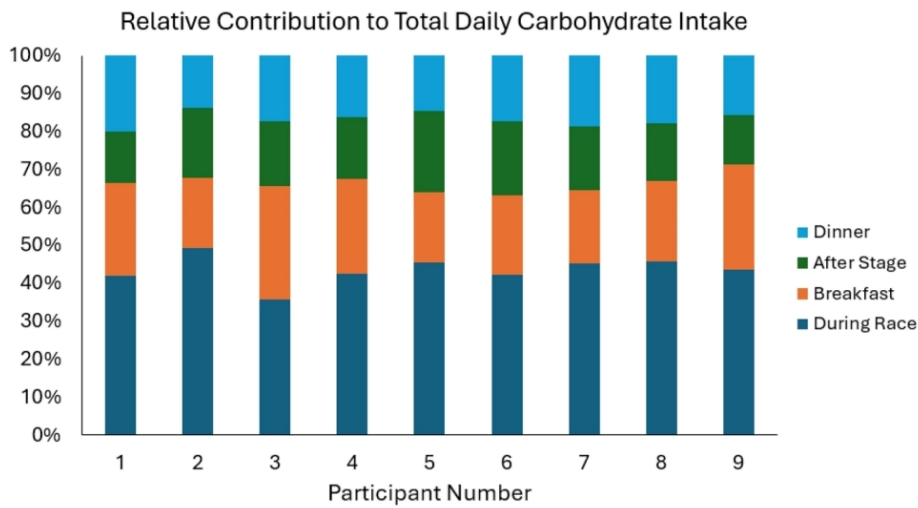
Annexe 4 (O'Brien et Al, 2013) : Comparaison de l'oxydation des glucides en fonction des différents ratios Glu-Fru

Event	CHO required for optimal performance and minimizing negative energy balance	Recommended intake	CHO type	Glucose	Glucose + fructose
<30 min	no CHO required				
30–60 min	very small amounts	mouth rinse	most forms of CHO	●	●
1–2 h	small amounts	up to 30 g/h	most forms of CHO	●	●
2–3 h	moderate amounts	up to 60 g/h	CHO that are rapidly oxidized (glucose, maltodextrin)	○	●
>2.5 h	large amounts	up to 90 g/h	only multiple transportable CHO		●

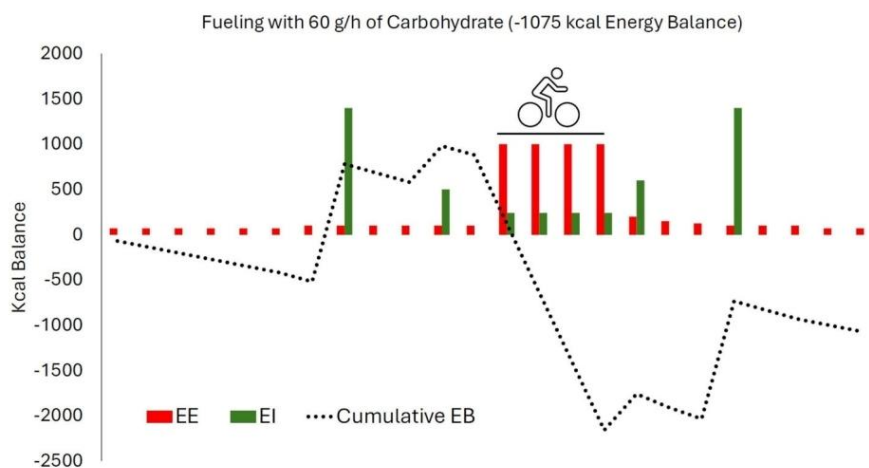
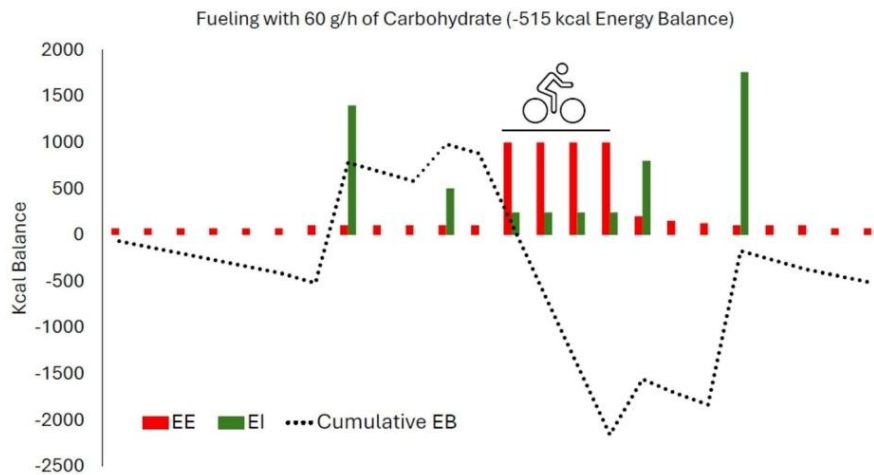
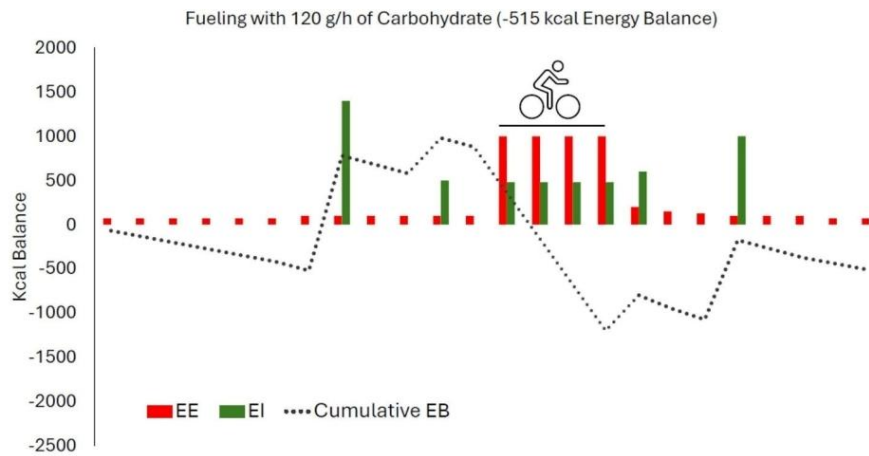
Annexe 5 (Jeukendrup et Al, 2011) : Tableau récapitulatif des stratégies glucidiques en fonction de la durée de l'effort.



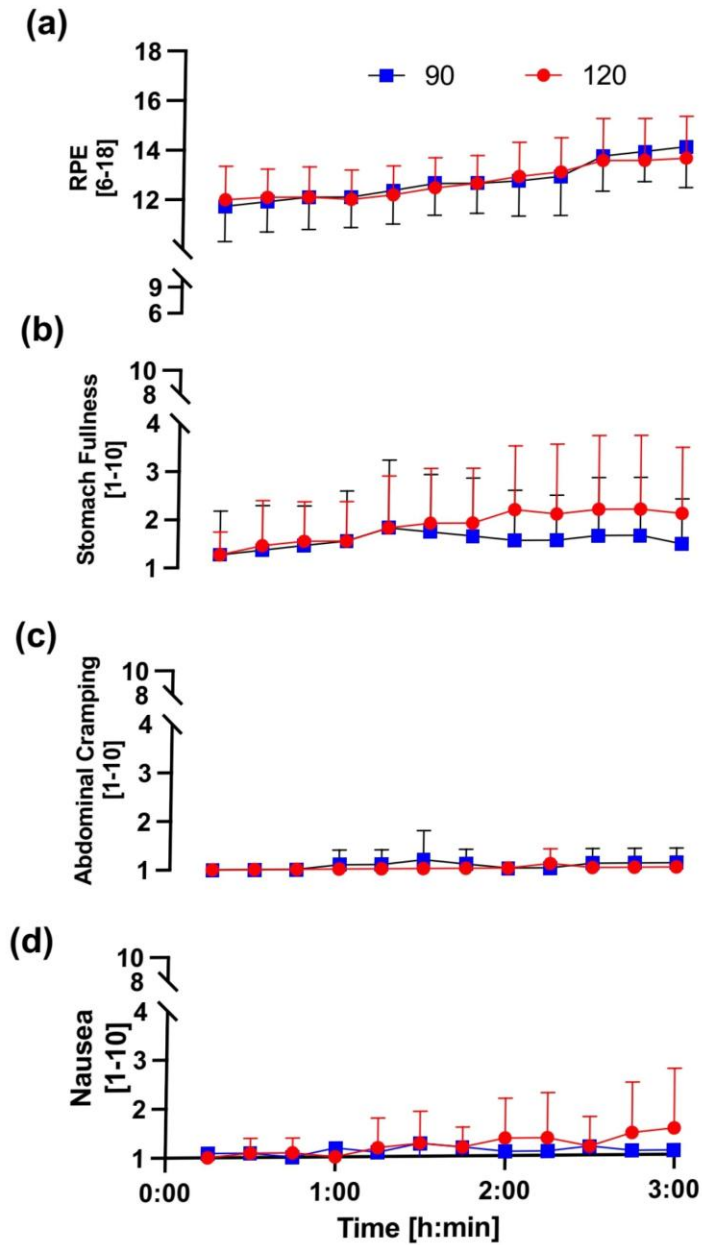
Annexe 6 (Polgodar *et Al*, 2022) : Comparaison de l'oxydation totale des glucides (a), oxydation des lipides (b), oxydation des glucides exogènes (c) et des glucides endogènes (d) avec 90g glucides/h VS 120g glucides/h



Annexe 7a (Wilson, 2025) : Contribution relative des différents repas/apports à l'apport glucidique journalier total



**Annexe 7b** (Wilson, 2025) : Balance énergétique au cours de la journée (24 h) selon trois scénarios. Scénario 1 (panneau supérieur) : un cycliste consommant 120 g/h de glucides pendant une course de 4 h. Scénario 2 (panneau central) : un cycliste consommant 60 g/h de glucides pendant une course de 4 h, tout en augmentant son apport glucidique après la course pour compenser le plus faible apport durant l'épreuve. Scénario 3 (panneau inférieur) : un cycliste consommant 60 g/h de glucides pendant une course de 4 h mais qui ne parvient pas à augmenter de manière adéquate ses apports après la course. EB : balance énergétique, EE : dépense énergétique, EI : apport énergétique.



Annexe 8 (Polgodar, 2022) : Score de perception de l'effort (RPE) : (a) sensation de plénitude gastrique, (b) crampes abdominales, (c) nausées, et (d) au cours des essais expérimentaux évalués toutes les 15 min. On ne constate pas de nette différence entre un apport de 90g/h et un apport de 120g/h