

Le microbiote intestinal : généralités et lien avec le sport

Leur présence dans l'intestin est connue depuis longtemps. Mais leur importance est longtemps restée sous-estimée. Les connaissances acquises ces dernières années démontrent pourtant le rôle décisif du microbiote intestinal pour le maintien de la santé de l'homme. Le microbiote est donc automatiquement d'une grande importance dans le sport.

Il y a près de 60 ans, les participants à un symposium à l'Université de Chicago ont probablement entendu la première conférence spécialisée sur l'importance du microbiote dans l'intestin humain. La perception habituelle selon laquelle les microbiotes sont « des envahisseurs aléatoires et inefficaces de l'intestin qui n'ont aucune influence sur le corps » est fautive. Au contraire, sans microbiote, l'intestin ne pourrait pas se développer ou fonctionner correctement. Et surtout, si l'intestin perdait son microbiote, il ne pourrait pas non plus rester en bonne santé. La conférence s'est terminée par une projection dans l'avenir : une perturbation du microbiote perturberait probablement les fonctions de l'ensemble du métabolisme. Aujourd'hui, personne dans le monde de la recherche ne doute de la justesse fondamentale de cette affirmation. Cependant, de très nombreuses questions relatives au microbiote restent encore sans réponse.

Qu'est-ce qu'un microbiote ?

Un microbiote est un "petit" être vivant, composé de divers micro-organismes. Il s'agit de bactéries, d'archées (les "bactéries primitives"), de virus et de champignons³. Les microbiotes ne doivent pas être considérés comme des entités séparées, car ils interagissent aussi bien entre eux qu'avec l'homme. Le mode de vie influence le microbiote tout comme le microbiote influence le métabolisme de l'homme et donc sa santé.

D'autres organismes, qui ne font pas partie du microbiote, peuvent également apparaître dans l'intestin. Il s'agit notamment des vers parasites. Leur perception est généralement négative. Mais les réactions immunitaires qu'ils déclenchent dans l'intestin peuvent tout à fait avoir une influence positive sur le système immunitaire⁴.

Le microbiote et l'homme en tant qu'unité

L'ensemble des informations génétiques du microbiote, le microbiome, contiendrait environ neuf millions de gènes, soit 450 fois plus d'informations que le génome humain avec ses quelque 20 000 gènes^{5,6}. Ensemble, le génome humain et le microbiome sont également appelés holobiontes ou superorganismes^{2,3}.

Le poids du microbiote intestinal a longtemps été estimé à environ 1,5 kilogramme, ce qui correspondrait à peu près au poids du cerveau humain^{7,8}. Mais selon des estimations récentes, le microbiote d'une personne de référence de 70 kilogrammes ne pèserait que 200 grammes⁹.

Composition résiliente et en même temps variable

De nombreux facteurs tels que l'âge, le mode de naissance ou le style de vie influencent la composition du microbiote. Cependant, ces facteurs n'expliquent jusqu'à présent qu'environ 15

pour cent de la variation du microbiote dans l'intestin de personnes en bonne santé¹⁰. D'autres aspects, comme par exemple une augmentation différente de la glycémie après l'ingestion d'un repas identique, peuvent en revanche être expliqués à environ 80 pour cent par des facteurs connus comme la composition du repas ou l'âge de la personne¹¹.

Les causes de près de 85% des variations du microbiote observées dans différentes populations de personnes en bonne santé sont donc encore inconnues. C'est entre autres pour cette raison qu'il est aujourd'hui difficile de faire des prédictions valables sur la possibilité d'influencer le microbiote par différentes mesures. Pour cette raison, les offres commerciales d'analyse du microbiote doivent être accompagnées d'un point d'interrogation.

En tout état de cause, la composition du microbiote varie en fonction du mode de naissance (césarienne ou naturelle), de la nourriture reçue durant l'enfance, du style de vie, y compris le comportement alimentaire et l'activité physique, du lieu de vie (rural ou urbain, y compris la pollution atmosphérique éventuelle) ou encore des médicaments tels que les antibiotiques et de la prise de certains additifs alimentaires comme les édulcorants^{2,12}. La composition du microbiote peut changer soit lentement après plusieurs semaines, soit très rapidement après un jour^{13,14}. Mais un changement durable nécessite en général un facteur d'influence agissant en continu. Si celui-ci n'agit qu'à court terme, la composition initiale se rétablit et reste donc souvent constante pendant une certaine phase de la vie. C'est la raison pour laquelle on entend souvent parler d'une composition "constante" du microbiote.

La génétique influence-t-elle le microbiote ?

Contrairement à l'affirmation fréquente selon laquelle la génétique de l'être humain aurait une influence notable sur la composition du microbiote, l'ampleur effective de cette influence est faible. En effet, la génétique n'explique qu'entre deux et neuf pour cent de la diversité du microbiote.

Absence de définition de l'état physiologique

Dans de nombreux états pathologiques, la composition ou la diversité du microbiote intestinal diffère de celle des personnes en bonne santé¹⁶. On parle alors souvent de "dysbiose". Le préfixe "dys" signifie toutefois "qui s'écarte de la norme". Le problème avec le terme de dysbiose est que la norme - ou "eubiose", c'est-à-dire l'état "sain" du microbiote - n'a pas encore été définie malgré plus de 30 000 études sur le microbiote intestinal chez l'homme¹⁰.

Certains aspects sont régulièrement cités comme caractéristiques d'un microbiote intestinal sain, comme par exemple une grande diversité de microbiote ou une grande richesse en gènes microbiens. Mais ces indicateurs sont désormais controversés, car leur analyse est par exemple déjà influencée de manière notable par le temps de passage des selles dans l'intestin¹⁷.

De même, l'état du microbiote intestinal de groupes ethniques primitifs et vivant dans des conditions non industrialisées, tels que les Hadza, chasseurs-cueilleurs de Tanzanie en Afrique de l'Est ou les Yanomami du Venezuela, est supposé être l'état "sain"^{18,19}. Mais même si c'était le cas, certaines choses ne sont pas encore claires. Par exemple, la composition du microbiote

des Hadza ou des Yanomami est-elle la seule composition "saine" ou les microbiotes peuvent-ils s'adapter à un mode de vie moderne et leur composition peut-elle alors être considérée comme saine ? Tant que les ambiguïtés ne sont pas levées, nous devons au moins interpréter les différentes "dysbioses" avec prudence.

"Dysbiose" : cause ou conséquence ?

Une question dans le contexte des "dysbioses" observées dans diverses maladies et états non souhaités reste ouverte. La composition différente du microbiote est-elle la cause ou la conséquence de la maladie ou de l'état ? Certes, les signes s'accumulent pour montrer que le microbiote est au moins partiellement responsable de l'apparition de certaines maladies^{2,20}. Mais une réponse claire est encore loin d'être en vue.

Naissance du concept « axe intestin-cerveau »

Dans les années 1970, diverses hormones peptidiques telles que la gastrine, la sécrétine ou le GLP sont découvertes. Comme elles sont toutes produites dans l'estomac ou l'intestin et que certaines sont également présentes dans les cellules nerveuses et cérébrales²¹, le concept d'"axe intestin-cerveau", décrit pour la première fois en février 1980, voit le jour²².

À cette époque, l'axe intestin-cerveau concerne uniquement l'effet potentiel des hormones sur le contrôle de la prise alimentaire et de la digestion. A la fin des années 1990, le concept commence à être associé à l'inflammation intestinale et, par conséquent, le système immunitaire est intégré au concept²³. A la même époque, le concept aurait pu être étendu au microbiote. En effet, la recherche avait déjà montré à cette époque des faits suffisants pour reconnaître l'importance du microbiote dans l'axe intestin-cerveau. Mais il faudra attendre la fin des années 2000 pour que le microbiote soit pris en compte dans le concept d'axe intestin-cerveau.

Échange d'informations bidirectionnel

Les recherches menées sur le microbiote au cours des dix à vingt dernières années ont permis d'acquérir une nouvelle compréhension du métabolisme et de l'axe intestin-cerveau. Les différents organes tels que l'intestin, le foie, le cœur ou le cerveau sont de plus en plus considérés comme un réseau biologique global dont la tâche principale est d'une part le maintien de l'équilibre interne (homéostasie) et d'autre part l'adaptation aux conditions environnementales changeantes (homéorhèse). L'échange d'informations entre les organes (y compris les tissus adipeux et musculaires), décrit comme un cross-talk inter-organes, fait également partie de ce réseau et est désormais considéré comme un leitmotiv du bon fonctionnement du métabolisme. Les réactions inflammatoires et les substances inflammatoires jouent un rôle important dans cet échange, tout comme d'autres produits métaboliques ou les impulsions nerveuses²⁵.

Pour les conservateurs et les personnes à l'esprit purement classique, le cross-talk entre les organes, au sens de véritables conversations, pourrait paraître un peu inhabituel. Mais ce cross-talk est désormais scientifiquement établi et il est même souvent bidirectionnel, comme c'est le cas dans une vraie conversation. Ainsi, les microbiotes parlent au cerveau par le biais des substances neuroactives qu'ils produisent. Le cerveau communique à son tour avec la paroi intestinale par le biais d'impulsions nerveuses et - par la modification consécutive de la sécrétion de substances dans l'intestin - également avec le microbiote²⁶.

L'importance de l'axe microbiote-intestin-cerveau

Il va de soi que l'axe microbiote-intestin-cerveau est encore loin d'avoir fait l'objet de recherches approfondies. Mais aujourd'hui, plus personne ne conteste l'existence de ces liens, du moins dans le monde de la recherche, et l'axe microbiote-cerveau est devenu une branche de recherche bien établie²⁷. On parle même d'une révolution dans la compréhension du métabolisme, notamment en ce qui concerne le dérèglement du métabolisme autour du cerveau et l'apparition de maladies comme Alzheimer, Parkinson ou la dépression^{26,28,29}.

Avec le développement de nouveaux modèles et méthodes et une meilleure collaboration multidisciplinaire, l'avenir autour de l'axe microbiote-intestin-cerveau recèle un énorme potentiel pour la prévention et le traitement de diverses maladies non transmissibles. Les connaissances futures devraient également permettre de mieux comprendre la régulation de la faim et de la satiété et, par conséquent, la gestion du poids corporel^{30,31}. L'axe microbiote-intestin-cerveau est donc considéré comme l'un des acteurs clés du maintien de la santé et les connaissances futures dans ce domaine sont attendues avec impatience. Ceci est également d'une importance capitale dans le contexte du sport, car une performance optimale nécessite un métabolisme et un corps sains.

L'analyse du microbiote : le défi de l'échantillon de selles

Le microbiote se trouve dans l'ensemble du gros intestin et de l'intestin grêle, mais lors d'une analyse, on n'examine que la petite partie qui quitte le rectum sous forme de selles. De plus, lors d'une analyse, on ne mesure souvent que les bactéries et pas les autres micro-organismes qui vivent dans l'intestin : les champignons, les virus, les bactériophages et parfois aussi les parasites. La précision avec laquelle les microbiotes mesurés dans le petit échantillon de selles de quelques grammes reflètent l'ensemble des quelque 200 grammes de microbiote, et notamment leur capacité et leur efficacité, est une question qui n'a pas encore trouvé de réponse définitive.

Dans le contexte de l'échantillon de selles, un autre aspect qui n'a guère été pris en compte jusqu'à présent est d'une grande importance : le temps de transit du contenu intestinal. Dans une étude publiée récemment, on a mesuré une corrélation de presque 100 pour cent entre le temps de transit et la composition du microbiome³³. Cela signifie que la vitesse à laquelle les aliments passent dans l'intestin, c'est-à-dire le temps de transit, peut à elle seule être une raison déterminante pour un résultat différent de l'analyse microbiologique. Le temps de transit devrait donc être enregistré dans chaque étude afin d'obtenir des résultats valables d'une analyse microbiologique. Enfin, différentes méthodes d'analyse du microbiome sont utilisées et leur évaluation n'est souvent pas standardisée. Il est donc très difficile d'interpréter correctement les résultats.

L'alimentation du microbiote est décisive

Dans le contexte du microbiote intestinal, beaucoup de choses ne sont donc pas encore claires, y compris son analyse. Mais il y a au moins une chose qui est sûre. Le microbiote a besoin d'énergie et de nutriments pour exister, et il les obtient en grande partie grâce à la nourriture que l'homme consomme. Les fibres alimentaires jouent ici un rôle important³⁴.

Cependant, en raison de la diversité du microbiote intestinal et

des différentes fibres alimentaires, il existe ici aussi une interaction très complexe. Il est donc actuellement difficile, voire impossible, d'évaluer quelles fibres alimentaires, en quelle quantité et pour quelle composition du microbiote, conduisent à un effet optimal³⁵. Mais on peut partir du principe que la quantité optimale de fibres alimentaires ne s'écarte pas beaucoup de celle que l'on trouve dans les modes d'alimentation standard. Le régime méditerranéen fait sans aucun doute partie de ces régimes et, dans sa version traditionnelle, il fournit environ 50 grammes de fibres alimentaires par jour³⁶. Les recommandations fréquentes concernant l'apport en fibres alimentaires tournent autour de 25 à 30 grammes par jour³⁷, alors que l'apport effectif en fibres alimentaires chez les adultes en Europe ne se situe généralement qu'entre 15 et 25 grammes par jour³⁸. Il est donc fort probable que la majorité des adultes ne consomme pas suffisamment de fibres alimentaires.

Outre les fibres alimentaires, la consommation de probiotiques ou de prébiotiques va également influencer le microbiote intestinal, y compris dans le contexte du sport^{40,41}.

Microbiote et activité physique

Le lien entre une activité physique régulière et la composition du microbiote ou les changements métaboliques qu'elle entraîne a déjà fait l'objet de nombreuses études. Cependant, les données correspondantes sont loin d'être claires et il n'est pas certain que l'énorme complexité du microbiote et de ses interactions avec l'être humain permette d'en tirer des conclusions.

Différentes synthèses systématiques de la littérature montrent l'image suivante : un minimum d'activité physique semble être nécessaire pour une composition et une fonction normale du microbiote (même si cet état normal n'est pas encore clairement défini), alors qu'un entraînement irrégulier, épuisant ou de longue durée devrait avoir un effet négatif sur le microbiote et affecter la réaction immunitaire et l'état de santé général des sportifs⁴⁴⁻⁵⁰. Il semble toutefois (encore) impossible d'en déduire des recommandations générales concrètes, du type « si tu modifies l'aspect XY de ton activité physique/de ton entraînement, cela aura une influence YZ sur le microbiote et, par conséquent, tes performances ou ta récupération seront modifiées de XX pour cent ».

Microbiote et performance sportive

Un apport sous-optimal en nutriments essentiels et en énergie compromet sans aucun doute les performances physiques et donc sportives. Un apport plus important en nutriments essentiels et en énergie dans cet état suboptimal améliorera également sans aucun doute la performance. Il devrait en être de même pour le microbiote. Le problème est que l'état optimal du

microbiote n'est pas encore défini et que l'on ne peut donc que faire des suppositions sur l'état suboptimal⁵¹. Dans ce contexte, il faut également tenir compte du fait que non seulement l'alimentation de base influence le microbiote, mais aussi la consommation de suppléments alimentaires couramment consommés dans le sport (jusqu'aux phénols en tant que modulateurs potentiels de la synthèse des protéines musculaires)^{52,53}. Mais ici aussi, on est encore loin de pouvoir formuler des recommandations simples et applicables au quotidien.

Étant donné qu'une base essentielle de la fonctionnalité du microbiote est la présence de sa « nourriture », il faut partir du principe qu'un apport sous-optimal en fibres alimentaires entraîne une fonctionnalité sous-optimale. En conséquence, la production d'acides gras à chaîne courte par le microbiote est par exemple réduite, ce qui a des conséquences négatives sur l'ensemble du métabolisme ainsi que sur l'intégrité et la stabilité de la paroi intestinale et des cellules immunitaires dans l'intestin. On peut donc supposer qu'en cas d'apport insuffisant en fibres alimentaires, la performance physique et donc sportive est en principe également affectée, même si c'est de manière indirecte. Un apport suffisant en fibres alimentaires, mais aussi en prébiotiques, probiotiques ou diverses substances végétales secondaires, doit donc être considéré comme une mesure judicieuse dans le sport pour ne pas compromettre la performance⁵⁵⁻⁵⁷.

Le lien entre le microbiote et la performance sportive ne semble toutefois pas être linéaire. Il est plus probable que les deux aspects s'influencent mutuellement : le microbiote a un impact sur la performance et la performance permet une activité physique qui influence positivement le microbiote⁴⁷.

Conclusion

Le microbiote intestinal est essentiel au maintien de la santé humaine, et le mode de vie, notamment l'alimentation, module sa composition et son fonctionnement. Si l'importance du microbiote pour l'optimisation des performances est loin d'être pleinement comprise, son rôle fondamental dans un métabolisme sain justifie de le considérer comme faisant partie intégrante de notre organisme dans le contexte sportif et de ne pas le négliger. Le moyen le plus simple de le maintenir en bonne santé est de consommer suffisamment de fibres alimentaires, environ 30 grammes par jour. Cependant, cet apport cible est probablement loin de la consommation actuelle de la plupart des athlètes, ce qui explique pourquoi les fibres alimentaires sont désormais considérées comme « le glucide oublié » dans les recommandations en nutrition sportive⁵⁸.

Auteur : Dr. P. Colombani
Date : Novembre 2025, Version 1.1
Validité : Novembre 2028

Littérature

1. Dubos R. The microbiota of the gastrointestinal tract. *Gastroenterology*. 1966; 51:868–74; doi:10.1016/S0016-5085(19)34339-2.
2. Fan Y, Pedersen O. Gut microbiota in human metabolic health and disease. *Nat.Rev.Microbiol.* 2021; 19:55–71; doi:10.1038/s41579-020-0433-9.
3. Lynch SV, Pedersen O. The human intestinal microbiome in health and disease. *N.Engl.J.Med.* 2016; 375:2369–79; doi:10.1056/NEJMra1600266.
4. Cortes-Selva D, Fairfax K. Schistosome and intestinal helminth modulation of macrophage immunometabolism. *Immunology*. 2021; 162:123–34; doi:10.1111/imm.13231.
5. Li J, Jia H, Cai X, Zhong H, Feng Q, Sunagawa S, Arumugam M, Kultima JR, Prifti E, Nielsen T, Juncker AS, Manichanh C, Chen B, Zhang W, Levenez F, Wang J, Xu X, Xiao L, Liang S, Zhang D, Zhang Z, Chen W, Zhao H, Al-Aama JY, Edris S, Yang H, Wang J, Hansen T, Nielsen HB, Brunak S, Kristiansen K, Guarner F, Pedersen O, Doré J, Ehrlich SD, Bork P, Wang J. An integrated catalog of reference genes in the human gut microbiome. *Nat.Bio-technol.* 2014; 32:834–41; doi:10.1038/nbt.2942.

6. Willyard C. New human gene tally reignites debate. *Nature*. 2018; 558:354–5; doi:10.1038/d41586-018-05462-w.
7. Schroeder BO, Bäckhed F. Signals from the gut microbiota to distant organs in physiology and disease. *Nat.Med.* 2016; 22:1079–89; doi:10.1038/nm.4185.
8. Herculano-Houzel S. The human brain in numbers: A linearly scaled-up primate brain. *Front.Hum.Neurosci.* 2009; 3:31; doi:10.3389/neuro.09.031.2009.
9. Sender R, Fuchs S, Milo R. Revised estimates for the number of human and bacteria cells in the body. *PLoS Biol.* 2016; 14:e1002533; doi:10.1371/journal.pbio.1002533.
10. Shanahan F, Ghosh TS, O'Toole PW. The healthy microbiome - What is the definition of a healthy gut microbiome? *Gastroenterology*. 2021; 160:483–94; doi:10.1053/j.gastro.2020.09.057.
11. Berry SE, Valdes AM, Drew DA, Asnicar F, Mazidi M, Wolf J, Capdevila J, Hadjigeorgiou G, Davies R, Al Khatib H, Bonnett C, Ganesh S, Bakker E, Hart D, Mangino M, Merino J, Linenberg I, Wyatt P, Ordovas JM, Gardner CD, Delahanty LM, Chan AT, Segata N, Franks PW, Spector TD. Human postprandial responses to food and potential for precision nutrition. *Nat.Med.* 2020; 26:964–73; doi:10.1038/s41591-020-0934-0.
12. Zmora N, Suez J, Elinav E. You are what you eat: Diet, health and the gut microbiota. *Nat.Rev.Gastroenterol.Hepatol.* 2019; 16:35–56; doi:10.1038/s41575-018-0061-2.
13. Kolodziejczyk AA, Zheng D, Elinav E. Diet-microbiota interactions and personalized nutrition. *Nat.Rev.Microbiol.* 2019; 17:742–53; doi:10.1038/s41579-019-0256-8.
14. Wu GD, Chen J, Hoffmann C, Bittinger K, Chen Y-Y, Keilbaugh SA, Bewtra M, Knights D, Walters WA, Knight R, Sinha R, Gilroy E, Gupta K, Baldassano R, Nessel L, Li H, Bushman FD, Lewis JD. Linking long-term dietary patterns with gut microbial enterotypes. *Science*. 2011; 334:105–8; doi:10.1126/science.1208344.
15. Daniel H. Diet and gut microbiome and the “Chicken or egg” problem. *Front.Nutr.* 2022; 8; doi:10.3389/fnut.2021.828630.
16. Levy M, Kolodziejczyk AA, Thaïss CA, Elinav E. Dysbiosis and the immune system. *Nat.Rev.Immunol.* 2017; 17:219–32; doi:10.1038/nri.2017.7.
17. van Hul M, Cani PD, Petitfils C, Vos WM de, Tilg H, El-Omar EM. What defines a healthy gut microbiome? *Gut*. 2024; 73:1893–908; doi:10.1136/gutjnl-2024-333378.
18. Falony G, Vieira-Silva S, Raes J. Richness and ecosystem development across faecal snapshots of the gut microbiota. *Nat.Microbiol.* 2018; 3:526–8; doi:10.1038/s41564-018-0143-5.
19. Sonnenburg ED, Sonnenburg JL. The ancestral and industrialized gut microbiota and implications for human health. *Nat.Rev.Microbiol.* 2019; 17:383–90; doi:10.1038/s41579-019-0191-8.
20. Sonnenburg JL, Sonnenburg ED. Vulnerability of the industrialized microbiota. *Science (New York, N.Y.)*. 2019; 366; doi:10.1126/science.aaw9255.
21. Chen Y, Zhou J, Wang L. Role and mechanism of gut microbiota in human disease. *Front.Cell.Infect.Microbiol.* 2021; 11:625913; doi:10.3389/fcimb.2021.625913.
22. Rozé C. Neurohumoral control of gastrointestinal motility. *Reprod.Nutr.Dev.* 1980; 20:1125–41; doi:10.1051/rnd:19800701.
23. Track NS. The gastrointestinal endocrine system. *Can.Med.Assoc.J.* 1980; 122:287–92.
24. Hart A, Kamm MA. Review article: Mechanisms of initiation and perpetuation of gut inflammation by stress. *Aliment.Pharmacol.Ther.* 2002; 16:2017–28; doi:10.1046/j.1365-2036.2002.01359.x.
25. Rhee SH, Pothoulakis C, Mayer EA. Principles and clinical implications of the brain-gut-enteric microbiota axis. *Nat.Rev.Gastroenterol.Hepatol.* 2009; 6:306–14; doi:10.1038/nrgastro.2009.35.
26. Agirman G, Yu KB, Hsiao EY. Signaling inflammation across the gut-brain axis. *Science*. 2021; 374:1087–92; doi:10.1126/science.abi6087.
27. Mayer EA, Nance K, Chen S. The gut-brain axis. *Annu.Rev.Med.* 2022; 73:439–53; doi:10.1146/annurev-med-042320-014032.
28. Chakrabarti A, Geurts L, Hoyle L, Iozzo P, Kraneveld AD, La Fata G, Miani M, Patterson E, Pot B, Shortt C, Vauzour D. The microbiota-gut-brain axis: pathways to better brain health. Perspectives on what we know, what we need to investigate and how to put knowledge into practice. *Cell.Mol.Life Sci.* 2022; 79:80; doi:10.1007/s00018-021-04060-w.
29. Berding K, Vlckova K, Marx W, Schellekens H, Stanton C, Clarke G, Jacka F, Dinan TG, Cryan JF. Diet and the microbiota-gut-brain axis: Sowing the seeds of good mental health. *Adv.Nutr.* 2021; 12:1239–85; doi:10.1093/advances/nmaa181.
30. Rutsch A, Kantsjö JB, Ronchi F. The gut-brain axis: How microbiota and host inflammasome influence brain physiology and pathology. *Front.Immunol.* 2020; 11:604179; doi:10.3389/fimmu.2020.604179.
31. Romani-Pérez M, Bullich-Vilarrubias C, López-Almela I, Liébana-García R, Olivares M, Sanz Y. The microbiota and the gut-brain axis in controlling food intake and energy homeostasis. *Int.J.Mol.Sci.* 2021; 22; doi:10.3390/ijms22115830.
32. Cifuentes L, Acosta A. Homeostatic regulation of food intake. *Clin.Res.Hepatol.Gastroenterol.* 2022; 46:101794; doi:10.1016/j.clinre.2021.101794.
33. Vos WM de, Tilg H, van Hul M, Cani PD. Gut microbiome and health: mechanistic insights. *Gut*. 2022; 71:1020–32; doi:10.1136/gutjnl-2021-326789.
34. Asnicar F, Leeming ER, Dimidi E, Mazidi M, Franks PW, Al Khatib H, Valdes AM, Davies R, Bakker E, Francis L, Chan A, Gibson R, Hadjigeorgiou G, Wolf J, Spector TD, Segata N, Berry SE. Blue poo: Impact of gut transit time on the gut microbiome using a novel marker. *Gut*. 2021; 70:1665–74; doi:10.1136/gutjnl-2020-323877.
35. Gill SK, Rossi M, Bajka B, Whelan K. Dietary fibre in gastrointestinal health and disease. *Nat.Rev.Gastroenterol.Hepatol.* 2021; 18:101–16; doi:10.1038/s41575-020-00375-4.
36. Thomson C, Garcia AL, Edwards CA. Interactions between dietary fibre and the gut microbiota. *Proc.Nutr.Soc.* 2021; 80:398–408; doi:10.1017/S0029665121002834.
37. Kromhout D, Menotti A, Blackburn H. Prevention of coronary heart disease: *Diet, lifestyle and risk factors in the Seven Countries Study*. Boston, MA: Springer Verlag, 2002.
38. EFSA Panel on Dietetic Products Nutrition and Allergies. Scientific Opinion on Dietary Reference Values for carbohydrates and dietary fibre. *EFSA J.* 2010; 8:1462.
39. Stephen AM, Champ MM-J, Cloran SJ, Fleith M, van Lieshout L, Mejbörn H, Burley VJ. Dietary fibre in Europe: Current state of knowledge on definitions, sources, recommendations, intakes and relationships to health. *Nutr.Res.Rev.* 2017; 30:149–90; doi:10.1017/S095442241700004X.
40. Jarrett H, Medlin S, Morehen JC. The role of the gut microbiome and probiotics in sports performance: A narrative review update. *Nutrients*. 2025; 17:690; doi:10.3390/nu17040690.
41. Colombani P. Supplementguide: Faktenblatt Probiotika. Swiss Sports Nutrition Society. 2023. <http://www.ssns.ch/sportsnutrition/supplemente/supplementguide/>. Zugriff: 25.11.25.
42. Bonomini-Gnutzmann R, Plaza-Díaz J, Jorquera-Aguilera C, Rodríguez-Rodríguez A, Rodríguez-Rodríguez F. Effect of intensity and duration of exercise on gut microbiota in humans: A systematic review. *Int.J.Environ.Res.Public Health*. 2022; 19:9518;

- doi:10.3390/ijerph19159518.
43. Grace-Farfaglia P, Frazier H, Iversen MD. Essential factors for a healthy microbiome: A scoping review. *Int.J.Environ.Res.Public Health*. 2022; 19:8361; doi:10.3390/ijerph19148361.
44. Ghaffar T, Ubaldi F, Volpini V, Valeriani F, Romano Spica V. The role of gut microbiota in different types of physical activity and their intensity: systematic review and meta-analysis. *Sports*. 2024; 12:221; doi:10.3390/sports12080221.
45. Ramos C, Gibson GR, Walton GE, Magistro D, Kinnear W, Hunter K. Systematic review of the effects of exercise and physical activity on the gut microbiome of older adults. *Nutrients*. 2022; 14:674; doi:10.3390/nu14030674.
46. Patel BK, Patel KH, Lee CN, Mochhala S. Intestinal microbiota interventions to enhance athletic performance - A review. *Int.J.Mol.Sci*. 2024; 25:10076; doi:10.3390/ijms251810076.
47. Wegierska AE, Charitos IA, Topi S, Potenza MA, Montagnani M, Santacroce L. The connection between physical exercise and gut microbiota: Implications for competitive sports athletes. *Sports Med*. 2022; 52:2355–69; doi:10.1007/s40279-022-01696-x.
48. Álvarez-Herms J, Burtscher M, Corbi F, González A, Odriozola A. A narrative hypothesis: The important role of gut microbiota in the modulation of effort tolerance in endurance athletes. *Nutrients*. 2025; 17; doi:10.3390/nu17172836.
49. Hawley JA, Forster SC, Giles EM. Exercise, the gut microbiome and gastrointestinal diseases: Therapeutic impact and molecular mechanisms. *Gastroenterology*. 2025; 169:48–62; doi:10.1053/j.gastro.2025.01.224.
50. Keely SJ, Cotter PD, Wahlstrom A, Schellekens H, Weinkove D, Barrett KE. From human to superhuman: The impact of the microbiome on physiology. *J.Physiol*. 2025; 603:797–807; doi:10.1113/JP287883.
51. Boisseau N, Barnich N, Koechlin-Ramonatxo C. The nutrition-microbiota-physical activity triad: An inspiring new concept for health and sports performance. *Nutrients*. 2022; 14:924; doi:10.3390/nu14050924.
52. Katsimichas T, Xintarakou A, Vlachopoulos C, Tsioufis C, Lazaros G. Effects of athletic nutritional supplements on the human gut microbiota: A narrative review. *Nutrients*. 2025; 17:3071; doi:10.3390/nu17193071.
53. Vergara Nieto AA, Halabi Diaz A, Hernández Millán M, Sagredo Oyarzo D. Molecular mechanisms, physiological effects, gut microbiota interplay and nutritional strategies of anthocyanins as modulators of muscle protein synthesis: A narrative review. *Curr.Nutr.Rep*. 2025; 14:105; doi:10.1007/s13668-025-00697-2.
54. Bongiovanni T, Yin MOL, Heaney L. The athlete and gut microbiome: Short-chain fatty acids as potential ergogenic aids for exercise and training. *Int.J.Sports Med*. 2021; 42:1143–58; doi:10.1055/a-1524-2095.
55. Hughes RL, Holscher HD. Fueling gut microbes: A Review of the Interaction between diet, exercise, and the gut microbiota in athletes. *Adv.Nutr*. 2021; 12:2190–215; doi:10.1093/advances/nmab077.
56. Martinen M, Ala-Jaakkola R, Laitila A, Lehtinen MJ. Gut microbiota, probiotics and physical performance in athletes and physically active individuals. *Nutrients*. 2020; 12:2936; doi:10.3390/nu12102936.
57. Li Z, Li Y, Wang Y, Chen J, Liu Y. The athlete gut microbiome: A narrative review of multi-omics insights and next-generation probiotic strategies. *Nutrients*. 2025; 17:3260; doi:10.3390/nu17203260.
58. Mancin L, Burke LM, Rollo I. Fibre: The forgotten carbohydrate in sports nutrition recommendations. *Sports Med*. 2025; 55:1067–83; doi:10.1007/s40279-024-02167-1.