HAL open science

Effets de la matrice alimentaire sur la biodisponibilité des micronutriments et phytomicronutriments lipidiques

Charles Desmarchelier

To cite this version:

Charles Desmarchelier. Effets de la matrice alimentaire sur la biodisponibilité des micronutriments et phytomicronutriments lipidiques. Cahiers de Nutrition et de Diététique, 2020, 55 (5), pp.240-248. 10.1016/j.cnd.2020.05.001 . hal-03224403

HAL Id: hal-03224403

https://amu.hal.science/hal-03224403

Submitted on 11 May 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Effets de la matrice alimentaire sur la biodisponibilité des micronutriments et phytomicronutriments lipidiques

Effects of the food matrix on the bioavailability of lipid micronutrients and phytochemicals

Charles Desmarchelier

Aix Marseille Univ, INRAE, INSERM, C2VN, Marseille, France

*Auteur correspondant:
Charles Desmarchelier
UMR 1263 INSERM/1260 INRAE/Université d'Aix-Marseille
Centre CardioVasculaire et Nutrition (C2VN)
Faculté de Médecine
27, boulevard Jean Moulin
13385 Marseille cedex 05
Tél : 04.91.32.42.82
Charles.Desmarchelier@univ-amu.fr

Résumé

Afin que les micronutriments et phytomicronutriments lipidiques (vitamines A, D, E, K, caroténoïdes, phytostérols, certains polyphénols…) que nous ingérons exercent leurs effets biologiques/santé, ils doivent en général rejoindre la circulation générale. Le processus d'absorption de ces molécules est composé de plusieurs étapes (extraction de la matrice alimentaire, incorporation dans les micelles mixtes, captage par les entérocytes…) dont les efficacités sont fortement influencées par les caractéristiques de la matrice de l'aliment source ou des aliments co-ingérés. Ainsi, la libération des caroténoïdes de leur matrice est plus faible lorsqu'ils sont incorporés dans les chloroplastes (feuilles des légumes verts) que dans les chromoplastes (légumes et fruits jaunes, orange, rouges) ou dans des produits animaux. Les autres constituants du repas peuvent augmenter (lipides) ou diminuer (fibres, phytostérols, autres micronutriments) leur biodisponibilité tandis que certaines modifications technologiques/culinaires peuvent permettent une augmentation de l'efficacité d'absorption. Ces facteurs peuvent également affecter la cinétique d'apparition de ces molécules dans la circulation générale, sans que l'on en connaisse les conséquences biologiques. Une meilleure connaissance de l'effet des matrices alimentaires sur la biodisponibilité de ces composés permettrait de proposer des leviers d'action industriels ou individuels afin de limiter les déficiences et d'augmenter leurs bénéfices santé. Sa prise en compte permettrait également une meilleure évaluation de leurs effets dans les études d'épidémiologie nutritionnelle.

Mots clés : vitamines ; caroténoïdes ; digestion ; absorption ; interactions.

Abstract

In order for ingested lipid micronutrients and phytochemicals (vitamin A, D, E, K, carotenoids, phytosterols, some polyphenols…) to exert their biological/health effects, they must usually reach systemic circulation. The absorption process of these molecules includes several steps (food matrix extraction, incorporation into mixed micelles, uptake by enterocytes…) whose efficiencies are strongly influenced by the characteristics of the matrix of the food source or co-ingested foods. Carotenoid release from their matrix is lower when they are incorporated in chloroplasts (green leafy vegetables) compared to chromoplasts (yellow, orange and red vegetables and fruits) and animal products. Other constituents from the meal can increase (lipids) or decrease (fibres, phytosterols, other microconstituents) their bioavailability while some technological/cooking modifications can lead to an increase in the absorption efficiency. These factors can also modify the kinetics of appearance of these molecules in the systemic circulation but the biological consequences thereof are not known. A better knowledge of the effect of food matrices on the bioavailability of these compounds would allow nutritionists to propose actions for the food industry or individuals in order to limit deficiencies and increase their health benefits. Taking into account this factor would also allow scientists to better analyse their effects in nutritional epidemiology studies.

Key words: vitamins; carotenoids; digestion; absorption; interactions.

Introduction

Les aliments que nous consommons sont des assemblages complexes et hétérogènes de très nombreuses molécules. Ils peuvent être décrits par leur composition chimique, qualitative et quantitative, mais également par l'organisation de ces molécules à de multiples niveaux d'échelles (1). Par ailleurs, la composition et l'organisation d'un aliment peuvent évoluer, de manière spontanée (maturation, altération…) ou intentionnelle par l'utilisation de procédés technologiques industriels ou domestiques (cuisson, broyage, appertisation, surgélation, fermentation...). De plus, la finalité d'un aliment étant son ingestion, il subit lors de la digestion une intense simplification moléculaire, sous l'action de processus physiques (mastication, contractions de l'estomac distal) et chimiques (action des sécrétions digestives), et ses constituants sont alors mis en contact avec un nouvel environnement chimique et biologique fluide, trouvant son origine dans les molécules issues de l'hôte mais également des aliments co-ingérés au sein du repas. Il existe donc dans l'environnement aqueux du tube digestif de très nombreuses interactions physico-chimiques. Le terme de matrice alimentaire a été proposé pour décrire la composition des aliments et les interactions entre ses constituants (2, 3). On parle ainsi d'effet matrice (4) lorsqu'on observe une différence entre les effets biologiques/santé de l'ingestion d'un nutriment apporté par des matrices alimentaires différentes, par exemple :

- Nutriment apporté seul / au sein d'un aliment ou d'un repas,
- Nutriment apporté par des aliments différents,
- Nutriment apporté par le même aliment mais ayant subi des traitements culinaires et/ou technologiques différents.

Cet effet matrice est expliqué en partie par des effets sur la biodisponibilité des nutriments. Dans cette revue narrative, nous présenterons les principaux effets connus de la matrice alimentaire sur la biodisponibilité des micronutriments et des phytomicronutriments lipidiques.

Micronutriments et phytomicronutriments lipidiques

Nous ne présentons ici ces molécules que de manière succincte (**Tableau 1**) mais le lecteur intéressé pourra se référer à une revue récente pour plus de détails (5). Un micronutriment est une substance sans valeur énergétique, nécessaire en petite quantité (< 1 g/j) au développement, à la croissance ou au fonctionnement normal de l'organisme, ne pouvant être synthétisée par celui-ci, ou en quantités insuffisantes, et devant donc être obtenue via l'alimentation. *Stricto sensu*, le terme micronutriment lipidique désigne quatre groupes de molécules, à savoir les vitamines A, D, E et K. Le terme phytomicronutriments (on trouve aussi les termes microconstituants végétaux, phytomicroconstituants, composés phytochimiques)

désigne quant à lui un ensemble de composés organiques sans valeur énergétique issus du métabolisme secondaire des végétaux, consommés en petite quantité (< 1 g/j) mais dont l'essentialité pour l'Homme n'a pas été démontrée (6). En conséquence, ils ne possèdent pas de référence nutritionnelle (hormis éventuellement une limite supérieure de sécurité), même s'ils peuvent exercer des effets biologiques/santé. Les principaux phytomicronutriments lipidiques étudiés sont les caroténoïdes mais également certains polyphénols (la curcumine et les xanthones par exemple sont légèrement hydrophobes) et les phytostérols (mais leur effet sur la diminution de la cholestérolémie s'exerce principalement via une inhibition de l'absorption intestinale du cholestérol et ne nécessite donc pas qu'ils soient biodisponibles). Le terme caroténoïde désigne un ensemble de plus de 750 molécules appartenant à la classe chimique des terpènes (sous-classe des tétraterpénoïdes) constituant des pigments naturels allant du rouge au jaune dans la plupart des organismes photosynthétiques et chez certains champignons et bactéries. Ils offrent un rôle de pigment accessoire de la chlorophylle pour la photosynthèse mais remplissent également des rôles de photoprotection (de par leurs propriétés antioxydantes et la capacité de certains d'absorber la lumière bleue ou l'UV proche) ou encore d'attraction des pollinisateurs. Le lycopène, la lutéine, le β-carotène, la β-cryptoxanthine, le phytofluène, l'α-carotène et la zéaxanthine sont les sept caroténoïdes les plus consommés et ceux retrouvés aux concentrations les plus élevées dans le sang (7, 8). Ils ont en conséquence fait l'objet de la majorité des études s'intéressant aux effets biologiques/santé des caroténoïdes. Le β-carotène, l'α-carotène et la β-cryptoxanthine sont des précurseurs de vitamine A et constituent la seule source de vitamine A chez les végétaliens. La lutéine et la zéaxanthine sont retrouvées à des concentrations élevées dans la macula de l'œil. Elles sont impliquées dans la fonction visuelle et pourraient intervenir dans la prévention de la dégénérescence maculaire liée à l'âge (9). La consommation d'aliments sources de lycopène (tomates et produits dérivés de la tomate en particulier) a été associée à la prévention du cancer de la prostate (10) et plus récemment un rôle dans la prévention des maladies cardiovasculaires a été suggéré (11).

Biodisponibilité

Afin qu'un micronutriment puisse exercer un effet biologique/santé au niveau d'un de ses sites d'action, il doit dans un premier temps être absorbé au niveau du tube digestif (dans le cas où le site d'action ne se situe pas dans le tube digestif), puis distribué via la circulation générale et éventuellement métabolisé sous sa forme active. On définit la biodisponibilité comme la quantité relative d'un micronutriment, ou de l'un de ses métabolites, qui atteint la circulation générale ou son site d'action. Dans le cas des micronutriments et

phytomicronutriments lipidiques, cette biodisponibilité peut être faible, autour de 5% par exemple pour le lycopène d'un jus de tomate (12), et est généralement très variable (13). Leur processus d'absorption est constitué de nombreuses étapes limitantes (extraction de l'aliment, solubilisation dans les micelles mixtes, captage par les entérocytes…) dont les efficacités peuvent être évaluées à l'aide de modèles *in vitro* permettant la réalisation d'études mécanistiques et donc une meilleure connaissance des facteurs impliqués. En particulier, la simulation de digestions *in vitro* permet de mesurer la bioaccessibilité, c.-à-d. la fraction de micronutriment de l'aliment solubilisée dans les micelles mixtes à la fin de la digestion, considérée comme la fraction absorbable du micronutriment. L'efficacité de captage (fraction entrant dans l'entérocyte) et/ou d'absorption (fraction atteignant le pole basolatéral de l'entérocyte) des micronutriments incorporés dans les micelles mixtes peut, quant à elle, être évaluée à l'aide de modèles de cellules entérocytaires, les cellules Caco-2 étant les plus largement utilisées. De Pee *et* West (14) ont été les premiers a réaliser une revue systématique des facteurs modulant la biodisponibilité de micronutriments lipidiques, les caroténoïdes en l'occurrence, et leur approche a depuis été appliquée à d'autres micronutriments lipidiques (13). Ces facteurs sont résumés dans l'acronyme anglais SLAMENGHI dans lequel chaque lettre désigne un facteur (15) : S (*Species*) représente l'espèce chimique, L (*molecular Linkage*) la modification chimique, A (*Amount*) la dose ingérée dans le repas, M (*Matrix*) l'effet de la matrice alimentaire et son traitement technologique/culinaire, E (*Effectors*) les facteurs nutritionnels ou médicamenteux, N (*Nutrient status*) le statut micronutritionnel de l'hôte, G (*Genetics*) les facteurs génétiques, H (*Host*) les caractéristiques physiopathologiques de l'hôte et I (*Interactions*) les interactions entre ces facteurs. Parmi ces facteurs, l'effet de la matrice alimentaire (M) et ses constituants (E) sont considérés comme prééminents car, afin d'être absorbés, les micronutriments doivent en premier lieu être extraits de celle-ci et l'efficacité de cette extraction n'est, pour la plupart du temps, que partielle et est très variable. Nous ne présenterons dans ce travail que les facteurs les plus significatifs et dont l'implication est bien établie ainsi que quelques nouveaux résultats, mais le lecteur intéressé pourra se référer à plusieurs revues récentes sur le sujet (16-20) (**Figure 1**).

Effets de la localisation intracellulaire

Ce facteur est particulièrement important dans le cas des caroténoïdes et il a ainsi été montré que leur biodisponibilité variait selon qu'ils se trouvent dans les légumes-feuilles, les aliments végétaux jaunes, orange et rouges ou dans les produits animaux (21). Dans les légumes-feuilles (épinards, choux, salades…), les caroténoïdes se trouvent très majoritairement

dans les chloroplastes, qui sont les organites de la photosynthèse au sein des cellules végétales, où ils jouent un rôle de pigment accessoire de la chlorophylle et de photoprotection (leur couleur est masquée par la chlorophylle, à l'exception notable de l'automne). Dans les chloroplastes, ils sont plus spécifiquement présents dans l'antenne collectrice des photosystèmes, associés à des protéines, situés dans la membrane des thylakoïdes, un réseau membraneux organisé en sacs aplatis. Ces multiples structures constituent autant de barrières à franchir pour permettre la libération des caroténoïdes des légumes-feuilles lors de la digestion et ceci explique en partie leur relative faible biodisponibilité (22, 23), notamment par rapport aux aliments végétaux jaunes, orange et rouges (24). En effet, dans ces derniers, les caroténoïdes se trouvent très majoritairement dans d'autres organites, les chromoplastes, pour lesquels il existe plusieurs sous-types, chacun étant associé à un état physique majoritaire des caroténoïdes : solubilisés dans les lipides dans les chromoplastes globulaires, sous forme de cristaux liquides dans les chromoplastes tubulaires et sous forme de cristaux solides dans les chromoplastes cristalloïdes. La plupart des études de biodisponibilité ayant été réalisées avec des tomates et des carottes, c'est pour cette dernière forme que l'on dispose le plus de résultats. Il ressort que la biodisponibilité des caroténoïdes des chromoplastes cristalloïdes (cristaux solides) est relativement faible (21). Peu de données sont disponibles pour les caroténoïdes des chromoplastes globulaires et tubulaires mais il a récemment été montré que le β-carotène de papayes (majorité de cristaux liquides) est trois fois plus biodisponible que celui de tomates et carottes (25) et que le lycopène des tomates tangerines (en configuration *cis*, solubilisé dans les lipides) est environ dix fois plus biodisponible que celui des tomates communes (en configuration *trans*, cristaux solides) (12). En conséquence, des procédés technologiques plus destructeurs pourraient être nécessaires pour libérer les caroténoïdes des légumes feuilles que ceux des aliments végétaux jaunes, orange et rouges. Enfin, nous obtenons également des caroténoïdes via la consommation de certains produits animaux (œufs et lait principalement) dans lesquels les caroténoïdes sont principalement solubilisés dans les lipides et donc relativement biodisponibles. Ainsi, la consommation d'œufs riches en lutéine pendant dix jours a conduit à une augmentation significative du statut en lutéine comparé à la consommation d'une même quantité de lutéine apportée par la consommation d'épinards ou d'un supplément nutritionnel riche en lutéine (26).

Effets des autres composants de la matrice

La matrice alimentaire peut également influencer la libération et l'absorption des micronutriments lipidiques du fait des nombreuses autres molécules qui la composent. Certains

de ces composants augmentent la biodisponibilité des micronutriments lipidiques. Il a ainsi été montré que les triglycérides présents dans l'aliment source ou dans les aliments co-ingérés augmentaient la biodisponibilité des caroténoïdes (19) et de la vitamine E (20), même si une publication récente rouvre le débat concernant cette dernière (27). Plusieurs mécanismes permettent d'expliquer cet effet. Les triglycérides permettent d'augmenter l'extraction des micronutriments de la matrice alimentaire en constituant une phase huileuse et une émulsion dans l'estomac et l'intestin qui permettent de solubiliser les micronutriments lipidiques (28). La présence de triglycérides augmente également les sécrétions biliaires et pancréatiques via la cholécystokinine, ce qui augmente la disponibilité de certains constituants des micelles mixtes (sels biliaires, cholestérol, phospholipides) et permet l'hydrolyse des esters de micronutriments. Les lipides fournissent également des constituants des micelles mixtes, directement ou indirectement via les produits de leur digestion (acides gras, monoglycérides, lysophospholipides, cholestérol). Enfin, la présence de lipides stimule la sécrétion des chylomicrons par les entérocytes, qui sont les transporteurs lymphatiques et sanguins des micronutriments lipidiques nouvellement absorbés, maintenant ainsi un gradient de concentration des micronutriments entre le pôle apical des entérocytes, c.-à-d. la lumière intestinale, et le compartiment intracellulaire et donc favorisant la diffusion transmembranaire, passive comme facilitée. La présence d'autres vitamines et phytomicronutriments antioxydants au sein des matrices alimentaires (vitamine C et polyphénols notamment) pourrait également permettre de protéger les micronutriments lipidiques d'intérêt de l'oxydation, et donc d'augmenter leur biodisponibilité, mais les seuls résultats disponibles, concernant l'effet de la présence de vitamine C sur la biodisponibilité des caroténoïdes, restent contradictoires (29, 30).

D'autres composants de la matrice alimentaire peuvent au contraire diminuer la biodisponibilité des micronutriments lipidiques. Il est ainsi bien établi que les fibres diminuent la biodisponibilité des caroténoïdes (31) mais apparemment pas celle de la vitamine E (31, 32). Plusieurs mécanismes concomitants pourraient intervenir. Dans le tube digestif, les fibres peuvent piéger d'autres lipides, et notamment les composants des micelles, ce qui diminue la présentation des caroténoïdes au pôle apical des entérocytes. Il a également été montré que les fibres, ou des protéines présentent dans les fractions de céréales riches en fibres (33), diminuent l'activité de la lipase pancréatique ce qui conduit de même à une moindre micellisation des micronutriments lipidiques. Enfin, les fibres augmentent la viscosité du chyme ce qui limite ou ralentit tous les processus de diffusion dans le tube digestif. Néanmoins, un facteur de confusion important dans le cas des caroténoïdes doit être gardé à l'esprit : celui de leur localisation

intracellulaire. Ainsi, comme précédemment mentionné, le β-carotène de papayes est plus biodisponible que celui de tomates et carottes, du fait de leur présence dans les chromoplastes sous formes de cristaux liquides dans les papayes alors que ces fruits présentent une plus grande teneur en fibres (25). Les phytostérols sont également des phytomicronutriments lipidiques que l'on retrouve naturellement dans les huiles végétales ou dans des aliments enrichis tels margarine ou produits laitiers. Dans la lumière intestinale, les phytostérols entrent en compétition avec le cholestérol pour sa micellisation et son captage, limitant ainsi son absorption intestinale et conduisant à une diminution de la cholestérolémie. Néanmoins, il a également été montré que le β-carotène et le lycopène étaient moins biodisponibles en présence de ces stérols végétaux (34, 35) et une revue récente fait état d'un statut diminué en plusieurs caroténoïdes (α- et β-carotène, lycopène, zéaxanthine, β-cryptoxanthine), mais pas en vitamine A, D ou E, suite à la consommation de phytostérols (36). Cet effet n'a néanmoins pas été montré dans une autre étude dans laquelle une boisson enrichie en β-cryptoxanthine a été consommée avec ou sans phytostérols pendant 28 jours (37). Enfin, dans la mesure où les micronutriments et phytomicronutriments lipidiques possèdent des mécanismes d'incorporation dans les micelles mixtes et d'absorption entérocytaires en commun (38), ils pourraient entrer en compétition lorsqu'ils sont co-consommés. Si des études *in vitro* abondent dans ce sens dans le cas des caroténoïdes, les conséquences à long terme sur le statut ne sont pas claires (39). Néanmoins, il a été montré que la consommation de suppléments d'α-tocophérol et d'α-tocophéryl acétate diminuait le statut en γ-tocophérol (40, 41) et que la consommation de suppléments de γ-tocophérol diminuait le statut en α –tocophérol (42).

Effets des modifications technologiques

Les procédés technologiques, réalisés par les industriels ou par les consommateurs eux-mêmes, peuvent entraîner une diminution des concentrations en micronutriments, par élimination de certaines parties des aliments (exemple de l'épluchage) ou dégradation de ces molécules relativement labiles (exemple de l'oxydation à la cuisson). Néanmoins ils peuvent en contrepartie augmenter la biodisponibilité de certains micronutriments lipidiques, notamment via la dégradation des barrières structurales (paroi cellulaire, membranes des chloroplastes et thylakoïdes), la dénaturation et la dégradation des complexes pigments/protéines, et l'amélioration de la solubilisation des molécules ainsi libérées dans les lipides présents dans le milieu de cuisson ou le tube digestif (21). Ceci a bien été montré grâce à l'utilisation d'un modèle de digestion *in vitro* dans lequel des aliments sources de caroténoïdes ayant subi différents traitements technologiques ont été ajoutés à un repas type avant de mesurer

leur bioaccessibilité (43). Il a ainsi été observé une bioaccessibilité croissante du β- et de l'α-carotène de carottes dans l'ordre suivant : crues < appertisées < en purée < jus. Le β-carotène des épinards était également plus bioaccessible lorsque les feuilles avaient été hachées ou bouillies comparativement aux feuilles nature. Enfin, le lycopène et le β-carotène étaient plus bioaccessibles lorsqu'ils étaient issus de sauce tomate que de tomates. Dans une étude randomisée croisée récente chez 12 volontaires en bonne santé, Aschoff *et al.* ont montré que la β-cryptoxanthine, un caroténoïde provitaminique A, était 1,8 fois plus biodisponible lorsqu'elle provenait d'un jus d'oranges pasteurisées que d'oranges fraîches (44). Ces résultats étaient en accord avec les mesures de bioaccessibilité *in vitro* confirmant que la relative moindre quantité de β-cryptoxanthine dans le jus d'orange (pertes dues au procédé) était plus que compensée par une meilleure solubilisation dans les micelles mixtes. Si la rupture des barrières structurales associée à la fabrication du jus d'orange favorise indéniablement l'extraction de la β-cryptoxanthine de sa matrice, il faut tout de même souligner que ce procédé a réduit la quantité de fibres de 90% par rapport aux oranges fraîches. Ceci participe probablement à l'augmentation de la biodisponibilité de la β-cryptoxanthine. Néanmoins, on peut s'interroger sur les bénéfices santé d'un tel aliment. En effet, la pertinence nutritionnelle de ce traitement technologique dépend de la population cible et du but recherché. Si l'objectif est une amélioration du statut en vitamine A, dont la carence reste un problème de santé publique majeur dans de nombreux pays en développement (45), ce traitement technologique est opportun. Néanmoins, il est bien démontré que les fibres ont des effets bénéfiques pour la santé, et il serait donc réducteur de présupposer les bénéfices santé globaux d'un tel aliment uniquement basé sur sa capacité à mieux libérer un seul nutriment. Des conclusions similaires peuvent être tirées d'une récente étude ayant montré une augmentation de la biodisponibilité de la β-cryptoxanthine et de la lutéine d'un jus d'orange fermenté comparativement à celle d'un jus d'orange standard, la fermentation ayant également conduit à une diminution de la teneur en fibres (46). Relativement peu de données existent concernant l'effet de procédés technologiques sur la biodisponibilité de la vitamine E dans ses matrices d'origine. Néanmoins, une étude *in vitro* a montré que les tocophérols d'amandes, les graines étant un contributeur important à nos apports en vitamine E, étaient plus bioaccessibles lorsque les amandes avaient été réduites en poudre (47). Les procédés technologiques peuvent également entraîner des modifications des molécules elles-mêmes. Ainsi, le chauffage de produits de tomates à des températures modérées à élevées en présence de lipides, ou d'oignons et d'huile d'olive extra vierge comme récemment montré (48), conduit à un changement de conformation du lycopène, de *trans* en *cis* ; et il a été montré que cette forme plus soluble était plus biodisponible (49).

Effet matrice et cinétique post-prandiale des micronutriments

Les pharmacocinéticiens définissent la biodisponibilité comme la quantité relative de substance active qui atteint la circulation générale après administration mais également comme la vitesse à laquelle se produit ce phénomène. En tant que nutritionnistes, nous nous limitons souvent à la première partie de cette définition, même si les conséquences biologiques des cinétiques d'apparition des molécules d'origine alimentaire sont de plus en plus étudiées, ce qui a donné naissance au domaine de la nutri-cinétique (50). Une étude récente de notre équipe a montré que la matrice alimentaire influençait la cinétique d'apparition de la lutéine dans la circulation générale, sans que sa biodisponibilité (au sens de la quantité relative) soit affectée (51). La lutéine était apportée soit par une matrice alimentaire (épinards hachés en conserve), soit pure. Une première approche par l'utilisation de digestions *in vitro* a permis de montrer que la lutéine des épinards était plus bioaccessible que la lutéine pure. Ceci s'expliquait notamment par une moindre dégradation au cours de la digestion, en raison d'une protection chimique via la présence d'autres antioxydants (les épinards apportant également du β-carotène, de la vitamine E, de la vitamine K, des polyphénols) et d'une protection physique offerte par les nombreuses barrières structurales de l'aliment. Les micelles issues de ces digestions ont ensuite été mises au contact d'un modèle de cellules entérocytaires et il a été observé que l'efficacité de captage de la lutéine était supérieure suite aux digestions comprenant les épinards hachés. Ceci pourrait s'expliquer par des phénomènes de compétition avec les autres micronutriments lipidiques des épinards comme expliqué plus haut. De manière intéressante, un calcul théorique de biodisponibilité, prenant en compte la bioaccessibilité et l'efficacité de captage entérocytaire, montrait que la résultante était nulle, c.-à-d. que la biodisponibilité théorique de la lutéine des épinards et pure étaient similaires. Finalement, une deuxième approche *in vivo* par une étude croisée sur 6 miniporcs a permis de montrer que la biodisponibilité de la lutéine des deux matrices n'était pas différente (au sens de la quantité relative atteignant la circulation générale), confirmant ainsi les résultats des études *in vitro*, mais différaient du fait de leur cinétique, la lutéine pure apparaissant plus précocement dans la circulation générale. La question des conséquences biologiques potentielles de telles différences de cinétique, notamment en ce qui concerne la modification des propriétés antioxydantes ou de distribution tissulaire, reste ouverte.

Effet matrice et recommandations nutritionnelles

Actuellement, la très grande majorité des recommandations nutritionnelles ne tiennent pas compte de l'effet matrice et la biodisponibilité des micronutriments lipidiques est supposée constante d'une source alimentaire à l'autre mais également d'un individu à l'autre (5, 52). Il existe une exception notable dans le cas des caroténoïdes provitaminiques A. En effet, pour ces molécules ont été proposés des facteurs de conversion permettant de calculer la quantité de caroténoïde provitaminique A nécessaire afin d'obtenir 1 µg d'équivalent d'activité du rétinol (RAE) en fonction de la source alimentaire :

- 2 µg de β-carotène d'un complément alimentaire (solubilisé dans de l'huile)
- 14 µg de β-carotène d'un aliment
- 28 µg d'α-carotène ou β-cryptoxanthine d'un aliment

Ils tiennent compte de la relative faible biodisponibilité des caroténoïdes des aliments et du fait que la coupure enzymatique d'une molécule d'α-carotène et de β-cryptoxanthine ne permet d'obtenir qu'une molécule de rétinol, contre deux pour le β-carotène. Ces facteurs ont été proposés par l'OMS (53) mais l'ANSES et l'EFSA estiment plus élevée la biodisponibilité des caroténoïdes des aliments (facteur de 6 pour le β-carotène et 12 pour l'α-carotène et la β-cryptoxanthine) (54). Ces coefficients sont des moyennes et ne tiennent pas compte pas la variabilité de la biodisponibilité des caroténoïdes provitaminiques A d'une matrice alimentaire à l'autre, mais des améliorations ont été proposées suite à des études interventionnelles chez des enfants et femmes allaitantes de pays en développement (Vietnam et Indonésie) et un facteur de 12 pour le β-carotène des fruits et de 28 pour le β-carotène des légumes-feuilles ont été suggérés (55, 56). En considérant un rapport de consommation moyen de légumes par rapport aux fruits de 4, le coefficient de conversion moyen du β-carotène serait de 21 (55) et les coefficients utilisés actuellement conduiraient à une surestimation des apports en vitamine A chez ces populations à risque de carence en vitamine A. Dans une étude récente (57), Perignon *et al.* ont réalisé une revue de la littérature afin d'affiner ces facteurs de conversion et ont obtenu les résultats suivants :

- Epinards : 21
- Carottes : 14
- Fruits : 12
- Autres légumes : 27
- Maïs : 3,2
- Huiles et graisses : 9

Ils ont ensuite calculé un coefficient de conversion moyen du β-carotène à partir de l'analyse du régime de 1899 adultes issus de l'étude INCA2. Ce coefficient était de 17,7. Cela

leur a ensuite permis d'estimer la prévalence d'apports inadéquats en vitamine A dans cette population à 19,5% (en % de la population dont les apports sont inférieurs au besoin nutritionnel moyen). Le même calcul en utilisant les coefficients de conversion de l'EFSA/ANSES et de l'OMS donnait respectivement des prévalences de 5,9 et 16,9%. Les coefficients utilisés dans l'Union Européenne conduisent à une large surestimation des apports en vitamine A et donc sous-estiment la part de la population à risque de déficience/carence.

Conclusion

S'il est clairement établi que la matrice alimentaire constitue un déterminant important de la biodisponibilité des micronutriments et phytomicronutriments lipidiques, de nombreuses inconnues subsistent qui sont autant de voies d'exploration. L'intégration de la biodisponibilité de ces molécules dans les recommandations nutritionnelles est à l'heure actuelle soit simpliste (caroténoïdes provitaminiques A), soit absente (tous les autres micronutriments et phytomicronutriments lipidiques !). En conséquence, plus d'études mécanistiques et plus de mesures de biodisponibilité sur les principales sources alimentaires contribuant au statut circulant de ces molécules sont nécessaires. Une meilleure connaissance de ces mécanismes et des effets des différentes matrices permettrait de proposer des leviers d'action afin d'identifier les procédés technologiques/culinaires, ou les associations alimentaires, maximisant la quantité de micronutriment atteignant la circulation générale, c.-à-d. le meilleur compromis entre la quantité de micronutriments dans l'aliment à l'issue des procédés et leur biodisponibilité. De plus, la matrice alimentaire affecte non seulement la quantité de micronutriments atteignant la circulation générale mais également la cinétique de cette apparition sans que les conséquences biologiques/santé de cette dernière soient connues. Une meilleure prise en compte de l'effet matrice nous permettrait d'affiner notre analyse des études d'épidémiologie nutritionnelle en segmentant les aliments selon la biodisponibilité du nutriment d'intérêt. Ainsi, a-t-il été montré que l'association inverse entre le risque de cancer de la prostate et la consommation de sauce tomate, une source de lycopène biodisponible, est plus forte que l'association avec la simple consommation de lycopène (issus de tomates, produits de la tomate et autre aliments source) (10). Enfin, il est important de souligner qu'un aliment ne se résume pas à la somme de ses micronutriments (2), et a fortiori à un micronutriment isolé, et que la seule prise en compte des conséquences de l'effet matrice sur la biodisponibilité ne permet pas d'expliquer l'intégralité des bénéfices santé de la consommation d'un aliment, y compris selon les procédés technologiques/culinaires qu'il a subi. En effet, les nombreuses molécules d'un aliment exercent des effets biologiques à de nombreux sites d'action, dans de nombreuses voies

métaboliques. L’effet santé d’un aliment se révèle plus souvent la résultante des multiples effets de ses composants, et de leurs interactions, comme le soulignent les nombreux résultats décevants de supplémentation de nutriments isolés (58).

Points essentiels

- Les caroténoïdes des légumes et fruits rouges, orange et jaunes sont généralement plus biodisponibles que ceux des légumes feuilles.
- Les autres molécules de l'aliment ou des aliments co-ingérés peuvent influencer la biodisponibilité des micronutriments.
- Les procédés technologiques/culinaires favorisent en général l'extraction de la matrice.
- La prise en compte de la biodisponibilité permettrait d'affiner les recommandations nutritionnelles. Elle permettrait également une meilleure analyse des études d'associations nutritionnelles.

Remerciements

Cette revue a été rédigée suite à une communication orale aux JFN de Rennes (27-29 novembre 2019) et à une invitation par le comité de rédaction des cahiers de nutrition et diététique (Eric Bertin, rédacteur en chef, et Jean-Michel Chardigny, président du comité de rédaction).

L'auteur remercie le Dr. Patrick Borel (Aix Marseille Univ, INRAE, INSERM, C2VN) pour sa relecture critique du manuscrit.

Déclaration de liens d'intérêts

L'auteur déclare ne pas avoir de liens d'intérêts.

REFERENCES

1. Ubbink J, Burbidge A, Mezzenga R. Food structure and functionality: a soft matter perspective. Soft Matter 2008;4(8):1569. doi: 10.1039/b802183j.
2. Jacobs DR, Jr., Tapsell LC. Food, not nutrients, is the fundamental unit in nutrition. Nutrition reviews 2007;65(10):439-50. doi: 10.1111/j.1753-4887.2007.tb00269.x.
3. Parada J, Aguilera JM. Food microstructure affects the bioavailability of several nutrients. Journal of food science 2007;72(2):R21-32. doi: 10.1111/j.1750-3841.2007.00274.x.
4. Lecerf J-M, Legrand P. Les effets des nutriments dépendent-ils des aliments qui les portent ? L'effet matrice. Cahiers de Nutrition et de Diététique 2015;50(3):158-64. doi: 10.1016/j.cnd.2014.12.003.
5. Borel P, Desmarchelier C. Bioavailability of Fat-Soluble Vitamins and Phytochemicals in Humans: Effects of Genetic Variation. Annu Rev Nutr 2018;38:69-96. doi: 10.1146/annurev-nutr-082117-051628.
6. Amiot MJ CV, Strigler F. Les phytomicronutriments. Paris:Tec & Doc Lavoisier 2012:p. 1—386.
7. Böhm VL, G.; Olmedilla-Alonso , B.; Phelan, D.; Reboul, E.; Banati, D.; Borel, P.; Corte-Real, J.; de Lera, A.R.; Desmarchelier, C.; Dulinska-Litewka, J.; Landrier, J.-F.; Milisav, I.; Nolan, J.; Porrini, M.; Riso, P.; Roob, J.M.; Valanou, E.; Wawrzyniak, A.; Winklhofer-Roob, B.M.; Rühl, R.; Bohn, T. From carotenoid intake to carotenoid blood and tissue concentrations – implications for dietary intake recommendations. Nutrition reviews 2020;In Press.
8. Khachik F, Beecher GR, Goli MB, Lusby WR, Smith JC, Jr. Separation and identification of carotenoids and their oxidation products in the extracts of human plasma. Analytical Chemistry 1992;64(18):2111-22. doi: 10.1021/ac00042a016.
9. Mares J. Lutein and Zeaxanthin Isomers in Eye Health and Disease. Annu Rev Nutr 2016;36:571-602. doi: 10.1146/annurev-nutr-071715-051110.
10. Giovannucci E, Rimm EB, Liu Y, Stampfer MJ, Willett WC. A prospective study of tomato products, lycopene, and prostate cancer risk. Journal of the National Cancer Institute 2002;94(5):391-8. doi: 10.1093/jnci/94.5.391.
11. Cheng HM, Koutsidis G, Lodge JK, Ashor AW, Siervo M, Lara J. Lycopene and tomato and risk of cardiovascular diseases: A systematic review and meta-analysis of epidemiological evidence. Critical reviews in food science and nutrition 2019;59(1):141-58. doi: 10.1080/10408398.2017.1362630.
12. Cooperstone JL, Ralston RA, Riedl KM, Haufe TC, Schweiggert RM, King SA, Timmers CD, Francis DM, Lesinski GB, Clinton SK, et al. Enhanced bioavailability of lycopene when consumed as cis-isomers from tangerine compared to red tomato juice, a randomized, cross-over clinical trial. Molecular nutrition & food research 2015;59(4):658-69. doi: 10.1002/mnfr.201400658.
13. Borel P. Factors affecting intestinal absorption of highly lipophilic food microconstituents (fat-soluble vitamins, carotenoids and phytosterols). Clin Chem Lab Med 2003;41(8):979-94. doi: 10.1515/CCLM.2003.151.
14. de Pee S, West C. Dietary carotenoids and their role in combating vitamin A deficiency : a review of the litterature. European journal of clinical nutrition 1996;50:S38-S53.
15. West CE, Castenmiller JJ. Quantification of the "SLAMENGHI" factors for carotenoid bioavailability and bioconversion. International journal for vitamin and nutrition research Internationale Zeitschrift fur Vitamin- und Ernahrungsforschung Journal international de vitaminologie et de nutrition 1998;68(6):371-7.

16. Bohn T. Dietary factors affecting polyphenol bioavailability. Nutrition reviews 2014;72(7):429-52. doi: 10.1111/nure.12114.
17. Borel P. Les matrices végétales : leurs effets sur la biodisponibilité des caroténoïdes. Cahiers de Nutrition et de Diététique 2018;53(2):114-22. doi: 10.1016/j.cnd.2018.02.002.
18. Borel P, Caillaud D, Cano NJ. Vitamin D bioavailability: state of the art. Critical reviews in food science and nutrition 2015;55(9):1193-205. doi: 10.1080/10408398.2012.688897.
19. Desmarchelier C, Borel P. Overview of carotenoid bioavailability determinants: From dietary factors to host genetic variations. Trends Food Sci Technol 2017;69:270-80. doi: 10.1016/j.tifs.2017.03.002.
20. Desmarchelier C, Borel P. Chapter 52 - Bioavailability of Vitamin E. Edtion ed. In: Said HM, ed. Physiology of the Gastrointestinal Tract (Sixth Edition): Academic Press, 2018:1181-96.
21. Schweiggert RM, Carle R. Carotenoid deposition in plant and animal foods and its impact on bioavailability. Critical reviews in food science and nutrition 2017;57(9):1807-30. doi: 10.1080/10408398.2015.1012756.
22. de Pee S, West CE, Muhilal, Karyadi D, Hautvast JG. Lack of improvement in vitamin A status with increased consumption of dark-green leafy vegetables. Lancet (London, England) 1995;346(8967):75-81. doi: 10.1016/s0140-6736(95)92111-7.
23. van het Hof KH, Tijburg LB, Pietrzik K, Weststrate JA. Influence of feeding different vegetables on plasma levels of carotenoids, folate and vitamin C. Effect of disruption of the vegetable matrix. The British journal of nutrition 1999;82(3):203-12.
24. de Pee S, West CE, Permaesih D, Martuti S, Muhilal, Hautvast JG. Orange fruit is more effective than are dark-green, leafy vegetables in increasing serum concentrations of retinol and beta-carotene in schoolchildren in Indonesia. The American journal of clinical nutrition 1998;68(5):1058-67. doi: 10.1093/ajcn/68.5.1058.
25. Schweiggert RM, Kopec RE, Villalobos-Gutierrez MG, Hogel J, Quesada S, Esquivel P, Schwartz SJ, Carle R. Carotenoids are more bioavailable from papaya than from tomato and carrot in humans: a randomised cross-over study. The British journal of nutrition 2014;111(3):490-8. doi: 10.1017/S0007114513002596.
26. Chung HY, Rasmussen HM, Johnson EJ. Lutein bioavailability is higher from lutein-enriched eggs than from supplements and spinach in men. The Journal of nutrition 2004;134(8):1887-93. doi: 10.1093/jn/134.8.1887.
27. Traber MG, Leonard SW, Ebenuwa I, Violet PC, Wang Y, Niyyati M, Padayatty S, Tu H, Courville A, Bernstein S, et al. Vitamin E absorption and kinetics in healthy women, as modulated by food and by fat, studied using 2 deuterium-labeled alpha-tocopherols in a 3-phase crossover design. The American journal of clinical nutrition 2019;110(5):1148-67. doi: 10.1093/ajcn/nqz172.
28. Goupy P, Genot C, Hammaz F, Halimi C, Caris-Veyrat C, Borel P. Mechanisms Governing the Transfer of Pure and Plant Matrix Carotenoids Toward Emulsified Triglycerides. Molecular nutrition & food research 2020;64(7):e1900911. doi: 10.1002/mnfr.201900911.
29. Reboul E, Thap S, Tourniaire F, Andre M, Juhel C, Morange S, Amiot MJ, Lairon D, Borel P. Differential effect of dietary antioxidant classes (carotenoids, polyphenols, vitamins C and E) on lutein absorption. The British journal of nutrition 2007;97(3):440-6. doi: 10.1017/S0007114507352604.

30. Tanumihardjo SA, Li J, Dosti MP. Lutein absorption is facilitated with cosupplementation of ascorbic acid in young adults. Journal of the American Dietetic Association 2005;105(1):114-8. doi: 10.1016/j.jada.2004.10.011.
31. Riedl J, Linseisen J, Hoffmann J, Wolfram G. Some dietary fibers reduce the absorption of carotenoids in women. The Journal of nutrition 1999;129(12):2170-6.
32. Greenwood DC, Cade JE, White K, Burley VJ, Schorah CJ. The impact of high non-starch polysaccharide intake on serum micronutrient concentrations in a cohort of women. Public Health Nutrition 2004;7(4):543-8. doi: 10.1079/PHN2003571.
33. Borel P, Lairon D, Termine E, Grataroli R, Lafont H. Isolation and properties of lipolysis inhibitory proteins from wheat germ and wheat bran. Plant foods for human nutrition (Dordrecht, Netherlands) 1989;39(4):339-48. doi: 10.1007/BF01092071.
34. Clifton PM, Noakes M, Ross D, Fassoulakis A, Cehun M, Nestel P. High dietary intake of phytosterol esters decreases carotenoids and increases plasma plant sterol levels with no additional cholesterol lowering. Journal of lipid research 2004;45(8):1493-9. doi: 10.1194/jlr.M400074-JLR200.
35. Richelle M, Enslen M, Hager C, Groux M, Tavazzi I, Godin JP, Berger A, Metairon S, Quaile S, Piguet-Welsch C, et al. Both free and esterified plant sterols reduce cholesterol absorption and the bioavailability of beta-carotene and alpha-tocopherol in normocholesterolemic humans. The American journal of clinical nutrition 2004;80(1):171-7. doi: 10.1093/ajcn/80.1.171.
36. Baumgartner S, Ras RT, Trautwein EA, Mensink RP, Plat J. Plasma fat-soluble vitamin and carotenoid concentrations after plant sterol and plant stanol consumption: a meta-analysis of randomized controlled trials. European journal of nutrition 2017;56(3):909-23. doi: 10.1007/s00394-016-1289-7.
37. Granado-Lorencio F, Donoso-Navarro E, Sanchez-Siles LM, Blanco-Navarro I, Perez-Sacristan B. Bioavailability of beta-cryptoxanthin in the presence of phytosterols: in vitro and in vivo studies. Journal of agricultural and food chemistry 2011;59(21):11819-24. doi: 10.1021/jf202628w.
38. Reboul E, Borel P. Proteins involved in uptake, intracellular transport and basolateral secretion of fat-soluble vitamins and carotenoids by mammalian enterocytes. Progress in lipid research 2011;50(4):388-402. doi: 10.1016/j.plipres.2011.07.001.
39. Tyssandier V, Cardinault N, Caris-Veyrat C, Amiot MJ, Grolier P, Bouteloup C, Azais-Braesco V, Borel P. Vegetable-borne lutein, lycopene, and beta-carotene compete for incorporation into chylomicrons, with no adverse effect on the medium-term (3-wk) plasma status of carotenoids in human. The American journal of clinical nutrition 2002;75(3):526-34.
40. Chopra RK, Bhagavan HN. Relative bioavailabilities of natural and synthetic vitamin E formulations containing mixed tocopherols in human subjects. International journal for vitamin and nutrition research Internationale Zeitschrift fur Vitamin- und Ernahrungsforschung Journal international de vitaminologie et de nutrition 1999;69(2):92-5. doi: 10.1024/0300-9831.69.2.92.
41. Huang HY, Appel LJ. Supplementation of diets with alpha-tocopherol reduces serum concentrations of gamma- and delta-tocopherol in humans. The Journal of nutrition 2003;133(10):3137-40. doi: 10.1093/jn/133.10.3137.
42. Yoshikawa S, Morinobu T, Hamamura K, Hirahara F, Iwamoto T, Tamai H. The effect of gamma-tocopherol administration on alpha-tocopherol levels and metabolism in humans. European journal of clinical nutrition 2005;59(8):900-5. doi: 10.1038/sj.ejcn.1602154.

43. Reboul E, Richelle M, Perrot E, Desmoulins-Malezet C, Pirisi V, Borel P. Bioaccessibility of carotenoids and vitamin E from their main dietary sources. Journal of agricultural and food chemistry 2006;54(23):8749-55. doi: 10.1021/jf061818s.
44. Aschoff JK, Rolke CL, Breusing N, Bosy-Westphal A, Hogel J, Carle R, Schweiggert RM. Bioavailability of beta-cryptoxanthin is greater from pasteurized orange juice than from fresh oranges - a randomized cross-over study. Molecular nutrition & food research 2015;59(10):1896-904. doi: 10.1002/mnfr.201500327.
45. Mason J, Greiner T, Shrimpton R, Sanders D, Yukich J. Vitamin A policies need rethinking. International journal of epidemiology 2015;44(1):283-92. doi: 10.1093/ije/dyu194.
46. Hornero-Mendez D, Cerrillo I, Ortega A, Rodriguez-Grinolo MR, Escudero-Lopez B, Martin F, Fernandez-Pachon MS. beta-Cryptoxanthin is more bioavailable in humans from fermented orange juice than from orange juice. Food chemistry 2018;262:215-20. doi: 10.1016/j.foodchem.2018.04.083.
47. Mandalari G, Faulks RM, Rich GT, Lo Turco V, Picout DR, Lo Curto RB, Bisignano G, Dugo P, Dugo G, Waldron KW, et al. Release of protein, lipid, and vitamin E from almond seeds during digestion. Journal of agricultural and food chemistry 2008;56(9):3409-16. doi: 10.1021/jf073393v.
48. Yu J, Gleize B, Zhang L, Caris-Veyrat C, Renard C. A D-optimal mixture design of tomato-based sauce formulations: effects of onion and EVOO on lycopene isomerization and bioaccessibility. Food & function 2019;10(6):3589-602. doi: 10.1039/c9fo00208a.
49. Unlu NZ, Bohn T, Francis DM, Nagaraja HN, Clinton SK, Schwartz SJ. Lycopene from heat-induced cis-isomer-rich tomato sauce is more bioavailable than from all-trans-rich tomato sauce in human subjects. The British journal of nutrition 2007;98(1):140-6. doi: 10.1017/S0007114507685201.
50. van Duynhoven JPM, van Velzen EJJ, Westerhuis JA, Foltz M, Jacobs DM, Smilde AK. Nutrikinetics: Concept, technologies, applications, perspectives. Trends Food Sci Technol 2012;26(1):4-13. doi: 10.1016/j.tifs.2012.01.004.
51. Margier M, Buffiere C, Goupy P, Remond D, Halimi C, Caris-Veyrat C, Borel P, Reboul E. Opposite Effects of the Spinach Food Matrix on Lutein Bioaccessibility and Intestinal Uptake Lead to Unchanged Bioavailability Compared to Pure Lutein. Molecular nutrition & food research 2018;62(11):e1800185. doi: 10.1002/mnfr.201800185.
52. Bohn T, Desmarchelier C, Dragsted LO, Nielsen CS, Stahl W, Ruhl R, Keijer J, Borel P. Host-related factors explaining interindividual variability of carotenoid bioavailability and tissue concentrations in humans. Molecular nutrition & food research 2017;61(6). doi: 10.1002/mnfr.201600685.
53. Organization WH. Vitamin and mineral requirements in human nutrition: World Health Organization, 2004.
54. EFSA Panel on Dietetic Products N, Allergies. Scientific Opinion on Dietary Reference Values for vitamin A. EFSA Journal 2015;13(3):4028. doi: 10.2903/j.efsa.2015.4028.
55. Khan NC, West CE, de Pee S, Bosch D, Phuong HD, Hulshof PJ, Khoi HH, Verhoef H, Hautvast JG. The contribution of plant foods to the vitamin A supply of lactating women in Vietnam: a randomized controlled trial. The American journal of clinical nutrition 2007;85(4):1112-20. doi: 10.1093/ajcn/85.4.1112.
56. West CE, Eilander A, van Lieshout M. Consequences of revised estimates of carotenoid bioefficacy for dietary control of vitamin A deficiency in developing

countries. The Journal of nutrition 2002;132(9 Suppl):2920S-6S. doi: 10.1093/jn/132.9.2920S.
57. Perignon M, Barre T, Gazan R, Amiot MJ, Darmon N. The bioavailability of iron, zinc, protein and vitamin A is highly variable in French individual diets: Impact on nutrient inadequacy assessment and relation with the animal-to-plant ratio of diets. Food chemistry 2018;238:73-81. doi: 10.1016/j.foodchem.2016.12.070.
58. Mozaffarian D. Dairy Foods, Obesity, and Metabolic Health: The Role of the Food Matrix Compared with Single Nutrients. Advances in nutrition (Bethesda, Md) 2019;10(5):917S-23S. doi: 10.1093/advances/nmz053.
59. ANSES. Actualisation des repères du PNNS : révision des repères de consommations alimentaires. 2016.
60. ANSES. Etude individuelle nationale des consommations alimentaires 3 (INCA 3). 2017.
61. Turck D, Bresson JL, Burlingame B, Dean T, Fairweather-Tait S, Heinonen M, Hirsch-Ernst KI, Mangelsdorf I, McArdle HJ, Naska A, et al. Dietary reference values for vitamin K. EFSA Journal 2017;15(5):e04780. doi: 10.2903/j.efsa.2017.4780.
62. Hayes A, Hennessy A, Walton J, McNulty BA, Lucey AJ, Kiely M, Flynn A, Cashman KD. Phylloquinone Intakes and Food Sources and Vitamin K Status in a Nationally Representative Sample of Irish Adults. The Journal of nutrition 2016;146(11):2274-80. doi: 10.3945/jn.116.239137.
63. Ostlund RE, Jr. Phytosterols in human nutrition. Annu Rev Nutr 2002;22:533-49. doi: 10.1146/annurev.nutr.22.020702.075220.

Figure 1. Principaux facteurs dont l'effet sur la biodisponibilité des micronutriments et phytomicronutriments lipidiques est bien établi.

Tableau 1. Principaux micronutriments et phytomicronutriments lipidiques étudiés en nutrition humaine.

	Référence nutritionnelle	Consommation estimée (adultes)	Principaux aliments sources
Micronutriments			
Vitamine A	Hommes : 750 µg RAE[a]/j (RNP[b]) Femmes : 650 RAE µg/j (RNP) (59)	Rétinol : 470,7 µg/j Bêta-carotène : 2,7 mg/j (60)	Viandes, poissons, produits laitiers
Vitamine D	15 µg/j (RNP) (59)	3,1 µg/j (60)	Poissons gras, produits laitiers
Vitamine E	Hommes : 10,5 mg/j (AS[c]) Femmes : 9,9 mg/j (AS) (59)	9,8 mg/j (60)	Huiles végétales, fruits à coques
Vitamine K	70 µg/j (AS) (61)	Phylloquinone : 85 µg/j (62) Ménaquinones : 13,1 µg/j (60)	Phylloquinone : légumes feuilles, brassicacées Ménaquinones : produits animaux
Phytomicronutriments[e]			
Lycopène	Aucune	4,6 mg/j (7)	Tomate, produits de tomates
Bêta-carotène	Aucune[d]	4,1 mg/j (7)	Carotte, patate douce, épinard
Lutéine	Aucune	2,2 mg/j (lutéine + zéaxanthine) (7)	Epinard, œuf, maïs
Alpha-carotène	Aucune[d]	0,7 mg/j (7)	Carotte, poivron rouge
Bêta-cryptoxanthine	Aucune[d]	0,3 mg/j (7)	Courge, tangerine, poivron rouge
Zéaxanthine	Aucune	2,2 mg/j (lutéine + zéaxanthine) (7)	Œuf, maïs, poivron orange
Phytostérols	Aucune	167-437 mg/j (63)	Huiles végétales, fruits à coques

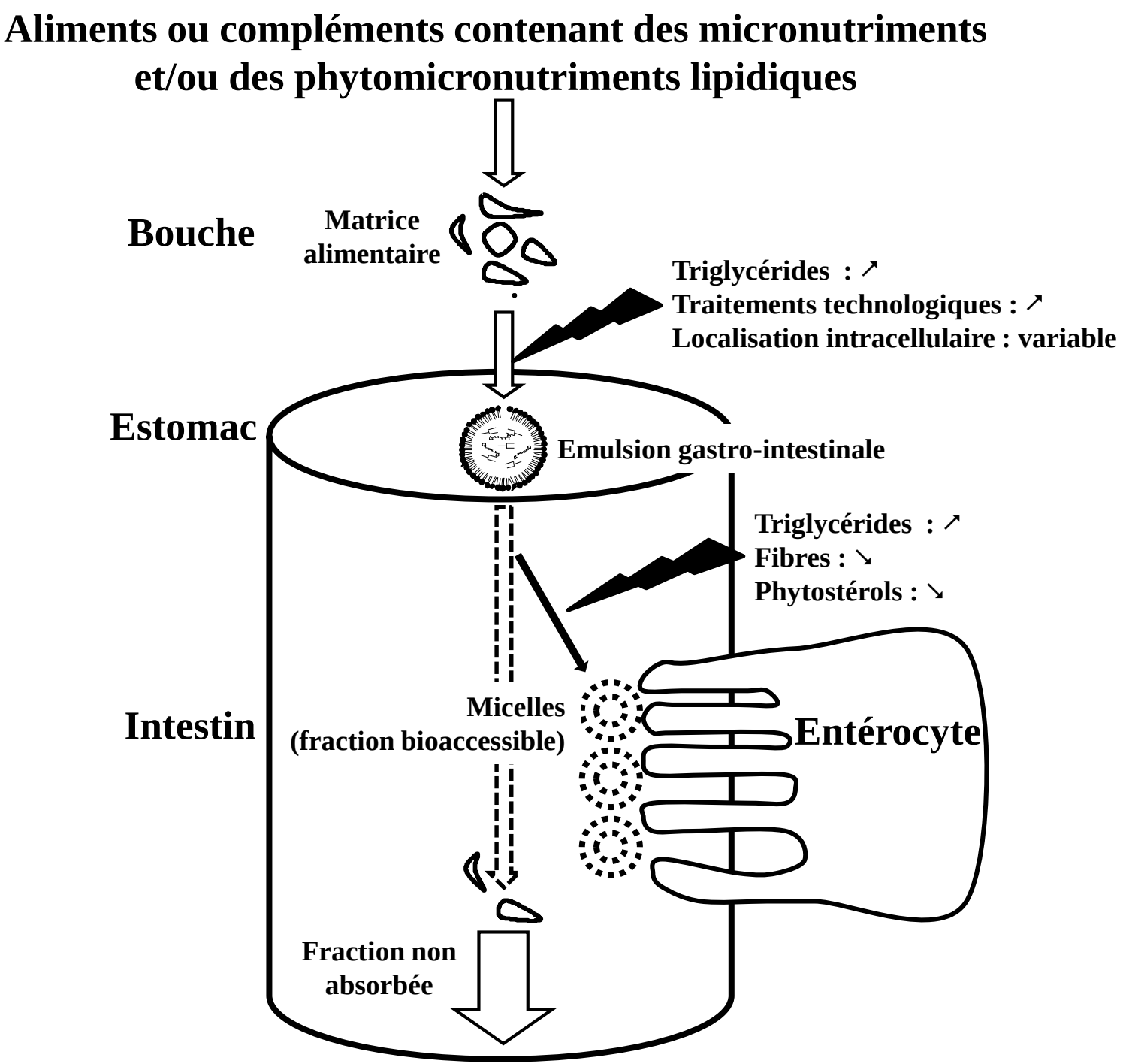
[a]RAE : équivalent d'activité du rétinol

[b]RNP : référence nutritionnelle pour la population (population adulte).

[c]AS : apports suffisants.

[d]Ces trois caroténoïdes sont des caroténoïdes provitaminique A. Ils ne possèdent pas de références nutritionnelles spécifiques. Seule une RNP pour la vitamine A en RAE existe, comme discuté dans la partie « Effet matrice et recommandations nutritionnelles ».

[e]Les consommation estimée de caroténoïdes ont été calculée en analysant les données de 30 études portant chez l'adulte dans des pays développés.


Aliments ou compléments contenant des micronutriments
et/ou des phytomicronutriments lipidiques
Bouche
Matrice
alimentaire
Triglycérides : ↗
Traitements technologiques : ↗
Localisation intracellulaire : variable
Estomac
Emulsion gastro-intestinale
Triglycérides : ↗
Fibres : ↘
Phytostérols : ↘
Intestin
Micelles
(fraction bioaccessible)
Entérocyte
Fraction non
absorbée