

Substituts à la viande : formulations et analyse comparée

Les substituts végétaux à la viande : éléments de formulation et analyse comparée des services rendus avec les produits animaux 2ème partie : les apports en micronutriments.

Mots-clés : viande végétale ; succédané de viande ; vitamines ; minéraux ; biodisponibilité ; anémie

Auteur : Philippe Cayot

Professeur de formulation des aliments et de chimie des aliments à AgroSup Dijon, 1 Esplanade Erasme, 21000 Dijon

Publié dans la revue scientifique « Viandes & Produits Carnés » (www.viandesetproduitscarnes.com)

Référence de l'article : VPC-2021-3736 (date de publication : 2021)

Eléments de contexte : Outre la qualité protéique, les analogues végétaux apportent un service nutritionnel généralement inférieur à leurs équivalents carnés en termes d'apports vitaminiques et de minéraux. Les produits carnés ne sont cependant pas de bons vecteurs pour tous les micronutriments. Il convient de manger varié.

Résumé : La qualité nutritionnelle d'un aliment ne s'évalue pas seulement à son apport en protéine et à la qualité des apports protéiques, mais également par ses apports en d'oligo-éléments. Les produits animaux sont les seules sources de vitamine B12, en dehors des compléments alimentaires pharmaceutiques. Les quantités d'autres vitamines B sont beaucoup plus importantes dans les produits carnés : de 4 à 6 fois supérieur pour la vitamine B1, 2 à 20 fois pour la vitamine B2, de 5 à 30 fois pour la vitamine B3, de 2 à 12 fois pour la vitamine B5, de 2 à 100 fois pour la vitamine B5, d'autant à 30 fois plus pour la vitamine B6. De manière moins marquée, la teneur en minéraux est aussi plus forte pour une viande cuite ou un produits carnés cuit comparé à un analogue végétal prêt à consommer : de 2 à 9 fois plus de zinc dans les produits carnés que dans les analogues et plats végétariens source de protéine, et jusqu'à 3 fois plus pour le fer. La quantité n'est pas le seul critère à prendre en compte. Fer et magnésium sont peu biodisponibles dans les produits végétaux. Ces minéraux sont en revanche bien assimilés lors de la consommation de produits carnés. L'efficacité d'absorption du fer lors de la consommation de produits carnés est en partie lié à la forme de l'ion (fer ferrique ou ferreux, ou encore fer héminique c'est à dire associé à l'hémoglobine ou la myoglobine) et à l'absence de complexe comme les phénols et le phytate présent dans les végétaux.

Abstract: Meat substitutes: formulations and comparative analysis: micronutrient intakes

The nutritional quality of a food is not only assessed by its protein intake and the quality of protein intake, but also by its intake of trace elements. Animal products are the only sources of vitamin B12, apart from pharmaceutical food supplements. The amounts of other B vitamins are much greater in meat products: 4 to 6 times higher for vitamin B1, 2 to 20 times for vitamin B2, 5 to 30 times for vitamin B3, 2 to

12 times for vitamin B5, 2 to 100 times for vitamin B5, as much as 30 times for vitamin B6. Less markedly, the mineral content is also higher for cooked meat or cooked meat products compared to a ready-to-eat vegetable analogue: from 2 to 9 times more zinc in meat products than in analogues and vegetarian dish sources of protein, and up to 3 times more for iron. The quantity is not the only criterion to consider. The bioavailability of Iron and magnesium is lower in plant products. These minerals, however, are well assimilated during the consumption of meat products. The efficiency of iron absorption during the consumption of meat products is partly linked to the form of the ion (ferric or ferrous iron, or heme iron, i.e. associated with hemoglobin or myoglobin) and the absence of complexes such as phenols and phytate present in plants.

I. APPORT EN FER ET VITAMINE B12 : GESTION DE L'ANEMIE

Les problématiques majeures de nutrition dans le monde sont les apports insatisfaisants en protéine et l'anémie. Une gestion adaptée des apports de fer et de vitamine B12 par

l'alimentation constitue un des moyens d'éviter des anémies, même si toutes les formes d'anémie ne sont pas liées à des carences alimentaires.

I.1. Apport en fer et biodisponibilité ; l'anémie ferriprive

Le fer est le constituant essentiel de l'hémoglobine, une protéine qui permet le transfert d'oxygène des poumons vers les tissus via les globules rouges (érythrocytes) qui contiennent l'hémoglobine. Parce que nous perdons régulièrement du fer (pertes sanguines gastro-intestinales, pertes urinaires, desquamation, auxquelles s'ajoutent les pertes menstruelles chez les femmes), notre alimentation doit apporter régulièrement du fer. Les déficits en fer qui sont à l'origine de la moitié des cas d'anémie, constituent avec la malnutrition protéique l'un des troubles nutritionnels majeurs dans le monde : on estime à deux milliards dans le monde les personnes concernées par un déficit en fer (Camaschella 2015). La référence nutritionnelle pour 97,5% de la population, RNP, (apport en fer sont 16 mg/j pour satisfaire les besoins) est de 11 mg/j en moyenne (ANSES 2016), et plus précisément de 16 mg/j pour les femmes en âge de procréer et de 8 mg/j pour un homme adulte (Herberg *et al.* 2001). L'OMS donne même des apports recommander en fer allant de 19,6 à 58,8 mg/j de fer alimentaire, selon la biodisponibilité du fer (ANSES 2016).

La teneur en fer des viandes animales est bien supérieure à celle des analogues anciens et nouveaux de produits carnés. Quand bien même trouve-t-on sur l'emballage de la "Galette végétale Le Bistrot" la mention : "ce produit est riche en protéines végétales (oui !), source de fibres alimentaires (oui), pauvre en graisses saturées (oui) et source de fer", il convient pour le dernier point de modérer cette annonce. Dans la liste des ingrédients (farine protéique de **soja** réhydratée 36,5%, eau, protéine de blé 10%, huile de tournesol, farine de blé 4%, vinaigre d'alcool, farine de **pois chiche**, jus concentré de pomme, persil 1,5%, oignon en poudre, arômes naturels végétaliens, oignon rissolé, fibres de soja, sel, gélifiant (méthylcellulose), poivre vert en saumure 0,4%, cumin, extrait d'oignon, paprika, extrait de malt d'orge, thym), les sources de fer sont le soja et le pois chiche, modérément riches en fer (voir figure 1). Toutefois, légalement, les fabricants d'analogues végétaux de produits carnés peuvent malgré tout énoncer cette allégation « source de fer ». En effet, les règles d'usage des allégations nutritionnelles sont les suivantes (Parlement européen et du conseil, 2006) :

– L'allégation nutritionnelle "source de [vitamine] ou [minéraux]", selon la Directive 90/496/CEE, est autorisée quand la quantité de vitamines ou minéraux pour 100 g d'aliment est supérieure à 15 % aux apports journaliers recommandés

– L'allégation nutritionnelle "riche en [vitamine] ou [minéraux]" est autorisée quand le produit contient au moins deux fois la teneur requise pour l'allégation « source de [vitamine] ou [minéraux] », soit plus de 30 % aux apports journaliers recommandés (Légifrance 1990).

En calculant un apport de 15% des AJR pour un homme (8 mg de fer par jour), il faut 1,2 mg de fer pour 100 g d'aliment pour avoir la possibilité d'afficher l'allégation source de fer, ce qui est le cas de l'analogue de viande au soja par exemple. La viande bœuf peut sans contexte user de l'allégation "riche en fer".

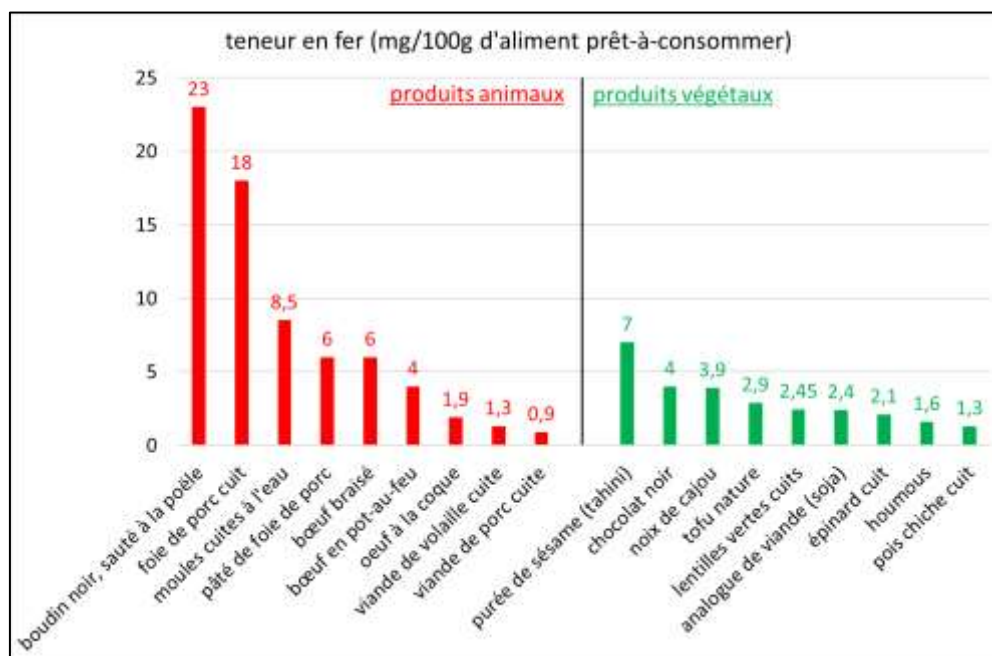


Figure 1 : Teneur en fer des différents aliments, animaux (en rouge) et végétaux (en vert), d'après les données combinées des banques de données « Ciqual » et « Food Data Central » (ANSES 2020; USDA 2020)

Il faut encore préciser que le fer héminique (fer apporté par la myoglobine des viandes ou l'hémoglobine du boudin noir) est absorbé bien plus efficacement (10% du fer absorbé en moyenne) que le fer non-héminique ou fer ionique que l'on trouve dans les végétaux (2,5% du fer absorbé en moyenne) (Hunt 2003). Cependant, à titre d'exemple, en travaillant sur la formulation du houmous, nous avons réussi dans notre laboratoire à accroître la biodisponibilité du fer sur un modèle admis comme permettant de refléter la proportion de fer assimilable pour un homme (Doumani 2020). Voici ce que le modèle, basé sur la synthèse de ferritine (protéine de réserve de fer des organismes mammifères) par des cellules type Caco-2-cell, donne (Figure 2).

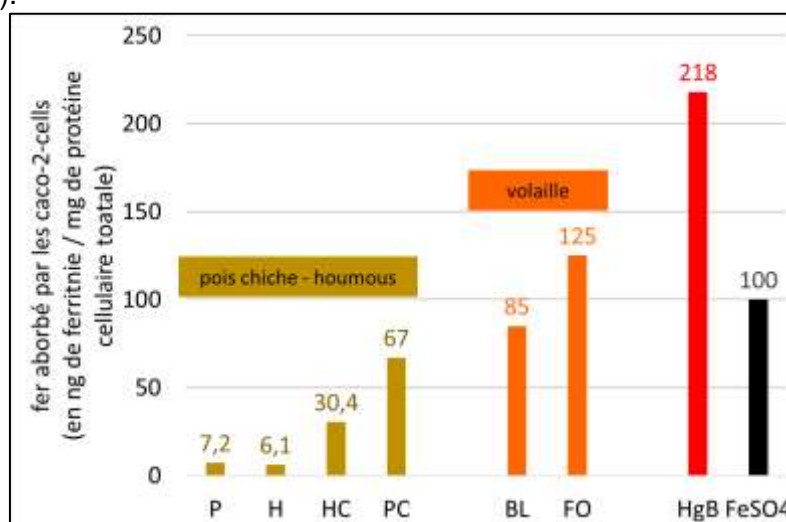


Figure 2 : Quantité de fer absorbée par des Caco-2-cells¹ en culture de cellule sur boîte de Pétri en fonction du type d'aliment fourni comme substrat de croissance aux cellules: purée de pois chiche (P), houmous (H) modèle (purée de pois chiche et tahini, purée de sésame), houmous additionné de jus de citron (HC), purée de pois chiche additionnée de jus de citron (PC) (ensemble de données de Doumani *et al.*, 2020), comparée aux données sur produits animaux, le blanc de volaille (BL) foie de volaille (FO)

¹ Les Caco-2-cells sont communément admis comme le modèle in vitro d'absorption du fer qui reflète le mieux la biodisponibilité du fer pour un humain dans un aliment. L'aliment subit une hydrolyse enzymatique qui mime la digestion chez l'homme : il est hydrolysé par un cocktail d'enzymes gastriques puis pancréatiques, avant d'être mis en contact avec la culture de cellule, via un membrane d'ultrafiltration au seuil de coupure de 15 kDa (voir par ex. la description de la méthode par (Thompson *et al.* 2010)).

(Pachón et al. 2008) et à des composés purs de référence, l'hémoglobine de bœuf purifiée (HgB) et du sulfate de fer, FeSO₄ (noté FeSO₄) (Proulx, Reddy 2006).

On sait depuis longtemps que le fer apporté par l'hème (fer héminique provenant de l'hémoglobine du sang ou de la myoglobine du muscle) est plus « assimilable » que le fer ionique (comme le fer apporté par le sulfate de fer). Le fer non-héminique (fer ionique) est en outre complexé par les acides phytiques de végétaux. L'ajout de jus de citron permet de « libérer » du fer complexé par les phytates et expliquerait le gain de biodisponibilité (Doumani et al. 2020). La qualité sensorielle de l'houmous acidifié n'a cependant pas été évaluée...

1.2. Les apports en vitamine B12 ; l'anémie "pernicieuse"

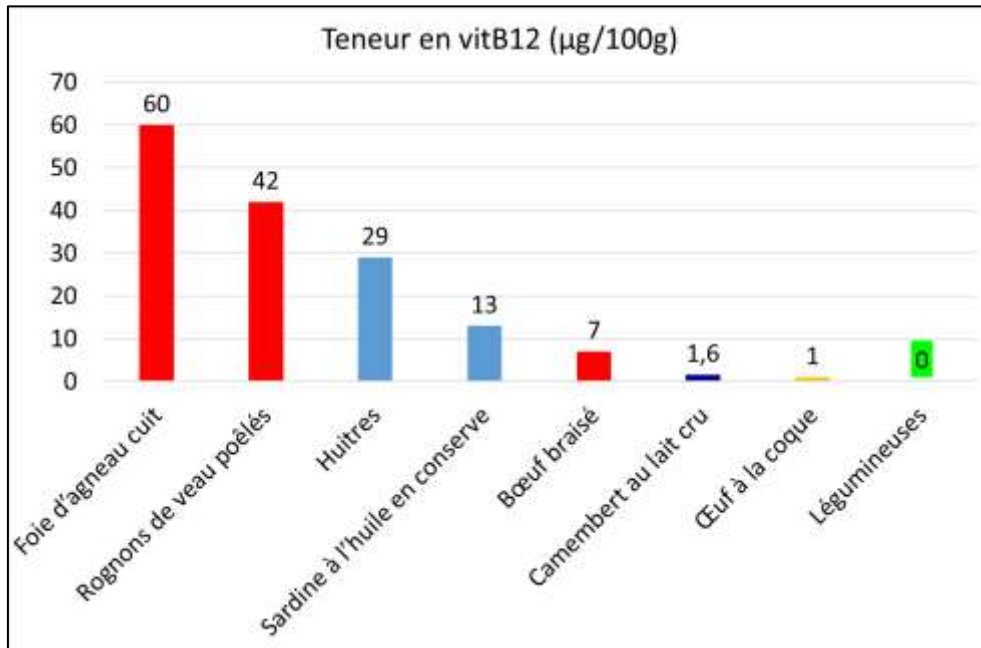


Figure 3 : Teneur en vitamine B12 parmi les aliments les plus riches. Données arrondies de l' ANSES (Ciqual ; Table de composition nutritionnelle des aliments), d'après la banque de données Ciqual ou Food Data Central (ANSES, 2020)

La vitamine B12 peut cependant être synthétisée par un nombre limité de micro-algues comme les cyanobactéries (Watanabe et al. 2013). Il convient cependant d'être très prudent. La spiruline, par exemple, ne contient en réalité pas de vitamine B12, contrairement à ce qui se dit souvent dans la communauté vegan, mais très majoritairement de la pseudo-vitamine B12 non-bioactive (Edelmann et al. 2019). Les poudres de chlorelles contiendraient en revanche de la vitamine B12 (2,1 µg/g de poudre).

Il convient cependant de modérer la position de l'ANSES. En effet, la vitamine B12 étant produite par les bactéries, on pourrait s'attendre à trouver des produits végétaux fermentés jouant les succédanés de viande avec une teneur non négligeable en vitamine B12. Ainsi, le tempeh de lupin contient environ 1 µg/100g de vitamine B12 (Wolkers – Rooijackers et al. 2018). Les soyourts (analogue de yaourt à base de soja) contiennent un peu de vitamine B12 (0,3 à 0,5 µg/100g) quand les ferments contiennent *Propionibacterium freudenreichii* and *Lactobacillus reuteri* (Zhu et al. 2015) et pourrait même contenir jusqu'à 18 µg/100g de vitamine B12 si lors de la fermentation du jus de soja on utilisait les ferments contenant *Lactobacillus reuteri* (Gu et al. 2015). Pour l'instant, ces analogues de produits animaux sont des prototypes de laboratoire et n'existent pas sur le marché. La supplémentation pharmaceutique semble être efficace pour éviter aux végétaliens la carence en vitamine B12 (Schüpbach et al. 2017).

II. LES OLIGO-ELEMENTS MINERAUX

Le zinc joue un rôle biologique très varié en permettant l'activité de 300 enzymes (rôle coenzyme ou élément de structuration du catalyseur protéique). Le zinc permet notamment la structuration de protéines hormonales. Les besoins nutritionnels de référence pour une population type (de 58 à 68 kg pour une femme et de 68 à 79 kg pour un homme, avec un IMC de 22 sont entre 9 et 14 mg de zinc par jour, selon les apports en phytate (0,3 à 0,9 g par jour de phytate), le phytate diminuant l'efficacité d'absorption (ANSES 2016).

Les produits animaux contiennent plus de zinc que les analogues végétaux de produits carnés et les plats à base principalement des légumineuses (Figure 4). Les produits carnés sont « sources de zinc » et le foie de veau et la viande en pot-au-feu par ex. sont « riches en zinc » selon la législation en vigueur. Dans un régime omnivore classique, la quantité consommée de végétaux reste plus importante que celle des produits animaux. Il semble logique de considérer que le zinc consommé provient à part égal des produits animaux et végétaux.

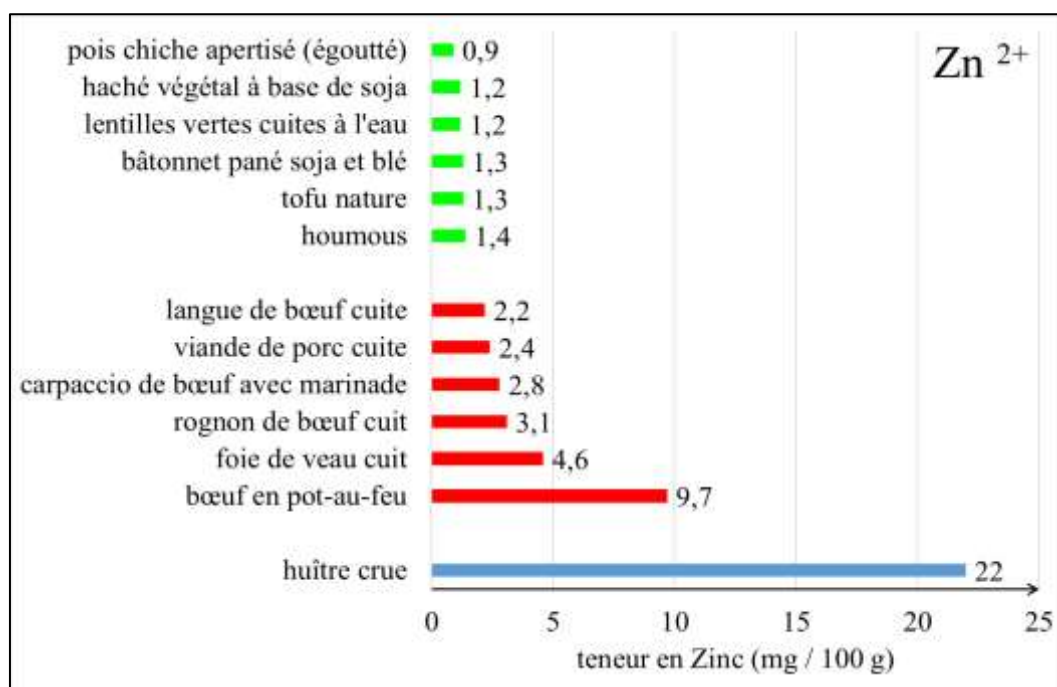


Figure 4 : Teneur en zinc de quelques produits animaux, d'analogues végétaux de produits carnés et de légumineuses, d'après des données issues de deux sources gouvernementales (ANSES 2020; USDA 2020)

Si les analogues de viande et autres mets principalement constitués de légumineuses (houmous par ex., plat de lentilles) contiennent bien du zinc et peuvent représenter un apport de zinc équivalent à celui des produits carnés (généralement, la portion d'houmous est de masse plus importante que celle de viande), le zinc est cependant moins assimilable dans une légumineuse (Hunt 2003), de la même manière que cela vous a été présenté précédemment pour le fer. Comme le montre la Figure 5, le zinc et le fer contenus dans les produits végétaux sont moins biodisponibles que ceux présents dans les produits animaux.

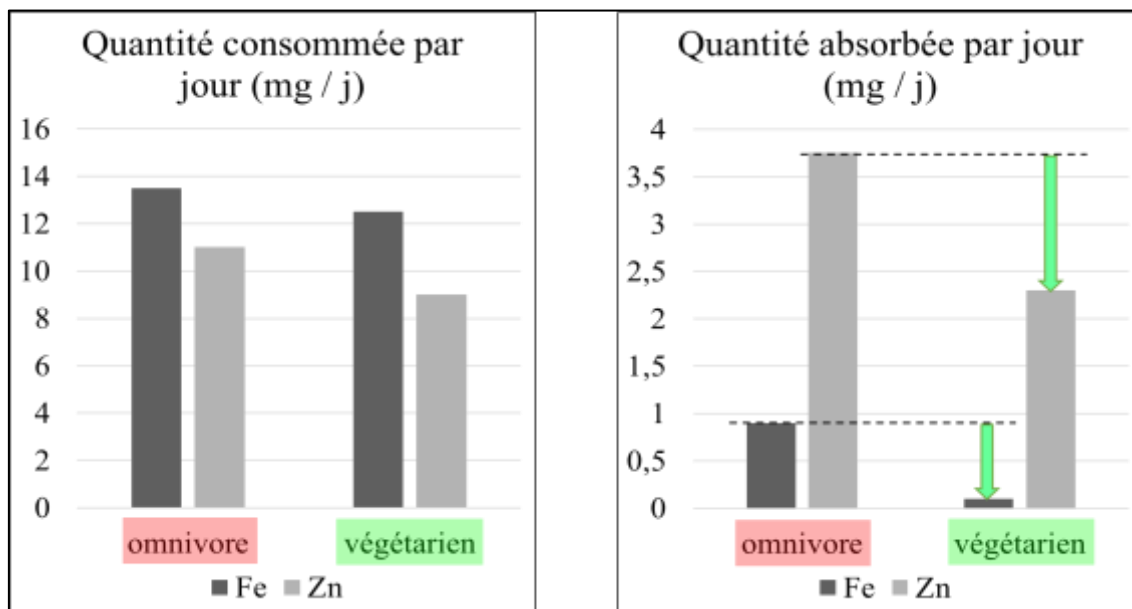


Figure 5 : différence entre la quantité de fer et de zinc consommé et celle effectivement absorbée par le corps, selon les régimes alimentaires, omnivores ou végétariens (Hunt 2003)

Cette moins bonne biodisponibilité est liée à la présence de phytate qui complexe fortement les ions bivalents et limite leur disponibilité pour le corps (figure 6). Le phytate possède une forte capacité de complexation grâce à ces 6 fonctions phosphates par molécules de phytate (70% du phosphate contenu dans les céréales provient de l'acide phytique). Malgré la supplémentation pharmaceutique consommée quotidiennement pour compenser les risques de déficit, sous forme souvent d'un comprimé ou d'une tablette effervescente de poly-vitaminés et poly-minéraux, les végétaliens (végétariens stricts) sont pour moitié carencés en zinc selon une enquête nutritionnelle suisse (Schüpbach *et al.* 2017).

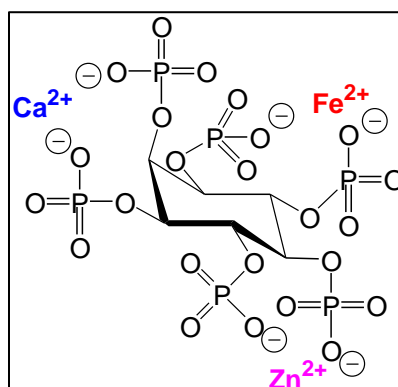


Figure 6 : Phytate responsable de la complexation des ions bivalents, Fe²⁺, Zn²⁺ et Mg²⁺.

La carence en zinc peut conduire à des déficiences cardiaques (Rosenblum *et al.* 2020). La carence en zinc chez l'enfant ou l'adolescent s'accompagne souvent d'un déficit protéique en raison d'un régime alimentaire végétariens stricts (Poskitt 1988). Les adolescentes indiennes lacto-végétariennes en raison de leur régime alimentaire exempt de produits carnés sont elles aussi carencées en zinc (Tupe, Chiplonkar 2010). Outre les carences en fer et vitamine B12, les athlètes végétariens sont aussi carencés en zinc, et plus particulièrement les athlètes femmes (Zhou *et al.* 2019). A nouveau, l'exemple du zinc montre que l'exclusion totale de viande fait peser un risque pour la santé.

II.2. Le magnésium

Le magnésium intervient dans de nombreuses voies métaboliques, dont la production d'énergie (synthèse d'ATP). Les apports satisfaisants en magnésium sont d'un minimum de 420 mg par jour

(ANSES 2016). Les produits carnés apportent certes du magnésium (par exemple 28 mg/100 g de porc cuit ou 29 mg/100 g pour un steak de bœuf grillé) mais leurs apports sont de 2 à 10 fois plus faibles que ceux des produits consommés par les végétariens : les noix de cajou grillées non salées apportent en moyenne 280 mg de magnésium (Mg^{2+}) par 100 g de noix, le tofu 100, le houmous 71 et un haché végétal à base de soja 66 mg/100 g. Nous rappelons l'importance d'une alimentation très variée. La consommation de fruits à coques de temps à autre permet un apport conséquent de magnésium : noix du Brésil (367 mg/100g), amande (270 mg/100g), noisette (160 mg/100g)... selon les données Ciqual (ANSES 2020).

L'hypo-magnésémie concernerait de 2,5 à 15% de la population mondiale. Le déficit en magnésium est très fréquemment observé dans les pays industrialisés. La moitié des adultes aux USA n'a pas des apports suffisants en magnésium. En France, ce sont 72% des femmes de 15 à 92 ans et 83% des hommes de 10 à 90 ans qui ont des apports insuffisants en magnésium (Touvier *et al.* 2006). Les déficits sévères en magnésium affectent la densité osseuse (Belluci *et al.* 2020)

II.3. Le cuivre

Le cuivre permet les activités d'oxydo-réduction de métallo-enzymes des voies respiratoires notamment. La référence nutritionnelle pour la population concernant le cuivre est de 1,3 mg par jour (ANSES 2016). Les viandes de bœuf, de volaille, ou de porc apportent environ deux fois moins de cuivre que les analogues de viande végétaux et les légumineuses pour une même quantité d'aliment. En revanche, les abats contiennent plus de cuivre (Cu^{2+}) que les plats choisis par les végétariens : quand le houmous, les lentilles vertes cuites à l'eau, ou le tofu apportent respectivement 0,4, 0,25 et 0,24 mg de cuivre par 100 g, les rognons de bœuf contiennent du cuivre à raison de 0,6 mg/100 g et le foie de veau en moyenne 20 mg/100 g (Figure 7).

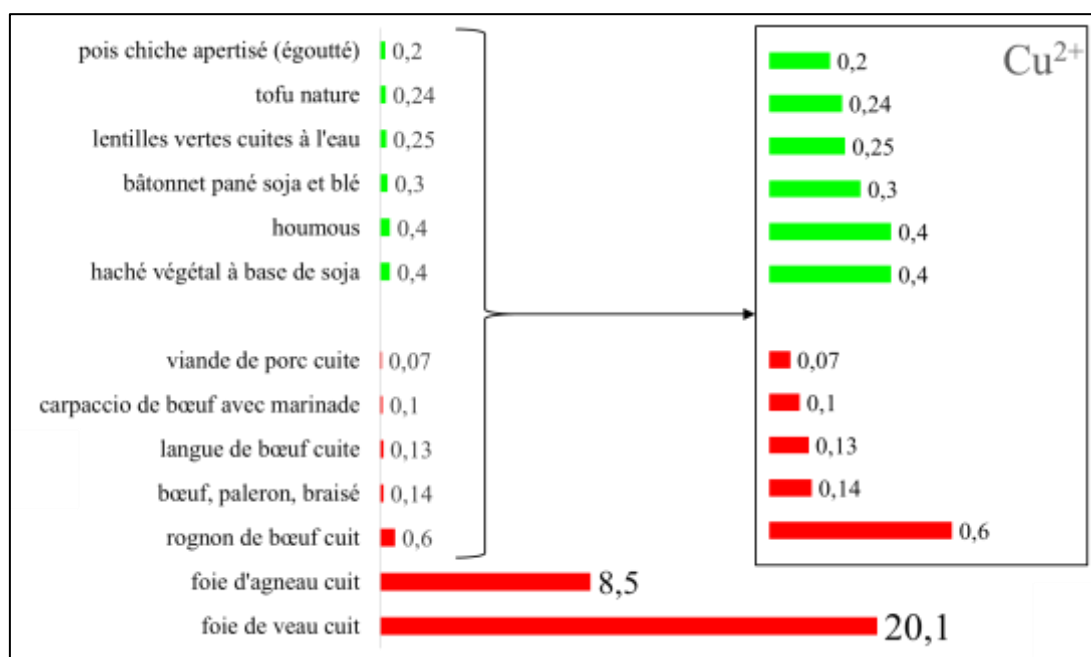


Figure 7 : teneur en cuivre de quelques produits carnés et d'analogues végétaux de produits carnés (en mg par 100 g de produits prêt à consommer), d'après la banque de données Ciqual (ANSES, 2020)

Les carences en cuivre sont rares et sont la conséquences d'opérations chirurgicales gastro-intestinales (Prodan *et al.* 2009), ou de suppléments excessives en zinc (Cathcart, Sofronescu 2017).

II.4. Le sélénium

Le sélénium se trouve dans la même colonne que le soufre dans le tableau périodique des éléments de Mendeleïev et joue de fait un rôle biochimique proche que du soufre. Le sélénium constitue ainsi par ex. la glutathion peroxydases et joue un rôle dans la régulation du stress oxydatif, en facilitant la capture des radicaux par dimérisation du glutathion. La référence nutritionnelle pour la population concernant le sélénium est de 1 µg par kilo corporelle et par jour, soit un apport satisfaisant journalier estimé à 70 µg/jour (ANSES 2016). Le sélénium participe dans le corps à la lutte contre le stress oxydatif en particulier. Le sélénium est apporté dans l'alimentation par les produits carnés : 100 g de foie de volaille suffisent à eux seuls à satisfaire les besoins en sélénium. Légumineuses et analogues de viandes végétaux en sont dépourvus ou contiennent des quantités très faibles (Figure 8).

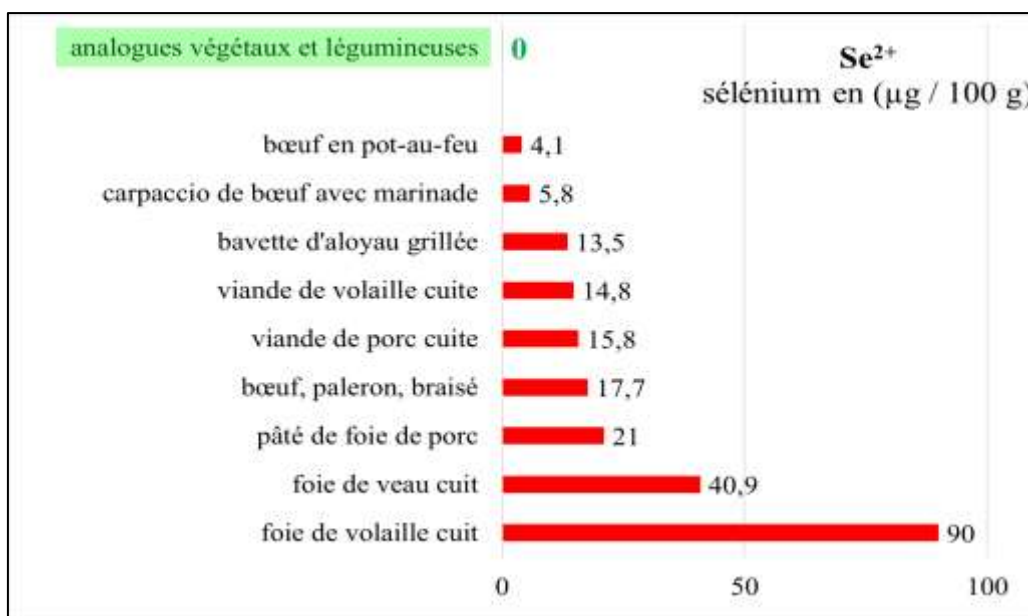


Figure 8 : teneur comparée en sélénium de produits carnés et des produits végétaux, selon les données de tables de composition des aliments (ANSES 2020; USDA 2020)

Un déficit en sélénium conduit à des arythmie cardiaque, des myopathies cardiaques et une sensibilité accrue aux infections (Akahoshi *et al.* 2019). Certains régions du monde possèdent des populations carencées en sélénium pour des raisons agricoles, le sol étant pauvre en sélénium ou les conditions physicochimiques et climatiques ne favorisant pas l'absorption du sélénium par les plantes nourricières (Yang *et al.* 2021).

II.5. L'iode

La fonction principale de l'iode réside dans la synthèse d'hormones thyroïdiennes, certaines hormones contenant jusqu'à 4 atomes d'iode par molécule. Les apports satisfaisants en iode ont été estimés à 150 µg par jour (ANSES 2016). Les algues et fruits de mer sont très riches en iode : 100 g de moules cuites à l'eau contiennent en moyenne 106 µg d'iode. L'œuf est aussi une bonne source d'iode (50 µg/100 g, soit environ 1/4 des apports recommandés pour un œuf). La viande et les abats contiennent de l'iode mais ne peuvent constituer une source principale d'apport en iode : le foie de veau contient 5 µg d'iode par 100 g, la viande de porc cuite ou le steak grillé 6, les rognons cuits 10. Notons que le pâté de foie contient 30 µg d'iode par 100 g. La charcuterie est parfois assez riche en iode : la rosette (36 µg/100g d'iode) ou le boudin noir poêlé (36 µg/100g d'iode) sont source d'iode, la viande des grisons peut même prétendre à l'allégation « riche en iode » (53,8 µg/100g d'iode). Seuls certains produits de la mer peuvent être considérés comme très « riches en iode » : la langoustine cuite (394 µg/100g d'iode), la crevette grise cuite (260 µg/100g d'iode), le colin cuit (150 µg/100g d'iode...). Les fromages sont sources d'iode (au moins 15% des apports journaliers recommandés), le cheddar ou le Beaufort contenant environ 37 µg/100g d'iode. L'œuf à la coque peut être considéré aussi comme riche en iode (50 µg/100g d'iode). En revanche, les analogues végétaux de viandes et les légumineuses sont dépourvus d'iode.

Les carences en iode provoquent l'apparition de goitre, de l'hypothyroïdisme, de crétinisme, jusqu'à la dégradation cérébrale (ne disaient-on pas « crétin des Alpes » dans le passé). Les carences en iode s'observent généralement dans les populations rurales vivant loin de la mer et ne consommant pas de produit de la mer. Il existe des preuves archéologiques de populations déficitaires en iode dans les zones éloignées de la mer (Bauduer, Tankersley 2018). De nos jours, le déficit en iode reste un enjeu majeur mondiale : près de deux milliards d'humains sont déficitaires en iode (International Council for Control of Iodine Deficiency Disorders *et al.* 2007). En Inde 1,2 milliard de personnes des risques de troubles de santé liés à la carence en iode et 260 millions un très fort risque (Vasudevan *et al.* 2019). Les végétariens sont obligés d'absorber des compléments nutritionnels pour éviter la carence en iode (Fields, Borak 2009).

III. LES VITAMINES B

La vitamine B1 (ou thiamine) est impliquée, dans sa forme active (le pyrophosphate de thiamine, synthétisé dans le foie à partir de la vitamine B1 ingérée), dans le métabolisme des glucides notamment. L'apport satisfaisant indiqué par l'ANSES est de 1,5 mg/j. La viande de porc est particulièrement riche en vitamine B1 en comparaison de l'ensemble des produits carnés de bœuf (figure 9). Lentilles, houmous, analogues végétaux de viandes apportent une quantité de vitamine B1 comparables aux produits du bœuf. La carence en thiamine, appelée béri-béri, a été observée en Asie avec une population ne consommant plus de riz complet mais du riz poli et du riz glacé. Or, dans les céréales, la vitamine B1 se trouve au niveau du germe et du péricarpe. Le riz complet cuit contient 0,065 mg/100g de vitamine B1 quand le riz blanc cuit n'en contient que 0,03. Le germe de blé ne contient cependant que 1,3 mg/100g de thiamine, loin des teneurs de la viande de porc.

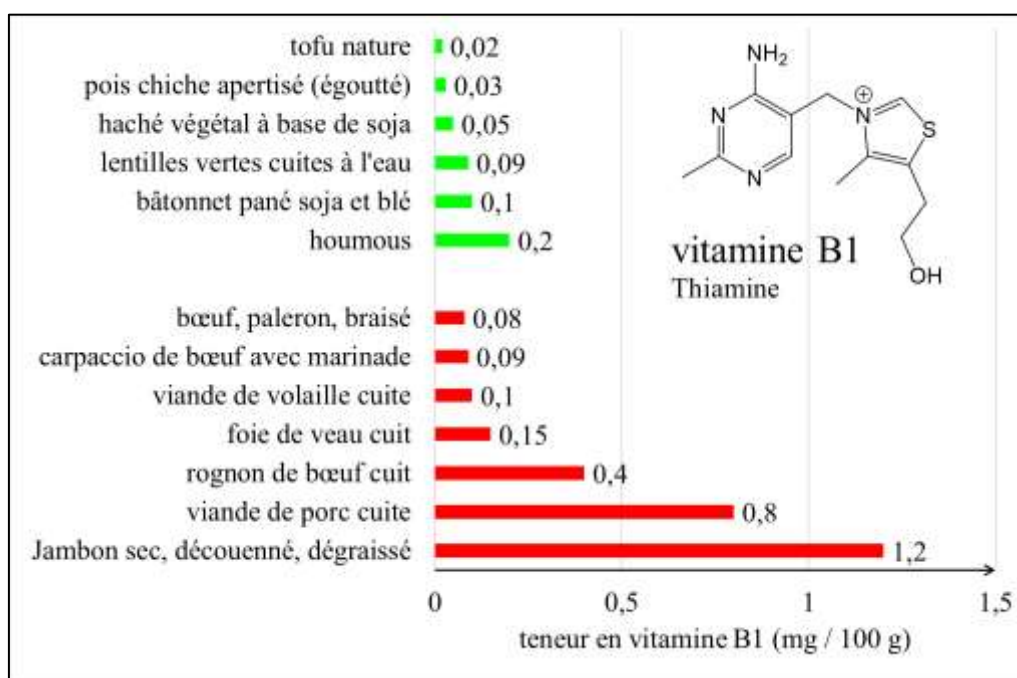


Figure 9 : teneur en thiamine (vitamine B1) de quelques aliments prêts à consommer, d'après les banques de données Ciqual et Food Data Central (ANSES 2020; USDA 2020)

La consommation d'alcool accroît les besoins en vitamine B1 et l'alcoolisme chronique peut conduire, dans de rares cas, à des risques d'absorption et de stockage anormal de thiamine et à un choc cardiogénique (shoshin béri-béri ou wet béri-béri) (Loma-Orsorio *et al.* 2011). Plus généralement, l'alcoolisme provoque des carences en thiamine qui conduisent à un accroissement du stress oxydatif et peuvent aller jusqu'à des processus neurodégénératifs (Manzardo 2016) comme le syndrome de Wernicke-Korsakoff (détérioration du système nerveux central) (Grodin *et al.* 2013; Di Marco *et al.* 2018). Les traitements de désintoxication sont accompagnés d'un apport de thiamine. Il serait aussi possible de considérer la piste nutritionnelle en termes de soins. En dehors de l'alcoolisme, la carence en thiamine est rare en Europe occidentale où l'alimentation reste diversifiée, sauf dans quelques cas de régime

alimentaire extrême avec des manifestations cardiovasculaires (révélation aigüe de la carence) (Ben Ghorbel *et al.* 2000).

III.2. La vitamine B2

La vitamine B2, ou riboflavine, joue un rôle dans la chaîne respiratoire des cellules et dans le catabolisme des acides gras. Les abats sont très riches en riboflavines mais la viande dans un moindre degré est une source de vitamine B2 (figure 10). Les besoins en vitamine B2 sont défini par l'apport recommandé de 1,8 mg/j (ANSES 2016).

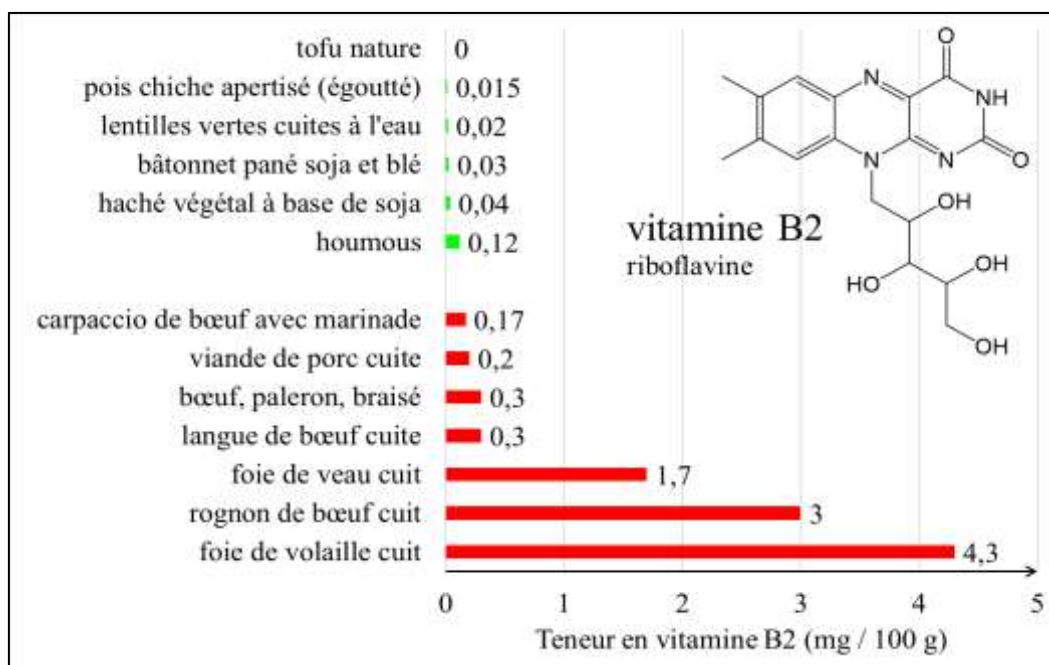


Figure 10 : teneur en vitamine B2 de quelques produits carnés, , d'après la banque de données Ciqual (ANSES, 2020)

Pour les végétariens, seul le houmous constitue une source non négligeable de vitamine B2 (0,12 mg/100g). Pour les lacto-végétariens, le fromage constitue une bonne source de vitamine B2 : les pâtes pressées (type emmental, comté) contiennent en moyenne 0,43 mg / 100 g de thiamine. Pour les ovo-végétariens, l'œuf constitue une bonne source de vitamine B2 (0,41 mg / 100 g d'œuf cuit à la coque). Il faut cependant consommer 8 part habituelles de gruyère ou l'équivalent de 4 œufs pour satisfaire ses besoins en thiamine, en dehors bien sûr de tout autre apports.

La carence dite primaire en riboflavine (due à alimentation pauvre en vitamine B2³) est rare et correspond en général à une carence vitaminique générale, conséquence de choix nutritionnel extrême.

III.3. La vitamine B3

La vitamine B3 ou PP (pour pellagra preventive) ou niacine intervient notamment dans la dégradation du glucose. La référence nutritionnelle pour 97,5 % de la population (RNP) est de 17,4 mg/j de niacine (ANSES 2016). En dehors du seitan, ce sont principalement des produits carnés qui pourront satisfaire des apports en niacine (figure 11), excepté si le régime végétarien est supplémenté par des compléments nutritionnels et pharmaceutique.

La carence en vitamine B3 est rare en Occident mais subsiste dans les zones rurales défavorisées en Afrique et en Amérique du Sud, en raison d'une alimentation très peu variée, essentiellement basée sur la consommation de maïs ou de millet (Baudin 2019). La carence en vitamine B3 entraîne la pellagre, une maladie associée notamment à des problèmes cutanés (Baudin 2014). En Europe, un tiers des végétariens souffriraient de déficit en vitamine B3 si nous extrapolons une enquête suisse aux européens

³ A distinguer de la carence secondaire en riboflavine liée à une pathologie intestinale

(Schüpbach *et al.* 2017), ce qui semble logique compte-tenu de la faible teneur en en vitamine B3 dans les analogues végétaux de viande ou en légumineuses.

III.4. La vitamine B4

La vitamine B5, ou acide pantothénique (du grec panthos, c'est-à-dire que l'on trouve partout), est une vitamine très répandue dans la nature. Hors le cas de dénutritions sévères (anorexie, grève de la faim, famine), la carence en B5 n'est pas décrite dans la littérature scientifique parce que rarissime (Baudin 2019). Notez toutefois que les produits carnés sont beaucoup plus riche en vitamine B5 que leur équivalent végétaux : 8,8 mg/100g pour du foie de volaille cuit, 1,4 pour de la viande volaille, 0,9 pour du paleron de bœuf braisé contre 0,4 pour un haché végétal à base de soja, 0,3 pour du houmous, 0,1 pour du tofu (données Ciqua, ANSES, 2020).

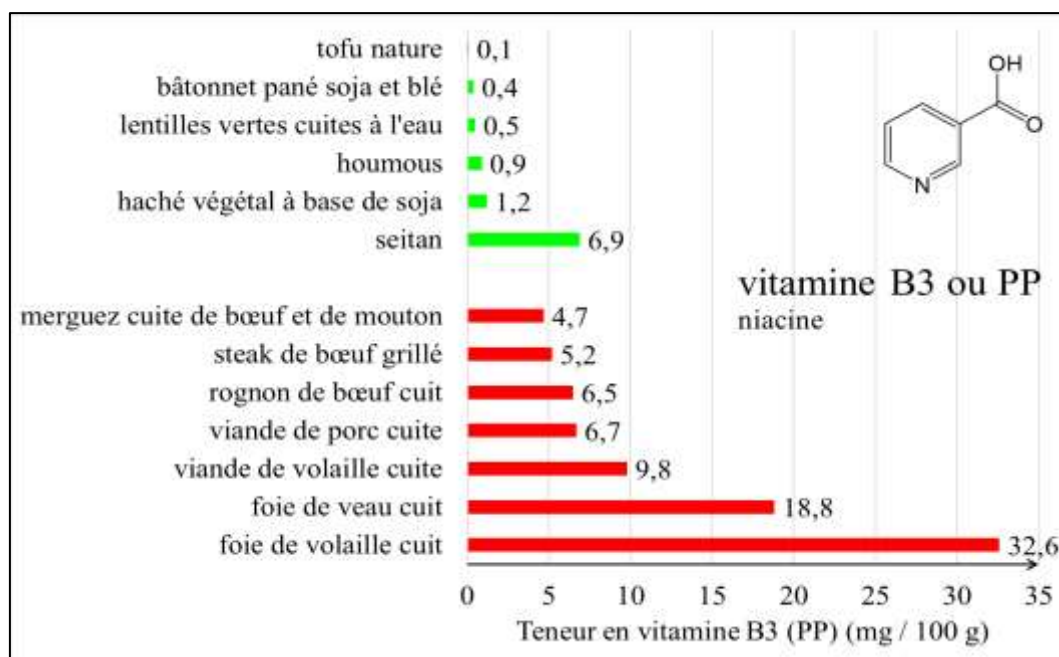


Figure 11 : teneur comparée en vitamine B3 de produits carnés et d'aliments adaptés aux végétarisme, d'après les banques de données Ciqua et Food Data Central (ANSES 2020; USDA 2020)

III.5. La vitamine B6

La vitamine B6 constitue en réalité un ensemble de six composés : pyridoxal, pyridoxine, pyridoxamine et leurs dérivés phosphatés. Dans les tissus animaux se trouvent le phosphate de pyridoxal et le phosphate de pyridoxamine. Les végétaux contiennent à l'inverse de la pyridoxine et du phosphate de pyridoxine (ANSES 2016). La vitamine B6 joue le rôle de coenzymes pour de nombreux enzymes qui catalysent les réactions de synthèse de neuromédiateurs comme la sérotonine ou la dopamine (Baudin 2019). Pour établir une référence nutritionnelle, l'AFSSA considère la concentration plasmatique sanguine de phosphate de pyridoxal. Il est ainsi possible de déterminer un apport satisfaisant en vitamine B6 de 1,8 mg/j (ANSES 2016). La grossesse et l'allaitement accroissent les besoins en B6 comme pour beaucoup d'autres nutriments. Comme le montre la figure 12, 100 g de produits carnés suffisent largement à satisfaire les besoins journaliers en vitamines B6. En dehors du pois chiche, il faut au moins 200 g d'analogue végétal de viande ou de légumineuses pour satisfaire les besoins.

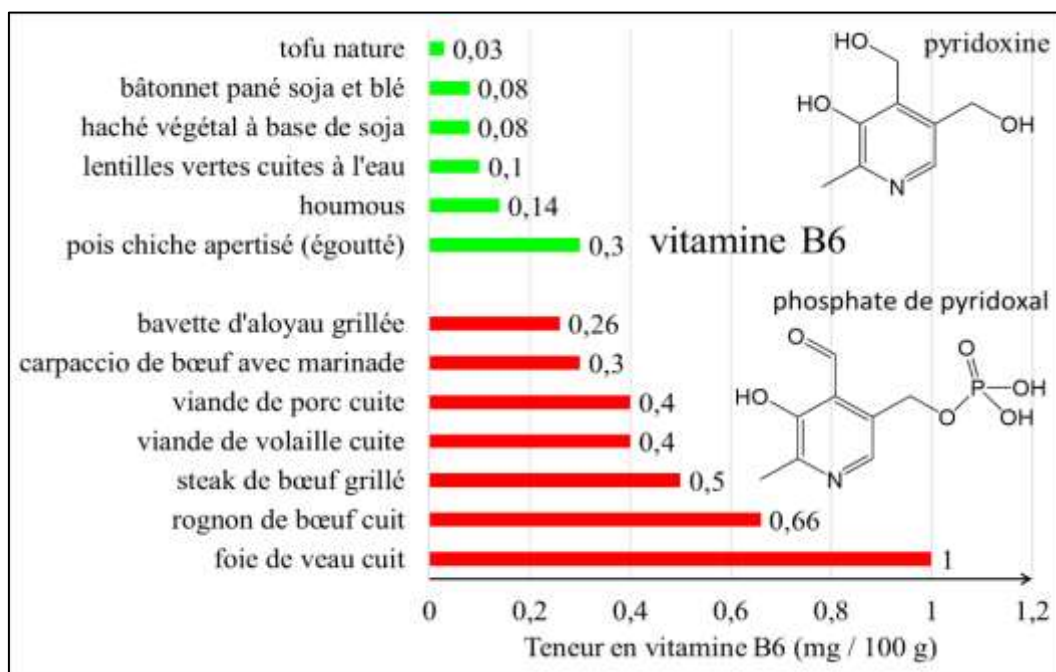


Figure 12 : teneur en vitamine B6 dans différents aliments, d'après les banques de données Ciqual et Food Data Central (ANSES 2020; USDA 2020)

Les carences en vitamine B6 dans une alimentation diversifiée sont exceptionnelles (Baudin 2019). En revanche, le déficit en vitamine B6 est assez fréquent chez les végétariens : 58% des végétariens suisses d'une enquête avait un déficient en B6 dans leur apport alimentaire (Schüpbach *et al.* 2017). Le déficit en vitamine B6 est surtout fréquent chez les alcooliques (Baudin 2019). Les carences en vitamine B6 conduisent à des séborrhée (production excessive de sébum par la peau), un dysfonctionnement des nerfs périphérique (polynévrite), voire des dépressions avec des accès maniaques, en particulier dans les cas d'alcoolisme (Baudin 2019). Les traitements correctifs médicamenteux associent la vitamine B6 aux vitamines B1 et B12, sous forme de compléments nutritionnels de vitamines du groupe B.

III.6. La vitamine B9

La vitamine B9, ou acide folique, joue un rôle dans la division cellulaire. Sa carence s'observe de fait très vite dans les cellules à division rapides comme les cellules sanguines. Une fois n'est pas coutume, ce ne sont pas les végétariens qui sont carencés en acide folique mais les omnivores, mangeurs de viande (58% d'une population testée en Suisse) (Schüpbach *et al.* 2017). Et effectivement, les viandes sont peu riches en vitamines B9, 5 à 10 fois moins que les légumineuses et analogues végétaux de viande (figure 13). Les abats sont en revanche une source très importantes d'acide folique.

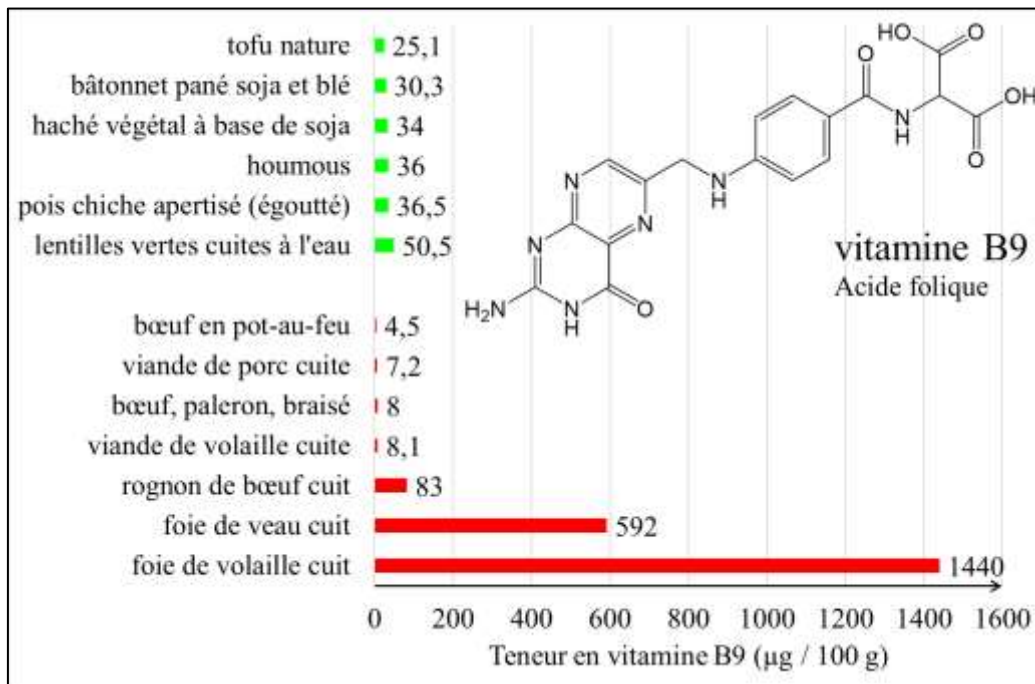


Figure 13 : teneur en vitamine B9 de différents aliments, selon les tables de composition d'aliment des banques de données Ciqal et Food Data Central (ANSES 2020; USDA 2020)

La référence nutritionnelle pour 97,5% de la population (RNP) est de 330 µg/100g (le BNM - besoin nutritionnel moyen - est de 250 µg/j), et de 400 µg/j pour les femmes en période périconceptionnelle (8 semaines avant et après la fécondation d'un ovule) (ANSES 2016).

IV. LES AUTRES VITAMINES

IV.1. Vitamine A

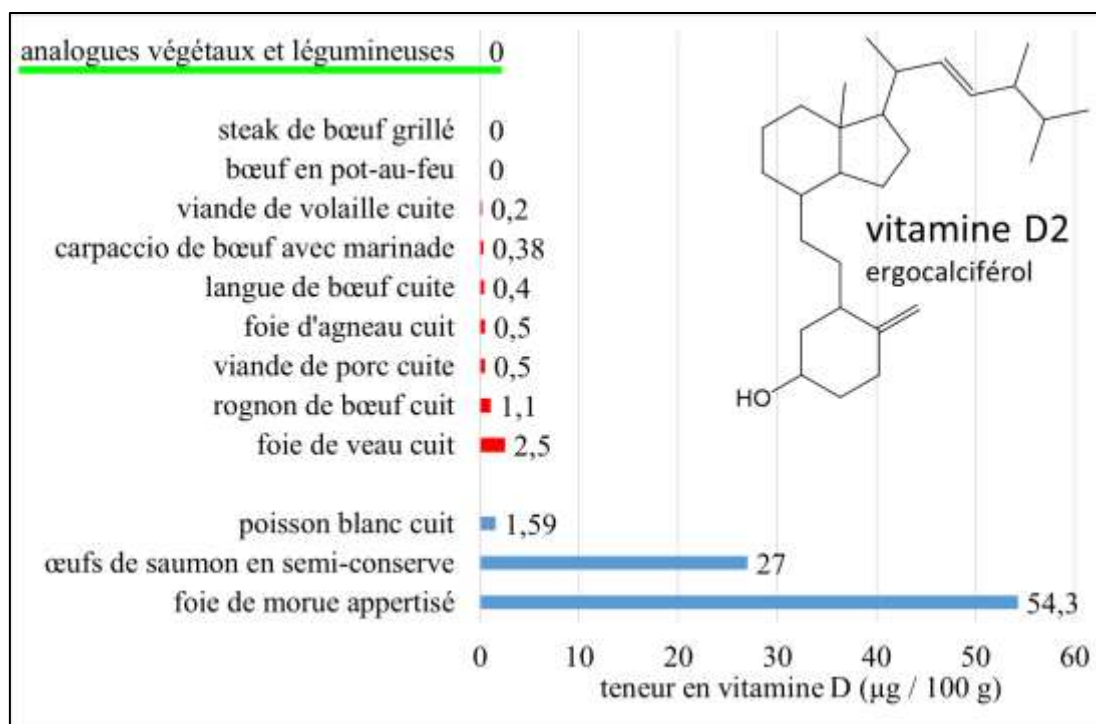
La vitamine A dans l'organisme humain est en réalité un ensemble de trois espèces proches structurellement, le rétinol, le rétinol (rétinol oxydé) et l'acide rétinoïque (produit d'oxydation du rétinol). La consommation de produits carnés apporte du rétinol. Les végétaux contiennent eux des caroténoïdes, et notamment le β-carotène qui est un précurseur du rétinol (le rétinol provient de l'hydrolyse du β-carotène consommé, hydrolyse catalysée par une oxygénase du corps). La carotte cuite contient en moyenne 8700 µg / 100 g de β-carotène, les épinards cuits 6700, le potiron 6000, mais le tofu nature préemballé n'en contient pas, et les nuggets de soja et de blé, les lentilles vertes cuites ou les pois chiches cuits très peu (en moyenne 23, 17 et 10 µg / 100 g respectivement). A l'inverse les foies sont une source importante de rétinol : les foies de volailles cuits contiennent 18700 µg / 100 g de rétinol, le foie de veau 105000 ! Enfin, si le beurre contient 700 µg / 100 g de rétinol, les camembert 470, les viandes constituent des apports très limités de rétinol : 7 à 15 µg de rétinol pour 100 g bouilli façon bourguignon, 3 pour un steak haché cuit (5% et 10 de MG) et le faux-filet grillé à la poêle ou le bœuf braisé n'en contiennent pas (données Ciqal ; ANSES, 2020).

IV.2. Vitamine D

Absente des végétaux, les analogues végétaux de viande et les légumineuses n'apportent pas de vitamine D. Les végétariens ont logiquement des apports marginaux de vitamine D dans leur alimentation (Schüpbach *et al.* 2017). L'été, la synthèse de vitamine D s'opère lors de l'exposition de la peau au soleil, grâce aux UV B du soleil (Elsori, Hammoud 2018), UV B responsable des coups de soleil ceci dit en passant.... Les carences en vitamine D sont l'une des carences fréquentes chez les végétariens strict (Elsori, Hammoud 2018) principalement en hiver (Lamberg-Allardt *et al.* 1993) tout comme pour les femmes végétariennes enceintes (Costa-Rodrigues *et al.* 2018) ou les seniors végétariens en toute

saison. La viande apporte très peu de vitamine D : 0,2 µg / 100g pour la viande de volaille cuite, 0,5 pour de la viande de porc cuite, tout comme les fromages (par ex., le camembert, 0,24 µg / 100 g). Les abats constituent un apport en vitamine D équivalent à celui d'un poisson blanc (1,6 µg / 100 g): 1,1 pour les rognons cuits et 2,5 pour le foie de veau cuit. Les fortes teneurs en vitamine D se trouvent dans les produits de la mer (figure 14), comme les œufs de poissons, par ex. les œufs de saumon en semi-conserves (27 µg / 100 g) et le foie de morue appertisé (54 µg / 100 g) (données Ciqual).

Figure 14 : teneur en vitamine D2 de différents aliments, selon les tables de composition d'aliment des banques de données Ciqual et Food Data Central (ANSES 2020; USDA 2020)



IV.3. Vitamine C

Haché végétal à base de soja, lentilles vertes cuites, tofu, pois chiche ... ne contiennent pas de vitamine C, pas plus que les viandes. Seuls les abats en contiennent. La teneur en vitamine C d'un foie de veau est de 13 mg / 100 g en moyenne, celle d'un pâté de foie de porc de 21 mg / 100 g, bien inférieure toutefois à certains fruits comme le kiwi (82 mg / 100 g) ou la purée de goyave fraîche (492 mg / 100 g en moyenne). Les fruits frais restent le seul apport crédible de vitamine C dans l'alimentation (données Ciqual).

CONCLUSION

En conclusion, **le service nutritionnel des produits animaux**, qui porte sur l'apport d'acides aminés essentiels, de fer biodisponible et de vitamine B12, **est très supérieur** à celui apporté par les analogues de viandes, anciens et nouveaux. Ceci étant dit, il convient de rappeler qu'il n'y a pas d'aliment idéal, miracle. Il convient de manger des aliments variés. Ainsi, le magnésium est apporté par une consommation de fruits à coques et la vitamine B9 par les végétaux, légumineuses (et analogues végétaux de viande). La viande et les produits carnés n'apportent pas non plus de vitamine C, vitamine pourvue par la consommation de fruits frais et de crudités. Enfin, seuls les poissons et leurs dérivés (foie, œufs) constituent une source efficace en vitamine D. Il reste cependant que la viande et les produits carnés sont des sources importantes de nombre de vitamines et minéraux. Cette excellente qualité nutritionnelle des produits animaux permet aussi de ne pas en abuser. Il s'agit de manger raisonnablement de la viande et de compléter avec d'autres aliments, fruits, légumes, légumineuses et céréales, qui apportent d'autres nutriments essentiels pour l'homme : vitamine C, antioxydants type polyphénols, fibres, minéraux...

Références bibliographiques

- Akahoshi N., Anan Y., Hashimoto Y., Tokoro N., Mizuno R., Hayashi S., Yamamoto S., Shimada K., Kamata S., Ishii I. (2019). Dietary selenium deficiency or selenomethionine excess drastically alters organ selenium contents without altering the expression of most selenoproteins in mice. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 69, 120–129.
- Allen L.H. (2010). Bioavailability of Vitamin B12. *International Journal for Vitamin and Nutrition Research*, 80(45), 330–335.
- ANSES (2016). Actualisation des repères du PNNS : élaboration des références nutritionnelles. December 2016.
- ANSES (2020). Table de composition nutritionnelle des aliments, Ciqual. [En ligne]. Disponible à l'adresse : <https://ciqual.anses.fr/#/aliments/7711/pain-au-lait-preemballe> [Consulté le 17 May 2021].
- Baudin B. (2019). Les vitamines du groupe B : structures et rôles dans le métabolisme, déficits nutritionnels. *Revue Francophone des Laboratoires*, 2019(514), 36–44.
- Baudin B. (2014). Malnutrition et sous-alimentation. *Revue Francophone des Laboratoires*, 2014(466), 25–37.
- Bauduer F., Tankersley K.B. (2018). Evidence of an ancient (2000 years ago) goiter attributed to iodine deficiency in North America. *Medical Hypotheses*, 118, 6–8.
- Belluci M.M., de Molon R.S., Rossa Jr C., Tetradis S., Giro G., Cerri P.S., Marcantonio Jr E., Orrico S.R.P. (2020). Severe magnesium deficiency compromises systemic bone mineral density and aggravates inflammatory bone resorption. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 77, 108301.
- Ben Ghorbel I., Veit V., Schleinitz N., Kaplanski G., Harlé J.R. (2000). Neuromyocardite aiguë du bérubéri par régime alimentaire exclusif. Une observation. *La Revue de Médecine Interne*, 21(11), 989–992.
- Camaschella C. (2015). Iron-Deficiency Anemia. Longo, D. L. (ed.). *New England Journal of Medicine*, 372(19), 1832–1843.
- Cathcart S.J., Sofronescu A.G. (2017). Clinically distinct presentations of copper deficiency myeloneuropathy and cytopenias in a patient using excessive zinc-containing denture adhesive. *Clinical Biochemistry*, 50(12), 733–736.
- Ciqual Table de composition nutritionnelle des aliments. [En ligne]. Disponible à l'adresse : <https://ciqual.anses.fr/> [Consulté le 23 March 2020].
- Costa-Rodrigues J., Sá-Azevedo R., Balinha J., Ferro G. (2018). Vegetarianism during pregnancy: risks and benefits. *Trends in Food Science & Technology*, 79, 28–34.
- Di Marco S., Pilati L., Brighina F., Fierro B., Cosentino G. (2018). Wernicke-Korsakoff syndrome complicated by subacute beriberi neuropathy in an alcoholic patient. *Clinical Neurology and Neurosurgery*, 164, 1–4.
- Doumani N. (2020). Hummus processing and formulation to improve the bioavailability of iron. assessment of iron bioavailability by an in vitro digestion coupled to iron dialysis and the Caco-2 cell model. Thèse de doctorat, Université de Bourgogne franche-Comté & Université du Liban, Dijon & Beyrouth.
- Doumani N., Severin I., Dahbi L., Bou-Maroun E., Tueni M., Sok N., Chagnon M.-C., Maalouly J., Cayot P. (2020). Lemon juice, sesame paste, and autoclaving influence iron bioavailability of hummus: assessment by an in vitro digestion/caco-2 cell model. *Foods*, 9(4), 474.
- Edelmann M., Aalto S., Chamlagain B., Kariluoto S., Piironen V. (2019). Riboflavin, niacin, folate and vitamin B12 in commercial microalgae powders. *Journal of Food Composition and Analysis*, 82, 103226.
- Elsori D.H., Hammoud M.S. (2018). Vitamin D deficiency in mothers, neonates and children. *The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology*, 175, 195–199.
- Fields C., Borak J. (2009). Chapter 54 - Iodine deficiency in vegetarian and vegan diets: evidence-based review of the world's literature on iodine content in vegetarian diets. *Comprehensive Handbook of Iodine*. Preedy, V. R., G. N. Burrow, and R. Watson (eds.) Academic Press, San Diego, 521–531.
- Gilting A.M.J., Crowe F.L., Lloyd-Wright Z., Sanders T. A. B., Appleby P.N., Allen N.E., Key T.J. (2010). Serum concentrations of vitamin B12 and folate in British male omnivores, vegetarians and vegans: results from a cross-sectional analysis of the EPIC-Oxford cohort study. *European Journal of Clinical Nutrition*, 64(9), 933–939.
- Grodin E.N., Lin H., Durkee C.A., Hommer D.W., Momenan R. (2013). Deficits in cortical, diencephalic and midbrain gray matter in alcoholism measured by VBM: Effects of co-morbid substance abuse. *NeuroImage: Clinical*, 2, 469–476.
- Gu Q., Zhang C., Song D., Li P., Zhu X. (2015). Enhancing vitamin B12 content in soy-yogurt by *Lactobacillus reuteri*. *International Journal of Food Microbiology*, 206, 56–59.
- Hazra A.B., Tran J.L.A., Crofts T.S., Taga M.E. (2013). Analysis of Substrate Specificity in CobT Homologs Reveals Widespread Preference for DMB, the Lower Axial Ligand of Vitamin B12. *Chemistry & Biology*, 20(10), 1275–1285.
- Hercberg S., Cailhol J., Franchisseur C., Maurel M. (2001). La déficience en fer et l'anémie ferriprive dans la population française. *Revue Française des Laboratoires*, 2001(334), 55–58.
- Hunt J.R. (2003). Bioavailability of iron, zinc, and other trace minerals from vegetarian diets. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 78(3), 633S-639S.
- International Council for Control of Iodine Deficiency Disorders, UNICEF, World Health Organization (2007). Assessment of iodine deficiency disorders and monitoring their elimination: a guide for programme managers. World Health Organization, Geneva.

Lamberg-Allardt C., Kärkkäinen M., Seppänen R., Biström H. (1993). Low serum 25-hydroxyvitamin D concentrations and secondary hyperparathyroidism in middle-aged white strict vegetarians. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 58(5), 684–689.

Légifrance (1990). Directive 90/496/CEE du Conseil, du 24 septembre 1990, relative à l'étiquetage nutritionnel des denrées alimentaires. JOCE L 276. [En ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000000520958/> [Consulté le 22 July 2021].

Loma-Osorio P., Peñafiel P., Doltra A., Sionis A., Bosch X. (2011). Shoshin beriberi mimicking a high-risk non-st-segment elevation acute coronary syndrome with cardiogenic shock: when the arteries are not guilty. *The Journal of Emergency Medicine*, 41(4), e73–e77.

Manzardo A.M. (2016). Chapter 7 - Thiamine deficiency and alcoholism psychopathology. *Molecular aspects of alcohol and nutrition*. Patel, V. B. (ed.) Academic Press, San Diego, 85–94.

Pachón H., Stoltzfus R.J., Glahn R.P. (2008). Chicken thigh, chicken liver, and iron-fortified wheat flour increase iron uptake in an in vitro digestion/Caco-2 cell model. *Nutrition Research (New York, N.Y.)*, 28(12), 851–858.

Poskitt E.M.E. (1988). Chapter 9 - Mineral deficiencies. *Practical Paediatric Nutrition*. Poskitt, E. M. E. (ed.) Butterworth-Heinemann, 114–129.

Prodan C.I., Bottomley S.S., Vincent A.S., Cowan L.D., Meerveld B.G.-V., Holland N.R., Lind S.E. (2009). Copper deficiency after gastric surgery: a reason for caution. *The American Journal of the Medical Sciences*, 337(4), 256–258.

Proulx A.K., Reddy M.B. (2006). Iron bioavailability of hemoglobin from soy root nodules using a caco-2 cell culture model. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(4), 1518–1522.

Rosenblum H., Wessler J.D., Gupta A., Maurer M.S., Bikdeli B. (2020). Zinc deficiency and heart failure: a systematic review of the current literature. *Journal of Cardiac Failure*, 26(2), 180–189.

Schüpbach R., Wegmüller R., Berguerand C., Bui M., Herter-Aeberli I. (2017). Micronutrient status and intake in omnivores, vegetarians and vegans in Switzerland. *European Journal of Nutrition*, 56(1), 283–293.

Thompson B., Sharp P., Elliott R., Al-Mutairi S., Fairweather-Tait S.J. (2010). Development of a modified caco-2 cell model system for studying iron availability in eggs. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(6), 3833–3839.

Touvier M., Lioret S., Vanrullen I., Boclé J.C., Boutron-Ruault M.C., Berta J.L., Volatier J.L. (2006). Vitamin and mineral inadequacy in the french population: estimation and application for the optimization of food fortification. *International Journal for Vitamin and Nutrition Research*, 76(6), 343–351.

Tupe R., Chiplonkar S.A. (2010). Diet patterns of lactovegetarian adolescent girls: need for devising recipes with high zinc bioavailability. *Nutrition*, 26(4), 390–398.

USDA (2020). FoodData Central. [En ligne]. Disponible à l'adresse : <https://fdc.nal.usda.gov/> [Consulté le 8 April 2021].

Vasudevan S., Senthilvel S., Sureshbabu J. (2019). Knowledge attitude and practice on iodine deficiency disorder and iodine level in salt in retail and vendors among the rural population in south India: A community based observational and descriptive study. *Clinical Epidemiology and Global Health*, 7(3), 300–305.

Watanabe F., Yabuta Y., Tanioka Y., Bito T. (2013). Biologically active vitamin b12 compounds in foods for preventing deficiency among vegetarians and elderly subjects. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(28), 6769–6775.

Wolkers – Rooijackers J.C.M., Endika M.F., Smid E.J. (2018). Enhancing vitamin B12 in lupin tempeh by in situ fortification. *LWT*, 96, 513–518.

Yang C., Yao H., Wu Y., Sun G., Yang W., Li Z., Shang L. (2021). Status and risks of selenium deficiency in a traditional selenium-deficient area in Northeast China. *Science of the Total Environment*, 762, 144103.

Zhou J., Li J., Campbell W.W. (2019). Chapter 8 - Vegetarian athletes. *Nutrition and Enhanced Sports Performance (Second Edition)*. Bagchi, D., S. Nair, and C. K. Sen (eds.) Academic Press, 99–108.

Zhu X., Wang X, Zhang C., Wang X, Xiaoqi, Gu Q. (2015). A riboswitch sensor to determine vitamin B12 in fermented foods. *Food Chemistry*, 175, 523–528.