



Frédéric Elie on
ResearchGate

Besoins nutritionnels chez l'être humain

Frédéric Elie

Copyright France.com

La reproduction des articles, images ou graphiques de ce site, pour usage collectif, y compris dans le cadre des études scolaires et supérieures, est INTERDITE. Seuls sont autorisés les extraits, pour exemple ou illustration, à la seule condition de mentionner clairement l'auteur et la référence de l'article.

« Si vous ne dites rien à votre brouillon, votre brouillon ne vous dira rien ! »
Jacques Breuneval, mathématicien, professeur à l'université Aix-Marseille I, 1980

Abstract : Le présent article décrit les principales familles de composés biochimiques qui sont nécessaires à une alimentation équilibrée. Celle-ci répond à deux objectifs : une alimentation équilibrée consiste, d'une part, à garantir le maintien du poids corporel dans des valeurs normales (quantifiées par l'indice de masse corporelle), et d'autre part à garantir un apport journalier des nutriments conforme aux besoins de l'organisme. La condition de poids « normal » est quantifiée par l'indice de masse corporelle (IMC), et d'autres indices. La condition d'apport journalier des nutriments regroupe les nutriments ci-après. L'eau, pour une hydratation suffisante. Les vitamines : liposolubles A, E, K, D et hydrosolubles B, C. Les protéines : sources d'énergie, éléments bâtisseurs de l'organisme. Les glucides : ils sont les carburants de l'organisme. Les lipides : ils jouent, entre autres, un rôle fondamental dans la structure des membranes des cellules, et les tissus du cerveau ; ils se répartissent en acides gras saturés, et en acides gras insaturés. Les minéraux (macro-éléments ou micro-éléments) : magnésium, potassium, calcium... Les fibres alimentaires, qui ont un rôle déterminant sur le transit intestinal et la flore intestinale.

SOMMAIRE

1 – Fondamentaux des besoins nutritionnels

2 - Vitamines

2-1 – Généralités et familles

2-2 – Vitamines liposolubles

2-3 – Vitamines hydrosolubles

3 – Protéines

3-1 – Acides aminés

3-2 – Acides aminés protéinogènes

3-3 - Acides aminés non protéinogènes

4 - Glucides

4-1 – Définition et nomenclature

4-2 - Réactions chimiques liées aux différentes fonctions présentes dans les glucides

4-3 - Groupes principaux de glucides

5 - Lipides

5-1 – Définition et classification

5-2 - Acides gras

6 – Oligoéléments et minéraux

6-1 – Généralités

6-2 – Macro-éléments

6-3 – Oligo-éléments

7 - Fibres alimentaires

7-1 – Définition, familles, critères de teneur et allégations nutritionnelles des fibres alimentaires

7-2 - Quelques fibres alimentaires solubles, leurs propriétés et leurs sources

7-3 - Quelques fibres alimentaires insolubles, leurs propriétés et leurs sources

7-4 - Teneur en fibres alimentaires de quelques sources végétales

7-5 - Quelques fibres alimentaires de synthèse

8 – Mémo d'une alimentation équilibrée

8-1 – Deux objectifs d'une alimentation équilibrée

8-2 - La condition de poids « normal » : indice de masse corporelle (IMC), et autres indices

8-3 - La condition d'apport journalier des nutriments

Annexe A1 : Nicotinamide (vitamine PP ou B3)

Références

1 – Fondamentaux des besoins nutritionnels

Cet article présente quelques rappels succincts sur les besoins nutritionnels. Et plus particulièrement, pour ce qui concerne la phytothérapie et l'aromathérapie dont il est fait souvent usage aujourd'hui, il semble important d'insister sur le fait qu'elles doivent continuer de s'inscrire en cohérence avec les principes des besoins nutritionnels. En effet, beaucoup de produits en phytothérapie et d'huiles essentielles interviennent dans les compléments alimentaires, et peuvent apporter un soutien utile, toutefois dans les limites de précautions (réf. [5]). En tant que tels, leur rôle est de contribuer aux apports nécessaires aux besoins nutritionnels et non de les remplacer complètement. Lorsque ces besoins sont mal assurés, des carences et des maladies peuvent apparaître ou s'aggraver.

Les aliments ingérés et traités par le système digestif se transforment principalement en trois sortes de produits :

► **L'eau**, qui intervient dans l'hydratation.

► **Les nutriments**, qui interviennent dans la structure et le métabolisme de l'organisme. Ils sont répartis en 5 classes :

- Les vitamines.
- Les protéines.
- Les glucides.
- Les lipides.
- Les minéraux.

► **Les fibres**, nécessaires pour le transit intestinal et la flore intestinale.

Pour approfondir les recommandations, voir par exemple, les références [6], [7], [8] et plus spécifiquement sur l'alimentation des enfants en activités collectives réf. [9].

2 - Vitamines

2-1 – Généralités et familles

Les **vitamines** (réf. [10]) interviennent dans les fonctions biologiques telles que la construction, le fonctionnement et le maintien de l'organisme. Le déficit en vitamines cause des pathologies, cependant, à l'inverse, une surconsommation prolongée produit des effets déstabilisants. N'étant pas synthétisées par l'organisme, à l'exception des vitamines K et D, l'apport en vitamines est effectué par une nutrition équilibrée. Les vitamines se répartissent en 2 familles : vitamines liposolubles et vitamines hydrosolubles.

2-2 – Vitamines liposolubles

Vitamines A, E, K, D, réf. [11] ; ce sont par définition des vitamines solubles dans les lipides (corps gras). On les trouve dans les poissons gras, le fromage, les œufs et des graisses végétales et animales. Elles sont stockées dans l'organisme.

► **Vitamine A (rétinol)** ou dont la provitamine est le bêta-carotène) réf. [12] : nécessaire pour la vision, le système immunitaire, la croissance cellulaire, la différenciation cellulaire. Formes de la vitamine A en alimentation : rétinol et ses dérivés (exclusivement dans les huiles de foie de poissons, et les foies d'animaux), ou sous forme de précurseurs : caroténoïdes provitaminiques, ou bêta-carotène (carottes, abricots...). Pour obtenir une quantité de vitamine A (rétinol) dans l'organisme, il faut consommer 6 fois cette quantité en bêta-carotène par l'alimentation. A lui seul le bêta-carotène a, en outre, des effets anti-oxydants qui protègent l'organisme des effets du vieillissement. La vitamine A est peu sensible à la cuisson, en revanche elle se dégrade en milieu oxydant (air libre, lumière...). Elle s'absorbe plus aisément en synergie avec les graisses, c'est pourquoi il est recommandé d'accompagner de légumes les plats riches en viande et matières grasses. Conséquences de la carence en vitamine A : elles concernent surtout la vision, et une plus grande sensibilité aux infections (baisse du système immunitaire). Surconsommation de vitamine D (par excès de rétinol) : risque de maladies du foie (hépatomégalie ou gros foie) et des reins, chez la femme enceinte risque de malformation fœtale, peau sèche, troubles digestifs. Surconsommation de bêta-carotène : en compléments alimentaires, fortement déconseillée aux fumeurs car augmente l'effet cancérigène du tabac. Apport de vitamine A conseillé par jour : entre 400 et 750 µg pour les âges allant de 1 à 19 ans, entre 700 et 950 µg pour les femmes enceintes ; par rapport à ces valeurs, il est fortement déconseillé de dépasser un apport supplémentaire de 1 mg/jour.

► **Vitamine E (ou tocophérol)** : par son effet anti-oxydant, rôle de prévention des effets néfastes des

radicaux libres peroxydes (issus des acides gras polyinsaturés). Son rôle est important pour les membranes cellulaires et les lipoprotéines LDL (transporteurs du cholestérol dans le sang), mécanismes de la procréation, élaboration des globules rouges. On trouve la vitamine E surtout dans certaines huiles alimentaires (de tournesol, de colza, de noisette, d'olive), margarines, fruits secs oléagineux (noisettes, noix, amandes...). La vitamine E perd ses propriétés sous l'action de la lumière, même naturelle : les produits qui la contiennent doivent donc être stockés dans des contenants opaques. Indications de la vitamine E : prévention de l'athérosclérose, prévention de la DMLA (dégénérescence maculaire liée à l'âge), cataracte, limitation de la baisse des défenses immunitaires. Surconsommation de vitamine E : elle favoriserait le risque d'hémorragie cérébrale ; la consommation quotidienne doit être comprise entre 12 et 62 mg.

► **Vitamine K** : elle existe sous deux formes dans l'alimentation : vitamine K1 (ou **phylloquinone**) présente dans les végétaux, vitamines K2 (ou **ménaquinones**) présentes dans les aliments d'origine animale. La vitamine K est indispensable dans le processus de coagulation sanguine, réf. [23], ainsi que pour les os où elle favorise la fixation du calcium sur la matrice protidique des os (action de la protéine ostéocalcine). La vitamine K et la prise de médicaments anti-coagulants sont incompatibles, leurs effets étant opposés. Ses propriétés sont affectées par la lumière, et les produits qui la contiennent doivent être stockés au frais et consommés une seule fois après cuisson. Indications de la vitamine K : prévention de la maladie hémorragique du nouveau-né (celui-ci pouvant être carencé en vitamine K aux premières semaines) ; prévention de l'ostéoporose ; prévention sous la forme K2, par l'activation de la protéine MGP (« Matrix Gla-Protein ») de la calcification des artères donc réduction du risque cardio-vasculaire. Surconsommation de vitamine K : l'AFFSA recommande de ne pas dépasser 25 µg en compléments alimentaires.

► **Vitamine D** (ou **calciférol**), réf. [13] : elle peut être synthétisée par l'organisme, sous l'action des rayons UV, ou être apportée par l'alimentation. La vitamine D augmente la capacité de l'intestin à absorber le calcium et le phosphore, minéraux indispensables pour les tissus minéralisés ; elle participe aussi à l'équilibre du calcium dans l'organisme, au système immunitaire, à l'hématopoïèse, réf. [89]. Elle favorise aussi la régénération des fibres musculaires et la contraction des muscles. La vitamine D n'agit pas telle qu'elle dans l'organisme, elle est transformée dans le foie et le rein en calcitriol (1,25 dihydroxyvitamine D). La vitamine D est présente principalement dans les aliments suivants : huile de foie de morue, foie de morue en boîte, hareng, maquereau, saumon, thon... La vitamine D est sensible à la lumière, à l'air et à la chaleur, son stockage doit en tenir compte. Quantité de vitamine D requise : à une exposition au soleil minimale requise en hiver doivent s'ajouter les apports en vitamine D requis : 20 à 25 µg (nourrissons), 10 µg (enfants de 1 à 3 ans, femmes enceintes ou allaitantes), 5 µg (enfants de plus de 3 ans, adolescents et adultes), 10 à 15 µg (personnes âgées de plus de 75 ans). Conséquences des carences en vitamine D : rachitisme, ostéomalacie (démminéralisation du squelette, avec convulsions ou tétanie), ostéoporose (démminéralisation osseuse), sarcopénie de la personne âgée (fonte musculaire importante), dégradation des processus musculaires et intellectuels. Surconsommation de vitamine D : hypercalcémie (excès de calcium dans le sang), hypercalciurie (excès de calcium dans les urines), calculs rénaux, néphrocalcinose (dépôt de calcium dans les reins) ; l'EFSA (Autorité européenne de sécurité des aliments) fixe pour l'adulte l'apport maximal autorisé de vitamine D à 100 µg/jour en compléments alimentaires.

2-3 – Vitamines hydrosolubles

Vitamines B (B1 à B12) et C (réf. [14]). Ce sont des vitamines solubles dans l'eau, en conséquence elles ne peuvent pas être stockées par l'organisme puisqu'elles sont éliminées en même temps que l'eau où elles sont dissoutes. Pour préserver les vitamines hydrosolubles contenues dans les aliments, il faut privilégier leur cuisson à la vapeur et éviter la cuisson directe qui a pour effet de les faire disparaître avec l'eau de cuisson.

► **Vitamine C** (ou **acide ascorbique**), réf. [10] : Elle joue un rôle important dans les défenses de l'organisme (système immunitaire, réf. [15], [16], globules blancs), comme anti-oxydant elle supprime l'excès des radicaux libres qui contribuent au vieillissement cellulaire (pour cela la vitamine C doit être accompagnée de la vitamine E et de certains minéraux tels le zinc, le sélénium...), elle contribue à la protection des vaisseaux sanguins, elle permet l'assimilation du fer présent dans les végétaux, elle élimine les toxines des produits pouvant engendrer le cancer, elle favorise la cicatrisation (production du collagène, protéine présente dans la peau et les os), elle a un rôle important dans la prévention des maladies cardio-vasculaires, elle participe à la synthèse de la dopamine et de la noradrénaline (neuromédiateurs), elle contribue à la production de la carnitine par laquelle les cellules produisent leur énergie à partir des corps gras. La vitamine C est présente principalement dans les aliments suivants : fruits (agrumes, fraises, kiwi, cassis...), légumes (poivrons, épinard, choux...), châtaignes, pommes de terre. La vitamine C est sensible à l'oxydation (due entre autre à l'oxygène de l'air), à la chaleur, et puisqu'elle est hydrosoluble elle se dissout dans l'eau de cuisson. En conséquence, pour la consommer au mieux il faut : éviter de cuire les aliments qui la contiennent, les conserver au frais, consommer les fruits et légumes immédiatement après les avoir épluchés ou pelés, ainsi que leurs jus qui contiennent moins de vitamine C qu'eux. La vitamine C s'éliminant

facilement par les urines, la carence survient rapidement, aussi faut-il veiller à en consommer régulièrement. Quantité de vitamine C requise : de 50 à 100 mg/jour pour les enfants de 0 à 12 ans, 110 mg/jour pour les adolescents et adultes, 120 à 130 mg/jour pour les femmes enceintes et allaitantes, ainsi que pour les personnes âgées ; à noter que les fumeurs sont plus exposés aux carences en vitamine C et qu'il leur faut alors un supplément journalier de 100 mg/jour. Les personnes qui exercent une grande activité physique doivent aussi prendre un supplément journalier de 50 à 100 mg/jour car l'effort physique produit des radicaux libres dans l'organisme. Effets principaux de la carence en vitamine C : le scorbut (œdèmes et hémorragies surtout buccales), fatigue, amaigrissement pathologique. La surconsommation d'alcool aggrave la carence. Indications thérapeutiques de la vitamine C : rhumes, hypertension artérielle, prévention des maladies cardio-vasculaires, prévention de certains cancers, prévention de la cataracte. Effets d'une surconsommation de vitamine C : il y a excès lorsque les doses journalières dépassent 1 g/jour, dans ce cas les risques sont les suivants : calculs rénaux causés par les oxalates, troubles digestifs (gastrites, diarrhées), aggravation de la maladie causée par l'excès de fer (hémochromatose) puisque la vitamine C favorise la fixation du fer dans l'organisme.

► **Vitamines du groupe B.** Le groupe est constitué de 8 vitamines : vitamines B1, B2, B3, B5, B6, B8, B9, B12. Elles ont un rôle important pour différentes fonctions de l'organisme : métabolisme des cellules notamment sanguines, système immunitaire, réf. [69], système nerveux, peau. On les trouve dans un grand nombre de sortes d'aliments mais en quantité insuffisante ; aussi est-il nécessaire de diversifier les sources alimentaires pour couvrir les besoins.

- **Vitamine B1** (ou **thiamine**) : elle agit dans l'organisme sous sa forme active issue de sa transformation dans le foie, pyrophosphate de thiamine (TPP). Le TPP intervient dans l'activité des enzymes (réf. [93]), en particulier celles qui permettent de produire l'énergie des cellules à partir des glucides (ou sucres). Il s'ensuit que les grands consommateurs de glucides que sont le système nerveux et les muscles ont besoin de vitamine B1. Le TPP contribue aussi à la production du neuromédiateur thiamine triphosphate. Comme le TPP favorise la dégradation de l'alcool dans l'organisme, la surconsommation chronique d'alcool entraîne la diminution en B1 ; c'est pourquoi le **traitement de l'alcoolisme** s'accompagne de prises de vitamine B1. La vitamine B1 agit en synergie avec les vitamines B2, B3, B5, B6, B9.

- **Vitamine B2** (ou **riboflavine**) : elle agit dans l'organisme par l'intermédiaire de deux coenzymes (réf. [93]) formées à partir d'elle : flavine mononucléotide (FMN) et flavine adénine dinucléotide (FAD). Ces coenzymes interviennent dans l'activité de nombreuses enzymes. Entre autres, la FAD est utilisée par les flavoprotéines intervenant dans les processus de respiration des mitochondries, processus très important pour l'énergie et la vie des cellules ; les flavoprotéines sont le glycérol 3-P déshydrogénase, l'acyl-CoA déshydrogénase, le succinate déshydrogénase. La FAD permet aussi la dégradation des acides gras dans l'organisme grâce à leur bêta-oxydation, chaîne de réactions dans les mitochondries et dans les peroxysomes conduisant à l'oxydation des acides gras (les peroxysomes, découverts en 1965 par C. de Duve, sont des organites cellulaires fermés par une membrane simple, sans matériel génétique ni ribosomes). Quant à la FAD, elle intervient aussi dans la chaîne de respiration mitochondriale, c'est un agent d'oxydation très important par sa capacité à transférer des électrons lors des réactions biochimiques ; elle est aussi un photorécepteur sensible dans les longueurs d'onde du spectre visible correspondant au bleu (présente également dans les plantes, elle contribue alors à leur phototropisme). La formation des coenzymes est régulée par les hormones de la thyroïde et les hormones corticoïdes (réf. [94]). Par ces coenzymes la vitamine B2 intervient donc dans le métabolisme des protéines, des sucres (glucides) et des graisses (lipides), ainsi que dans la production de la kératine indispensable pour la peau, les cheveux et les ongles. De par son rôle dans le métabolisme énergétique, la consommation de vitamine B2 doit être d'autant plus grande que la dépense énergétique est élevée. Ainsi, pour des personnes ayant une grande activité physique, l'apport journalier doit être majorée de 0,5 à 1,5 mg/jour en plus de l'apport de base qui est de 1,8 mg/jour pour un adulte. Source alimentaire de vitamine B2 : principalement les aliments d'origine animale : laitages, œufs, viande, abats ; ainsi que certains légumes verts.

- **Vitamine B3** (ou **niacine** ou vitamine PP) : son rôle principal est la transformation du glucose ; sa carence provoque la maladie pellagre, ce qui lui a valu au départ l'appellation de vitamine PP. Elle provient de l'alimentation extérieure, mais est aussi produite par l'organisme grâce au tryptophane (acide aminé protéinogène, encore désigné par Trp et W). Une fois ingérée ou produite, la vitamine B3 est transformée dans le foie en substances actives sous forme de deux coenzymes NAD et NADP. Le NAD (nicotinamide adénine dinucléotide, référence [2]) a un rôle important dans les réactions d'oxydoréduction du métabolisme, et entre autres, par la dégradation du glucose à laquelle elle contribue, le NAD intervient dans la respiration cellulaire. Il participe aussi au métabolisme du calcium. Les recherches semblent confirmer le rôle du NAD dans les neurotransmetteurs, et donc son importance dans la prévention des maladies neurodégénératives. Le NADP (nicotinamide adénine dinucléotide phosphate) intervient principalement dans certaines enzymes (les oxydoréductases) qui agissent comme catalyseurs dans les réactions d'oxydoréduction. A ce titre, le NADP a un rôle primordial dans la prévention du stress oxydatif de l'organisme. En définitive, tous ces

facteurs font que la vitamine B3 est nécessaire pour produire l'énergie dans les cellules, pour la digestion des graisses, la production des hormones stéroïdes (œstrogènes, testostérone, corticoïdes..., réf. [94]), la réparation des ADN, le système nerveux. Sources alimentaires de vitamine B3 : aliments d'origine animale (viandes, poissons gras, volailles), oléagineux (cacahuètes, amandes...), levure de bière, certains fruits secs (abricots séchés...), céréales (pains complets ou aux céréales bio...). Besoins journaliers : de l'ordre de 14 à 17 mg/jour pour les adultes.

- **Vitamine B5** (ou **acide pantothénique**) : elle intervient comme précurseur de la coenzyme A (CoA, ou acide acétique activé) (réf. [93]); cette coenzyme véhicule le groupement acyle dans les réactions métaboliques telles que le cycle de Krebs ou la bêta-oxydation. La CoA est une chaîne constituée de : l'adénosine triphosphate, du pyrophosphate, de l'acide pantoïque, de la bêta-alanine, et de l'acide pantothénique (B5). Grâce à sa réactivité avec les acides carboxyliques, la CoA intervient dans le métabolisme des graisses, des glucides et des protéines. Via cette CoA, la vitamine B5 participe donc à la synthèse et au métabolisme des graisses (lipides), glucides, protéines, ainsi que des hormones telles que adrénaline, cortisol, aldostérone (réf. [94]). Les propriétés hydratantes de la vitamine B5 lui permettent de contribuer au renforcement des cheveux et aux soins de l'acné. Les besoins journaliers en vitamine B5 sont de 5 mg/jour pour l'adulte, et de 7 mg/jour pour les femmes allaitantes. Sources alimentaires de la vitamine B5 : elle est surtout présente dans les micro-organismes et les végétaux (levure de bière, germe de blé, céréales complètes, champignons, gelée royale, certaines variétés d'ortie piquante, certains fromages...). Elle est indiquée dans le traitement de l'excès de cholestérol et de triglycérides.

- **Vitamine B6** (ou **pyridoxine**) : son appellation, pyridoxine, a été donnée par Paul György en 1936 à cause de sa structure proche de celle de la pyridine. Cependant, la vitamine B6 se présente sous 6 formes différentes : la pyridoxine proprement dite (PN) dont la forme primaire est un alcool ; le pyridoxal (PL, forme primaire aldéhyde) ; la pyridoxamine (PM, qui est PN ou PL mais avec un groupe amine) ; le phosphate de pyridoxal (PLP) ; le phosphate de pyridoxamine (PMP) ; l'acide 4-pyridoxique (PA, qui est un catabolite ; un **catabolite** est un résidu des réactions de catabolisme, c'est-à-dire de dégradation des molécules ; ces réactions dégagent de l'énergie au sein de l'organisme, et les catabolites sont généralement éliminées par voie naturelle : urines...). La PN est exclusivement présente dans les végétaux (dans les végétaux, cette forme de vitamine B6 rend celle-ci moins bio-disponible que celles présentes dans les produits animaux) ; tandis que le PL est dans les cellules vivantes quel que soit le règne. Le PLP résulte de transformations de la PN, le PL, ou la PM ; c'est le PLP qui est la forme active de la vitamine B6 dans l'organisme : métabolisme des acides aminés (réf. [17]), conversion du glycogène en glucose, métabolisme des graisses (lipides), transformation du tryptophane en vitamine B3 (voir ci-avant), synthèse des hormones sérotonine, dopamine, adrénaline, noradrénaline (réf. [94]). La vitamine B6 participe au développement du système nerveux et cognitif, au système immunitaire (réf. [16]), à la formation de l'hémoglobine (et dans les végétaux, elle intervient dans la synthèse de la chlorophylle). Besoin en apport journalier (mg/jour) de la vitamine B6 : 1,5 (femmes adultes), 1,8 (hommes adultes), 2 (femmes allaitantes), 2,2 (personnes âgées). Sources de vitamine B6 : produits animaux (volailles, poissons, foies), produits végétaux (pois, céréales, soja, noix, bananes...). Indications thérapeutiques de la vitamine B6 : apport supplémentaire nécessaire pour les malades souffrant de polyarthrite rhumatoïde et d'alcoolisme chronique où la vitamine B6 est rendue déficiente ; soutien des performances intellectuelles des personnes âgées ; soulagement des troubles prémenstruels ; prévention des risques cardiovasculaires ; renforcement des cheveux et des ongles.

- **Vitamine B8** (ou **biotine**, ou H) : la biotine est précurseur de la coenzyme biotinyl-5-AMP (formule brute $C_{20}H_{28}N_7O_9PS$ où PS désigne phosphatidylsérine, qui est un phospholipide présent dans les membranes des cellules et des neurones) qui participe au métabolisme des acides gras, des glucides et des acides aminés, ainsi qu'à la biosynthèse des vitamines B9 et B12 (voir ci-après). Elle est présente dans toutes les espèces vivantes. Les principales sources alimentaires sont : céréales complètes, foie d'ovins ou de bovins, œufs, lait, soja, levures. La vitamine B8 contribue à la vie des cellules, à la production d'acides gras, au métabolisme des lipides et des acides aminés. Elle intervient dans l'apport énergétique résultant de la respiration, cet apport mettant en œuvre le cycle de Krebs. Elle agit dans les processus de transport du dioxyde de carbone (ce qui, entre autres, permet d'éliminer ce composé), et dans l'homéostasie glycémique (régulation du taux de sucre dans le sang) ; par exemple, en période de jeûne, elle permet au foie de produire le sucre dont l'organisme a besoin (néoglucogenèse). La vitamine B8 contribue au renforcement des cheveux (prévention de la chute des cheveux) et des ongles. Besoins journaliers en vitamine B8 : 0,050 mg/jour (adultes), 0,055 mg/jour (femmes allaitantes).

- **Vitamine B9** (ou **acide folique**, folate, folacine) : elle est le précurseur de la coenzyme tétrahydrofolate (THF, base conjuguée de l'acide tétrahydrofolique THFA) qui intervient dans la synthèse des bases nucléiques constitutives de l'ADN et de l'ARN, ces bases étant les purines (adénine et guanine) et pyrimidines (thymine et cytosine). La vitamine B9 a donc un rôle important dans l'élaboration du matériel génétique. Le THF intervient aussi dans la synthèse des acides aminés méthionine, histidine, sérine, qui participent à la synthèse des protéines. Par ces propriétés, la vitamine B9 agit donc au profit des cellules à

renouvellement fréquent telles que les globules blancs et les globules rouges, les cellules des intestins, les cellules de la peau (cicatrisation...). En synergie avec la vitamine B12, la vitamine B9 contribue à diminuer la quantité d'homocystéine, un acide aminé associé aux troubles cardiovasculaires (thromboses), rhumatismaux ou neurologiques (maladie d'Alzheimer, syndromes dépressifs, schizophrénie) lorsqu'elle est en excès. La vitamine B9 intervient aussi dans la structuration du système nerveux et la production de neuromédiateurs. Chez le fœtus, à la fin du premier mois de grossesse, elle permet la fermeture du tube neural, ce qui va permettre le développement de son système nerveux. Besoins journaliers en vitamine B9 (en mg/jour) : 0,070 (nourrisson), 0,100 à 0,200 (enfants de 1 à 9 ans), 0,250 à 0,300 (enfants de 10 à 15 ans), 0,330 (à partir de 16 ans), 0,400 (femmes enceintes ou allaitantes). Sources alimentaires en vitamine B9 : principalement levure de bière, céréales au son, foie de jeunes ovins ou bovins et de volailles, fruits secs à coque (noix, noisettes, cacahuètes, amandes...), légumes verts (épinard, pissenlit, persil, cerfeuil, cresson, asperge...), certains fromages (fromage de chèvre sec...). Indications thérapeutiques : anémie, soutien de la grossesse, dépression, démence...

• **Vitamine B12** (ou **cobalamine**) : elle contribue à la formation des neurotransmetteurs, à celle du sang, à l'intégrité de la gaine de myéline ; elle participe aussi au métabolisme des cellules de l'organisme, à la synthèse de l'ADN, et à la production d'énergie due à la synthèse des acides gras. La cobalamine présente quatre formes différentes : cyanocobalamine (forme la plus stable à l'air libre), hydroxocobalamine (forme naturelle de la vitamine B12, produite par les bactéries et transformée en méthylcobalamine et adénosylcobalamine par réaction avec le charbon actif riche en cyanure avec lequel elle a une grande affinité), méthylcobalamine (instable à l'air, cette coenzyme est une des formes biochimiquement actives de la vitamine B12, ayant une action importante envers les neuropathies périphériques, le diabète, la maladie de Charcot), adénosylcobalamine (l'autre forme biochimiquement active de la vitamine B12, instable à l'air). La carence en vitamine B12 conduit à une maladie du sang où les globules rouges sont de grande taille (anémie avec macrocytose). Aucun animal et végétal ne produit de vitamine B12, celle-ci est produite par certaines bactéries, micro-algues, micro-champignons, et **archéobactéries** ou archées (microorganismes unicellulaires sans noyau ni organites, référence [95]). Il s'ensuit que c'est via la chaîne alimentaire animale que l'être humain peut recevoir la vitamine B12 : les microorganismes concernés sont ingérés par les herbivores qui, eux-mêmes, sont « consommés » par les carnivores ; chez les ruminants les microorganismes ont le temps de se multiplier suffisamment lors de la digestion, et chez certains autres herbivores (lapins, lièvres...) ce n'est pas le cas, aussi ces animaux, lorsqu'ils sont jeunes, pour obtenir la vitamine B12 consomment instinctivement leurs propres excréments devenus contretemps riches en ces microorganismes (coprophagie), et une fois adultes leur flore intestinale les produit (ce qui n'est pas le cas chez l'homme). La consommation de petits insectes par les animaux est également une source de microorganismes producteurs de vitamine B12 sous la forme hydroxocobalamine. Chez l'homme, la vitamine B12, une fois ingérée, est stockée dans le foie, le pancréas, le cœur et le cerveau ; les personnes qui suivent un régime végétalien doivent obligatoirement se fournir en vitamine B12 par compléments alimentaires, d'autant plus que, dans ce régime, la vitamine B12 tend à être éliminée par le système digestif. Besoins journaliers en vitamine B12 en régime standard : 0,0025 mg/jour pour un adulte. Sources principales : viandes, charcuterie, foies, poissons, crustacés, fruits de mer, fromages, œufs, micro-algues...

3 – Protéines

3-1 – Acides aminés

Avec les glucides et les lipides, les protéines sont les éléments bâtisseurs et les fournisseurs d'énergie de l'organisme (réf. [18]) : muscles, os, peau, cheveux, ongles, hormones, enzymes, anticorps, neuromédiateurs... Les protéines sont des macromolécules formées d'une ou plusieurs **chaînes polypeptidiques**, chacune d'elles étant constituées d'**acides aminés** reliés entre eux par des **liaisons peptidiques** (voir réf. [1], [17]).

Les **acides aminés** sont des acides carboxyliques qui possède également un groupe fonctionnel amine. Autrement dit, ce sont des acides formés de R-COOH (appelé groupe carboxyle) lié à un groupe amine (qui contient un ou plusieurs atomes d'azote), comme par exemple une structure -NH- (dite secondaire) ou -NH₂ (dite primaire), réf. [17]. Il y a environ 500 acides aminés dans le monde vivant, parmi lesquels 149 dans les protéines. En fonction de la position spatiale du groupe carboxyle par rapport au groupe amine, on classe les acides aminés en acides α-aminés, β-aminés, γ-aminés, δ-aminés... la liaison s'effectuant via le carbone qui prend alors les appellation C-α, C-β, etc. (figure 1).

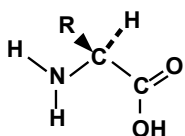


Figure 1 – Structure d'un acide α-aminé, très courant dans les protéines, le groupe amine est ici -NH₂ (primaire) ; R désigne un groupe organique

Les **liaisons peptidiques** entre les acides aminés relient le groupe carboxyle de l'un et l'amine primaire de l'autre ; dans certains cas, la formation de cette liaison s'effectue avec dégagement d'une molécule d'eau H₂O (figure 2).

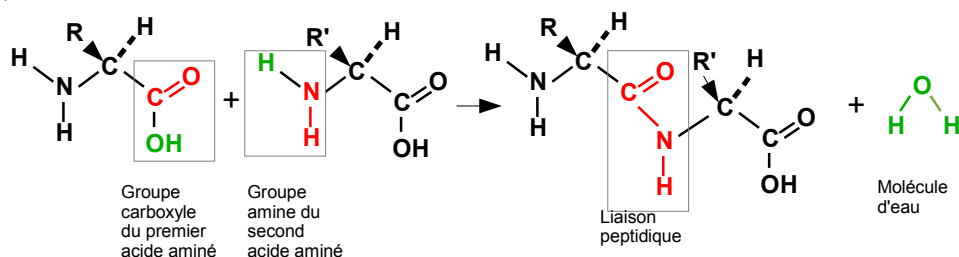
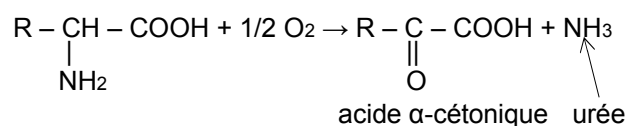


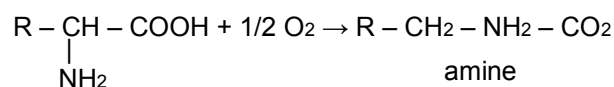
Figure 2 - La liaison peptidique provient d'une partie des groupes carboxyle et amine, avec dégagement d'une molécule d'eau obtenue aussi depuis ces groupes

Trois propriétés biochimiques des acides aminés :

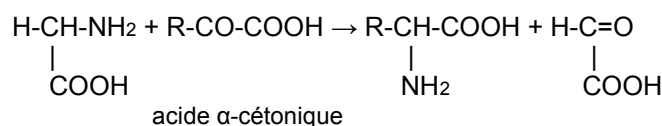
► Pour les acides aminés possédant le groupe amine primaire -NH₂, élimination de celui-ci (réaction de **désamination**) par la formation de l'urée (uréogénèse) :



► Formation d'amines à partir des acides aminés (réaction de **décarboxylation**) :



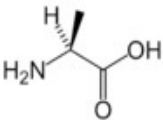
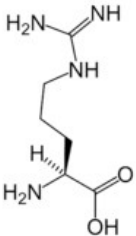
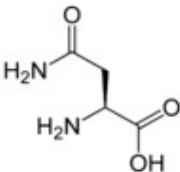
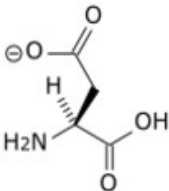
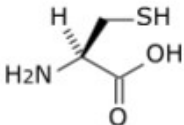
► Formation d'un acide aminé à partir d'un autre acide aminé, via un acide α-cétonique R-CO-COOH (réaction de **transamination**) :

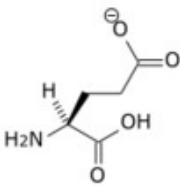
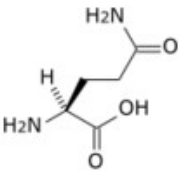
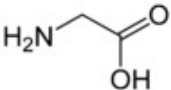
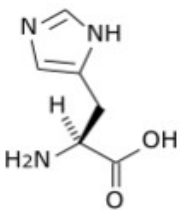
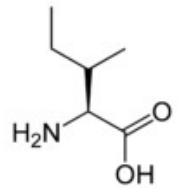


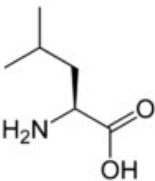
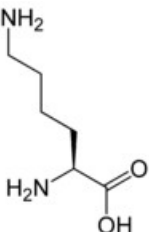
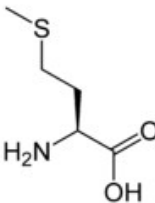
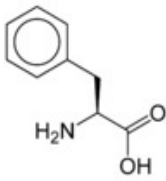
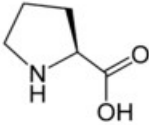
Le premier acide aminé transmet sa fonction amine -NH₂ à l'acide α-cétonique, celui-ci devenant ainsi un acide aminé. La transamination fait intervenir l'enzyme transaminase (réf. [93]).

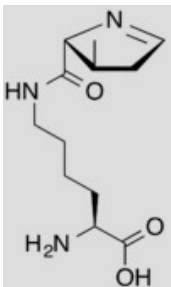
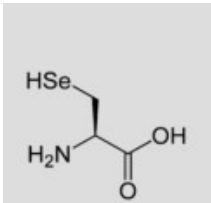
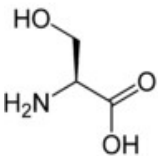
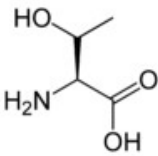
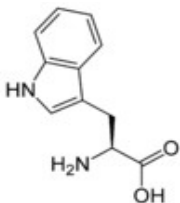
3-2 – Acides aminés protéinogènes

Les acides aminés à partir desquels sont formées les protéines sont dits **protéinogènes** : on en compte 22 (dont 2 qui ne concernent pas l'organisme humain). La synthèse des protéines s'effectue sur les ribosomes : ce sont des complexes composés de protéines et d'ARN, présents dans les cellules, qui réalisent le décodage de l'ARN messager et la polymérisation des acides aminés à partir de laquelle est formée la protéine correspondante (réf. [1]). L'organisme humain peut produire 13 acides aminés protéinogènes, et les 9 autres, dits **acides aminés essentiels** ou indispensables, sont obligatoirement fournis par l'alimentation. Contrairement aux autres nutriments, les acides aminés ne sont pas stockés par l'organisme ; il s'ensuit que si leur apport est insuffisant l'organisme puise les acides aminés dont il a besoin directement dans les tissus, notamment les muscles. Le tableau 1 donne la liste des 22 acides aminés protéinogènes (les besoins sont exprimés en mg d'acide aminé/kg du poids adulte/jour, sur un profil de besoin nutritionnel moyen en protéines de 0,66 g protéine/kg poids/jour d'un adulte) :

Acide aminé protéinogène	Abréviation IUPAC	Structure chimique (en grisés, non universellement répandus chez les êtres vivants)	Essentiel (oui/non) et besoin pour adultes (norme OMS, FAO, UNU) réf. [90]	Source d'apport (si essentiel)	commentaires
Alanine	A - Ala		non		Cet acide aminé contribue à la restauration du stock de glucides donc à la réserve d'énergie. Il est libéré par les muscles. Il est l'un des constituants du collagène et de l'élastine.
Arginine	R - Arg		Selon les cas (semi-essentiel)	Légumineuses, riz brun, avoine, sarrasin, viande rouge, volaille, poisson, produits laitiers, noix	Cet acide aminé est dit semi-essentiel parce qu'il ne correspond pas toujours aux besoins de l'organisme. Il participe au cycle de l'urée (ce cycle permet de détoxifier le foie). C'est un précurseur d'autres acides aminés, ainsi que du monoxyde d'azote NO, dont le rôle est fondamental dans la vasodilatation (dilatation des vaisseaux, ce qui permet une bonne circulation sanguine), ainsi que dans le système immunitaire. L'arginine contribue aussi à la synthèse des hormones de croissance.
Asparagine	N - Asn		non		L'asparagine est un précurseur des bases azotées de l'ADN (adénine A, cytosine C, guanine G, thymine T, uracile U). Elle contribue à la détoxication et joue un rôle important dans le fonctionnement du système nerveux central.
Aspartate	D - Asp		non		L'aspartate a un rôle important dans la détoxication. Elle contribue à la formation de l'adénosine-triphosphate ATP qui fournit l'énergie aux cellules biologiques. L'aspartate est aussi un neurotransmetteur
Cystéine	C - Cys		Selon les cas (semi-essentiel) : 4 mg/kg/jour (soit l'équivalent en besoin de protéine de : 6 mg/g de protéine)	Levure de bière, germe de blé, ail, oignon, chou de Bruxelles, brocoli, produits laitiers, noix, graines, fonio (céréale sans gluten), fruits de mer, poisson, œufs, viande	Acide aminé semi-essentiel, intervenant dans la synthèse du principal anti-oxydant de l'organisme : le glutathion GSH ou GSSG. La cystéine est l'un des composants de la myosine (un des constituants de la peau), de l'actine (un des constituants des ongles), et de la kératine (un des constituants des cheveux).

Acide aminé protéinogène	Abréviation IUPAC	Structure chimique (en grisés, non universellement répandus chez les êtres vivants)	Essentiel (oui/non) et besoin pour adultes (norme OMS, FAO, UNU) réf. [90]	Source d'apport (si essentiel)	commentaires
Glutamate	E - Glu	 Énantiomère L ou R-glutamate	Selon les cas (semi-essentiel)	Amande, graine de courge, pois cassés, lentilles corail, parmesan, kelp (algue), sauce soja, emmental, tomate, coquille St Jacques, petit pois, crabe, chou, poulet, bœuf	Ne pas confondre avec la forme glutamate monosodique (GMS), qui est employée comme additif alimentaire, considéré toxique à haute dose. Le glutamate, ou acide glutamique, est un neurotransmetteur. C'est un précurseur d'un autre neurotransmetteur, le GABA (ou acide γ -aminobutyrique), qui a un rôle inhibiteur dans le système nerveux central. C'est aussi un précurseur des bases azotées ACGTU de l'ADN et est un constituant du glutathion.
Glutamine	Q - Gln		non		La glutamine est fortement sollicitée par les besoins de l'organisme. Rôles importants dans : le système immunitaire, la structure de la barrière intestinale, la croissance et le renouvellement des tissus musculaires, la synthèse du neurotransmetteur GABA, l'équilibre acido-basique de l'organisme. C'est aussi un anti-oxydant.
Glycine	G - Gly		non		La glycine, ou glycocolle, est un précurseur de l'ADN et de la créatine, substance synthétisée dans le foie, les reins et le pancréas et intervenant dans le cerveau et les fibres musculaires. Autres rôles de la glycine : neurotransmetteur intervenant dans le sommeil, contribution à la synthèse du glutathion, de l'hémoglobine, du collagène et de l'élastine.
Histidine	H - His		Oui besoin : 10 mg/kg/jour (soit l'équivalent en besoin de protéine : 15 mg/g de protéine)	Les poissons gras, légumes secs, champignons, pommes de terre.	Précurseur de l'histamine qui intervient dans la production de l'hémoglobine et la présence du fer. Participant à la synthèse du glutamate, l'histidine est donc une source d'énergie musculaire
Isoleucine	I - Ile		Oui besoin : 20 mg/kg/jour (soit l'équivalent en besoin de protéine : 30 mg/g de protéine)	blanc de poulet, petits pois, saumon, œuf, noix, farine de blé complet	Agit sur la croissance musculaire, notamment par la fourniture de sucres (glucides).

Acide aminé protéinogène	Abréviation IUPAC	Structure chimique (en grisés, non universellement répandus chez les êtres vivants)	Essentiel (oui/non) et besoin pour adultes (norme OMS, FAO, UNU) réf. [90]	Source d'apport (si essentiel)	commentaires
Leucine	L - Leu		Oui besoin : 39 mg/kg/jour (soit l'équivalent en besoin de protéine : 59 mg/g de protéine)	petits pois, blanc de poulet, saumon, œuf, noix, farine de blé complet	Contribue à la régulation cellulaire, au renouvellement des tissus musculaires, et, par sa dégradation, à la formation de l'acétyl-CoA (acétyl-coenzyme A) et de l'acétoacétate qui interviennent dans la production d'énergie cellulaire sous forme d'ATP (adénosine triphosphate)
Lysine	K - Lys		Oui besoin : 30 mg/kg/jour (soit l'équivalent en besoin de protéine : 45 mg/g de protéine)	graines de courge, blanc de poulet, saumon, petits pois, tofu, œuf, farine de sarrasin, noix	Précurseur de la carnitine (formée dans le foie et les reins), qui assure le transport des acides gras à l'intérieur des mitochondries, permettant la production d'énergie sous la forme d'adénosine triphosphate (ATP). La lysine est impliquée aussi dans le système immunitaire, la synthèse du collagène, et l'hormone de croissance (somatotropine, formée dans l'hypophyse)
Méthionine	M - Met		Oui besoin : 10 mg/kg/jour (soit l'équivalent en besoin de protéine : 16 mg/g de protéine)	noix du Brésil, saumon, sésame, viande de bœuf, œuf, brocoli, petits pois, épinards, maïs, millet	Précurseur de la créatine et de la S-adénosyl méthionine qui a un rôle important dans la structure de l'ADN. La méthionine est présente dans la kératine des cheveux.
Phénylalanine	F - Phe		Oui besoin : 25 mg/kg/jour (soit l'équivalent en besoin de protéine : 38 mg/g de protéine)	soja, graines de courge, petits pois, volaille, noix, viande de porc, saumon, œuf	Précurseur de la tyrosine, agit dans le processus de satiété et de faim, ainsi que dans le développement musculaire.
Proline	P - Pro		non		La proline intervient dans la formation de l'ADN, de l'acide hyaluronique (macromolécule glucidique ayant un rôle important dans le milieu extra-cellulaire, le tissu conjonctif et la propagation cellulaire), et dans le collagène (protéine structurale ayant un rôle important dans le milieu extra-cellulaire, notamment dans la résistance mécanique des tissus).

Acide aminé protéinogène	Abréviation IUPAC	Structure chimique (en grisés, non universellement répandus chez les êtres vivants)	Essentiel (oui/non) et besoin pour adultes (norme OMS, FAO, UNU) réf. [90]	Source d'apport (si essentiel)	commentaires
Pyrrolysine	O - Pyl	 Chez certaines archées méthanogènes	Sans objet	Sans objet	Cité pour mémoire : ce 22ième acide aminé ne concerne pas l'organisme humain.
Sélénocystéine	U - Sel	 Chez les eucaryotes dans certaines enzymes oxydoréductases	Sans objet	Sans objet	Cité pour mémoire : ce 21ième acide aminé ne concerne pas l'organisme humain ; il est, chez les eucaryotes, les bactéries et les archéobactéries (réf. [95], un analogue sélénié de la cystéine, c'est-à-dire où l'atome de soufre a été remplacé par l'atome de sélénium.
Sérine	S - Ser		non		La sérine contribue à la synthèse de la cystéine et des phospholipides du cerveau, qui interviennent dans ses fonctions cognitives. La sérine est le précurseur de la choline (alcool aminé, intervient dans l'intégrité des membranes cellulaires, et est précurseur du neurotransmetteur acétylcholine).
Thréonine	T - Thr		Oui besoin : 15 mg/kg/jour (soit l'équivalent en besoin de protéine : 23 mg/g de protéine)	Blanc de poulet, viande de bœuf, petits pois, saumon, noix, œuf, farine de blé complet	La thréonine intervient dans la synthèse des lipoprotéines cérébrales (une lipoprotéine est une petite protéine en forme de sphère liée à un lipide, elle permet le transport dans le sang de certaines vitamines, hormones, et cholestérol). Elle contribue à baisser le cholestérol, à former le collagène, l'élastine (protéine liée aux propriétés élastiques de la peau) et l'émail des dents
Tryptophane	W - Trp		Oui besoin : 4mg/kg/jour (soit l'équivalent en besoin de protéine : 6 mg/g de protéine)	Soja, poudre de cacao non sucrée, noix de cajou, petits pois, blanc de poulet	Précurseur de la vitamine B3 et de la sérotonine

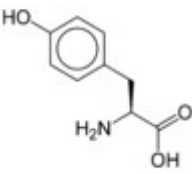
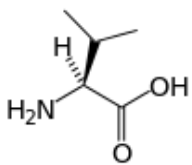
Acide aminé protéinogène	Abréviation IUPAC	Structure chimique (en grisés, non universellement répandus chez les êtres vivants)	Essentiel (oui/non) et besoin pour adultes (norme OMS, FAO, UNU) réf. [90]	Source d'apport (si essentiel)	commentaires
Tyrosine	Y - Tyr		Selon les cas (semi-essentiel)	Lait, œuf, viande, poisson, noix, noix de cajou, amande, avocat, champignon, haricot vert, pomme de terre, aubergine, betterave, radis, asperge, persil, concombre, oignon rouge, épinard, seigle	La tyrosine est précurseur des catécholamines tels que de la dopamine (neurotransmetteur agissant sur le circuit de la récompense), l'adrénaline, la noradrénaline, etc. (les catécholamines augmentent suite à un stress et favorisent le taux de glucose dans le sang, donc agissent de manière antagoniste à l'insuline). La tyrosine est aussi précurseur de la mélanine (pigment) et de la thyroxine (hormone thyroïdienne).
Valine	V - Val	 Énantionère L de la Valine	Oui besoin : 26 mg/kg/jour (soit l'équivalent en besoin de protéine : 39 mg/g de protéine)	Chlorella (algue), spiruline, petits pois, poulet, farine de blé complet, fromage	Contribue à la protection du système nerveux et à la synthèse des protéines musculaires.

Tableau 1 – Acides aminés protéinogènes

L'organisme produit ses propres protéines à partir des acides aminés protéinogènes qui sont libérés lors de la digestion. Ces acides aminés proviennent d'aliments d'origine animale et végétale, mais les protéines animales contiennent toutes les acides aminés utiles à l'organisme, tandis que celles d'origine végétale en contiennent certains et, de toutes façons, en quantité moindre.

Le caractère essentiel des acides aminés n'est pas absolu : il dépend de la capacité de l'organisme humain à synthétiser les acides aminés, cette capacité pouvant être altérée par ses états physiologiques ou pathologiques. Les acides aminés affectés par ces conditions sont dits **conditionnellement essentiels** ; c'est le cas de : cystéine, glycine, tyrosine, proline, glutamine, arginine.

Les **besoins en protéines** doivent être satisfaits quotidiennement par l'organisme humain, car ils sont renouvelés chaque jour en quantité de quelques centaines de grammes. Ce besoin est quantifié par l'apport nutritionnel conseillé (ANC) exprimé en grammes de protéines/kg du corps humain/jour. L'ANC en protéines varie selon l'âge et le sexe (voir tableau 2 suivant) :

Âge et conditions particulières	ANC en protéines (g protéines/kg corps/jour)
0-1 mois	2,6
12-24 mois	1,0
24-36 mois	0,9
5-10 ans	0,9
adolescent(e)s (12-18 ans)	0,8-0,9
adultes	0,8
Femmes enceintes	0,9
Femmes allaitantes	1,4
Personnes âgées	1,0

Tableau 2 – Apport nutritionnel conseillé (ANC)

Une certaine proportion de protéines, synthétisées à partir des acides aminés, est transformée naturellement par l'organisme humain en glucides et en lipides ; il s'ensuit que, pour produire une quantité suffisante de protéines, il faut un apport adapté en acides aminés. On quantifie cet apport par le **degré d'utilisation nette**

des protéines, défini comme suit :

$$\text{degré d'utilisation nette des protéines} = \frac{\text{masse des acides aminés essentiels convertis en protéines}}{\text{masse des acides aminés essentiels apportés}}$$

► On appelle **acide aminé essentiel limitant** un acide aminé qui, lorsqu'il est déficitaire dans une protéine, l'utilisation des autres acides aminés essentiels dans cette protéine devient limitée. Aussi, compte tenu des acides aminés limitants, on quantifie par plusieurs indicateurs l'apport des protéines essentielles en référence aux besoins de l'organisme (selon FAO et OMS) :

- **L'index chimique** : pour une protéine donnée c'est le rapport

$$\frac{\text{concentration de l'acide aminé essentiel dans une protéine}}{\text{concentration de l'acide aminé essentiel pour satisfaire le besoin}}$$

Comme il y a plusieurs acides aminés essentiels dans une protéine, l'index chimique retenu est le plus faible. Pour une source alimentaire donnée, plus l'index est faible, plus elle est déficitaire en l'acide aminé correspondant qui devient alors limitant.

- **La digestibilité** : le système digestif n'assimile pas les protéines de la même manière ; la digestibilité est le rapport (quantité de protéine assimilée)/(quantité de protéine fournie). Elle dépend de divers facteurs : préparation de la source alimentaire (cuisson, etc.), présence de polyphénols, de fibres, de composés non nutritionnels dans l'aliment.

- **L'index chimique corrigé de la digestibilité** (ou PDCAAS, « *Protein Digestibility Corrected Amino Acid Score* ») défini par :

$$\text{PDCAAS} = (\text{index chimique}) \times (\text{digestibilité})$$

Comme l'index chimique peut être supérieur à 100% (c'est le cas lorsque la concentration en acide aminé dépasse le besoin de l'organisme), il est convenu que, dans ce cas, le PDCAAS est limité à 100%. Le tableau 3 suivant donne quelques valeurs de ces indicateurs.

Source de protéines	Index chimique (%)	Acide aminé limitant	Digestibilité (%)	PDCAAS (%)
Protéines d'origine animale				
Viande de bœuf	94	Méthionine, cystéine, tryptophane	98	92
Blanc d'œuf	119	aucun	100	100
Lait écrémé	110	aucun	94	100
Lait (contient la protéine caséine)	119	aucun	99	100
Protéines d'origine végétale				
Soja concentré	104	En général les légumineuses sont faibles en méthionine, qui devient donc limitant	95	99
soja	94		98	92
Pois concentré	79		92	73
pois	84 à 93		73 à 82	61 à 68
Farine de pois	79		88	69
Pois chiche en conserve	74 à 81		88 à 89	66 à 71
Lentilles en conserve	62		84	52
Fèves autoclavées	55		86	47
Haricots blancs	84		81	68
Blé, farine de blé	46	En général les céréales sont faibles en lysine qui devient donc limitant (c'est aussi le cas des noix et graines)	90	41
Blé complet	63		91	57

Tableau 3 - indicateurs des sources d'apport des protéines essentielles

Remarques : L'index chimique renseigne sur les conséquences d'une carence en acide aminé correspondant. Par exemple, pour la viande l'index est élevé malgré l'existence d'un acide aminé limitant (le

tryptophane) parce que le déficit de celui-ci dans la viande est peu important. Dans les céréales, en revanche, le déficit en lysine (acide aminé limitant) est fréquent, c'est pourquoi leur index est plus faible. De manière générale pour les protéines d'origine animale l'index chimique est grand et leur digestibilité est proche de 100%. Il est à noter, cependant, que les protéines d'origine végétale ont des caractéristiques nutritionnelles plus étendues que celles d'origine animale. Cela présente un intérêt dans l'apport de protéines d'origine végétale mais à la condition suivante : puisque la carence en certains acides aminés (limitants) est plus importante dans l'alimentation d'origine végétale, mais que d'une source à l'autre on a affaire à des acides aminés limitants différents, il suffit, pour couvrir l'ensemble des besoins nutritionnels en protéines, de diversifier et de combiner les sources alimentaires d'origine végétale. Par exemple : la combinaison des céréales, qui sont assez carencées en lysine mais riches en méthionine, et des légumineuses, qui ont sont assez carencées en méthionine mais riches en lysine, permet simultanément l'apport correct des deux acides aminés lysine et méthionine. C'est ce principe de combinaison qui est employé dans les **régimes végétariens**.

► L'action des acides aminés protéinogènes ne se limite pas à la seule synthèse de protéines, elle peut aussi contribuer à la formation de composés biochimiques ayant un rôle important dans l'organisme humain. Voici quelques **actions biochimiques d'acides aminés protéinogènes** :

- **Arginine** : précurseur du monoxyde d'azote NO, formé par réactions avec l'oxygène O₂ et des enzymes NO-synthases (NOS), catalysées par le fer contenu dans l'hème présent entre autres dans l'hémoglobine du sang, ces réactions donnant de la citrulline avec dégagement de NO. Le monoxyde d'azote a plusieurs actions :

- C'est un neurotransmetteur, le seul qui ait la possibilité de diffuser dans plusieurs neurones simultanément, cette propriété pouvant être déterminante dans le fonctionnement de la mémoire.

- Il a un effet vasodilatateur (dilatation des vaisseaux) : l'endothélium (paroi la plus interne) des vaisseaux sanguins utilise NO pour relâcher leurs muscles lisses, ce qui permet leur dilatation et donc l'augmentation du débit sanguin ; de ce fait, l'accumulation ou l'engorgement des plaquettes dans les vaisseaux n'ont pas lieu. Lorsque l'organisme ne synthétise pas suffisamment de NO, les maladies cardiovasculaires surviennent, et nécessitent un traitement médicamenteux qui favorise cette synthèse (comme la trinitrine).

- De par sa capacité à faire relâcher les muscles lisses, le NO permet aussi au système digestif d'assurer le tractus intestinal, les mouvements de l'estomac, et le stockage par celui-ci des liquides.

- En présence de bactéries pathogènes, les macrophages (de la famille des globules blancs) produisent le NO en grande quantité pour les éliminer. Cependant, l'inconvénient est qu'avec une telle quantité de NO les vaisseaux se dilatent de manière excessive, ce qui entraîne une très forte baisse de la tension artérielle provoquant le choc septique. Etc.

- **Glycine** : précurseur des porphyrines (molécules permettant le transport du dioxygène O₂ et présentes dans l'hémoglobine et les globules rouges). Elle est aussi précurseur de la créatine, formée au niveau du foie, présente dans le cerveau et les fibres musculaires et indispensable pour leur énergie. Elle est précurseur d'un neurotransmetteur, l'acétylcholine, qui agit au niveau du système nerveux central (mémoire...) et du système nerveux autonome (système végétatif, activité musculaire...). C'est elle-même un neurotransmetteur qui a un rôle inhibiteur dans la moelle épinière. La glycine intervient dans la formation du collagène (protéine structurale contribuant à l'élasticité et à la résistance des tissus), dans la composition des acides biliaires (rôle important dans la digestion), dans la formation du glutathion (molécule intervenant dans la régulation du potentiel redox des cellules, et qui contribue à l'inhibition de l'effet oxydant des radicaux libres). Comme l'aspartate et la glutamine, la glycine est aussi un précurseur des nucléotides (éléments des acides nucléiques ADN et ARN).

- **Méthionine** : elle contribue à la formation des polyamines (composés comportant des fonctions amines -NH₂ ou -HN, participant à la prolifération des cellules et à la croissance).

- **Glutamate** : précurseur du neurotransmetteur l'acide γ-aminobutyrique (ou GABA). Chez l'adulte, le GABA est un inhibiteur (limite l'excitation des neurones), mais chez l'embryon c'est un excitateur qui contribue à son développement. Le GABA contribue aussi à la croissance de certains neurones. Chez l'adulte, il est important que l'effet excitateur des neurones dû au glutamate soit régulé par l'effet inhibiteur du GABA ; en cas de déséquilibre, il apparaît le risque de développer l'épilepsie et l'ischémie cérébrale (diminution de l'apport de sang au cerveau entraînant sa sous-oxygénation). Le GABA contribue aussi à la flore intestinale, à la régénération des cellules du pancréas productrices de l'insuline dans le cas du diabète de type 1. Dans le cas d'excitations neuronales excessives (anxiétés, convulsions...) l'action inhibitrice du GABA est amplifiée par les anxiolytiques (benzodiazépines...).

- **Tryptophane** : c'est un précurseur du neuromédiateur sérotonine. La sérotonine est un neurotransmetteur qui joue un rôle déterminant dans l'humeur et la régulation des prises de risque. Ses actions sur le système nerveux sont opposées à celles d'un autre neurotransmetteur, la dopamine, qui agit directement sur le système de récompense/renforcement, sur le rythme circadien (veille et sommeil) et dans les fonctions digestives, et la dopamine est le précurseur de l'adrénaline et de la noradrénaline. Un déséquilibre entre la sérotonine et la dopamine, dans un sens ou dans l'autre, a donc des conséquences importantes sur les troubles psychiques et la gestion des risques. Le tryptophane est aussi précurseur de la

vitamine B3.

● **Phénylalanine** : c'est le précurseur direct de la tyrosine, acide aminé précurseur de la dopamine qui, comme on vient de le voir, est elle-même précurseur de l'adrénaline et de la noradrénaline.

► **Conséquences d'une carence en protéines essentielles** :

L'organisme puise les protéines dans les muscles, lesquels finissent par s'affaiblir et dysfonctionner. La carence en protéines résulte d'un apport insuffisant soit de protéines soit d'acides aminés essentiels (réf. [19]). La carence en un seul acide aminé essentiel, sur une durée longue, a les mêmes effets qu'une carence en protéines. A termes, les conséquences de la carence, hormis les muscles, sont : fatigue, ongles cassants et chute des cheveux (manque de kératine), troubles visuels, ligaments fragilisés, fragilisation des os (ostéoporose), sensibilité aux infections (baisse du système immunitaire)...

► **Conséquences d'un excès de protéines essentielles** :

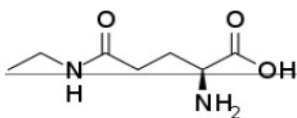
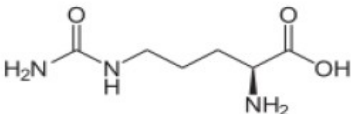
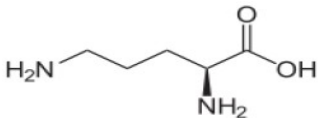
Augmentation de l'urée et de l'acide urique (avec pour conséquences, entre autres, des crises de goutte), attaque des os et des articulations due à l'augmentation de l'acidité dans l'organisme... réf. [19]

3-3 - Acides aminés non protéinogènes

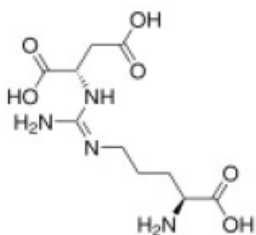
A côté des 22 acides aminés protéinogènes que nous venons de voir, existent quelques 500 acides aminés non protéinogènes. Quoique n'ayant pas de fonction dans la formation des protéines, 140 d'entre eux peuvent être présents dans celles-ci, incorporés par leurs ribosomes. Beaucoup d'acides aminés non protéinogènes (AA non protéinogènes) ont des fonctions importantes dans la physiologie et le métabolisme humains, telles que :

- agents du métabolisme ;
- hormones (réf. [94]) ;
- neurotransmetteurs ;
- acides aminés synthétisés par des enzymes spécifiques (réf. [93]) et non par les ribosomes des cellules (appelés alors **peptides non ribosomiques**) contribuent aux fonctions suivantes : antifongiques, antibiotiques, immunosuppresseurs (actions sur le système immunitaire, anticorps), anti-inflammatoires, etc.

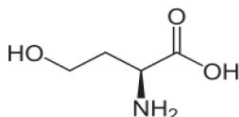
La structure chimique de quelques AA non protéinogènes est présentée ci-après, en distinguant ceux qui sont incorporés dans les protéines (tableau 5) et ceux qui ne le sont pas (tableau 4) :

Acides aminés non protéinogènes non incorporés dans les protéines	
	Théanine (ou L-Théanine, C ₇ H ₁₄ N ₂ O ₃) : présent dans les feuilles de thé vert (<i>Camellia sinensis</i>) et le champignon bolet bai (<i>Xerocomus badius</i>). Actions : réduction du stress psychique et physique, effet relaxant. En synergie avec le 5-HTP (ou 5-hydroxytryptophane, précurseur du neurotransmetteur sérotonine) ainsi que le magnésium, les vitamines B3, B6, B9, la théanine a une action efficace contre les insomnies
	Citrulline (C ₆ H ₁₃ N ₃ O ₃) : présent en grande quantité dans la pastèque (<i>Citrullus lanatus</i>), et en moindre quantité dans : concombre, melon, courge, citrouille. Actions : la citrulline contribue à la synthèse de l'AA protéinogène arginine, qui a une action importante dans la production de monoxyde d'azote NO et donc dans la vasodilatation. La déficience en citrulline entraîne de graves perturbations du cycle de l'urée. La citrulline s'avère être un complément efficace contre la baisse de vitalité et la dénutrition, en particulier chez les personnes âgées, réf. [20]. Elle peut être accompagnée par : le ginseng, qui soutient l'organisme en cas de baisse d'énergie ; les vitamines C, B6 et le magnésium, qui soutiennent la résistance physique et psychique.
	Ornithine (ou acide ornithurique, C ₅ H ₁₂ N ₂ O ₂) : cet AA non protéinogène est produit à partir de l'arginine, suite à l'action de l'enzyme arginase dihydrolase, il est donc intégré dans le cycle de l'urée.

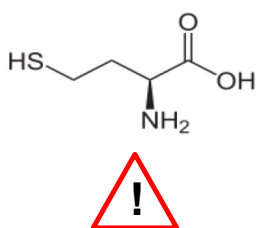
Acides aminés non protéinogènes non incorporés dans les protéines



Acide argininosuccinique (ou argininosuccinate ou ASA, $C_{10}H_{16}N_4O_6$) : cet AA non protéinogène est converti en arginine par l'enzyme argininosuccinate synthase, dans le cycle de l'urée.

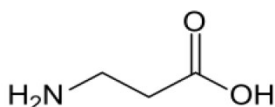


Homosérine (ou L-Homosérine, $C_4H_9NO_3$) : produit par la méthionine et intervient dans le métabolisme de la thréonine, l'isoleucine et la méthionine (qui sont des AA essentiels).



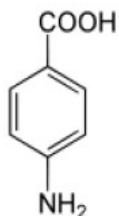
Homocystéine (ou L-Homocystéine ou S-Homocystéine, $C_4H_9NO_2S$) : cet acide aminé est cité pour mémoire, car, en excès, il a un **rôle négatif dans l'organisme**. Il a pu être impliqué dans l'apparition de la Vie sur Terre, réf. [21]. Cependant, de par son action fortement inflammatoire, il est associé, soit comme indicateur, soit comme facteur, à certaines pathologies : athérosclérose, thrombose veineuse cérébrale..., certaines maladies neurologiques ou neuropsychiatriques (Alzheimer, schizophrénie, dépression...), ou affectant les articulations (arthroses, rhumatismes...), ainsi que les risques de fractures chez les personnes âgées. La consommation d'alcool favorise son taux élevé.

L'homocystéine est détruite par une enzyme (la méthyltétrahydrofolate réductase), qui utilise la vitamine B9, celle-ci est employée pour contribuer à ramener le taux d'homocystéine dans le sang à des valeurs normales : moins de $6,3 \mu\text{mol/L}$. Par ailleurs, une carence en vitamines B6, B9 et B12 entraîne un taux élevé d'homocystéine.



β -Alanine (ou acide 3-aminopropanoïque, $C_3H_7NO_2$) : avec l'histidine, la β -alanine est un précurseur de la carnosine, dipeptide de formule brute $C_9H_{14}N_4O_3$, présent dans les tissus musculaires et cérébraux, et produit issu de la viande digérée. La carnosine a par ailleurs des propriétés anti-oxydantes qui expliquent son rôle favorable contre le vieillissement précoce, ainsi que contre les complications du diabète sucré telles que l'insuffisance rénale.

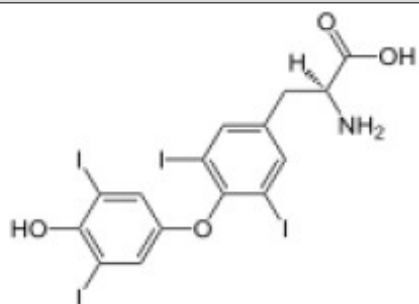
Une quantité importante de β -alanine entraîne une augmentation de carnosine dans les muscles ainsi qu'une baisse de la fatigue musculaire lors des efforts physiques intenses, réf. [22].



Acide para-aminobenzoïque (ou acide 4-aminobenzoïque, ou PABA, de formule brute $H_2NC_6H_4CO_2H$) : cet AA non protéinogène intervient dans certaines séquences du métabolisme, toutefois aucun résultat n'a montré de conséquences négatives en cas de sa carence.

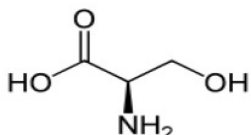
Principales sources de PABA : levure de bière, œufs, germe de blé, gelée royale, yaourt, banane...

Acides aminés non protéinogènes non incorporés dans les protéines



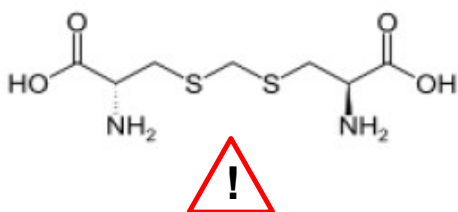
Thyroxine (ou T4, formule brute $C_{15}H_{11}I_4NO_4$) : cet AA non protéinogène est une hormone synthétisée dans la thyroïde sous l'action de l'iode. Pour cette synthèse, l'iode doit être oxydé par une enzyme, la thyroperoxydase, activée par la thyroestimuline (ou TSH). Une fois synthétisée, la T4 doit être désiodée en T3 par une autre enzyme, la thyroxine-5'-désiodase, pour agir en tant qu'hormone.

Comme toute hormone, la T4 joue un rôle important dans l'organisme : croissance, énergie, réponse au stress, etc. Sa carence peut avoir plusieurs causes : ablation de la thyroïde suite à un cancer, maladie auto-immune d'Ashimoto, etc. où il est nécessaire de compenser cette carence par un apport externe de L-thyroxine, ou lévothyroxine, qui est un isomère de la T4.

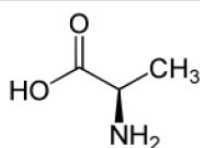


D-Sérine (ou R+-sérine, formule brute $C_3H_7NO_3$) : la D-sérine est synthétisée à partir de la L-sérine (ou sérine, ou S-sérine), acide aminé protéinogène (voir tableau 1), à partir de l'enzyme sérine racémase, par changement de sa stéréochimie.

La D-sérine a un rôle déterminant dans la production de neurotransmetteurs, concernant notamment la mémoire, ainsi que dans la plasticité neuronale.

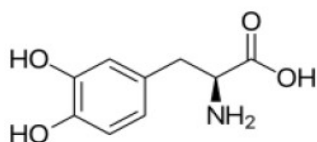


Acide djenkolique (ou acide jengkolique, nom tiré de l'arbre jengkol, formule brute $C_7H_{14}N_2O_4S_2$) : naturellement présent dans les graines de jengkol, cet AA est **toxique** pour l'homme ; il affecte les reins et le système urinaire de par sa forte acidité et ses précipités sous forme de cristaux qui peuvent provoquer des calculs rénaux. En cas d'ingestion, sans avoir fait bouillir les graines, il faut beaucoup s'hydrater et traiter à l'aide d'une solution basique, telle le bicarbonate de soude



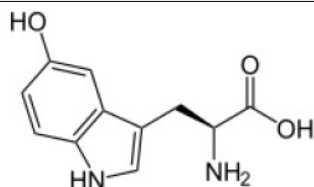
D-Alanine (formule brute $C_3H_7NO_2$) : citée pour mémoire, la D-alanine est l'énantiomère de l'AA essentiel alanine (voir plus haut) ; l'énantiomère d'une molécule est une molécule de même composition mais qui présente des propriétés de symétrie spatiale différente. La D-alanine est le produit de l'action d'une enzyme sur l'alanine (réf. [93])

La D-alanine contribue à la construction de la paroi des bactéries.



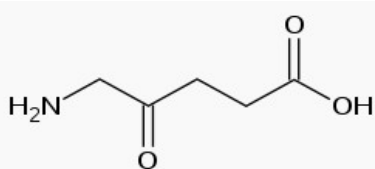
DOPA (ou 3,4-dihydroxyphénylalanine, $C_9H_{11}NO_4$) : cet AA possède 2 isomères, la L-dopa (isomère lévogyre, qui dévie à gauche le plan d'une lumière polarisée) et la D-dopa (isomère dextrogyre, qui dévie à droite le plan d'une lumière polarisée).

La L-dopa produit le neurotransmetteur dopamine par l'action d'une enzyme, la dopa-décarboxylase (réf. [93]). C'est pourquoi la L-dopa est employée pour traiter la maladie de Parkinson, responsable de la diminution de dopamine. Mais cet apport de dopamine entraîne une baisse de sérotonine, risquant ainsi d'occasionner des syndromes dépressifs, ces 2 neurotransmetteurs ayant des actions antagonistes.

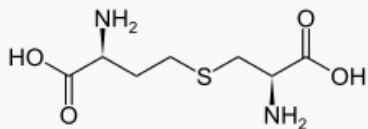


5-Hydroxy-L-Tryptophane (ou 5-HTP, $C_{11}H_{12}N_2O_3$) : cet AA est le précurseur du neurotransmetteur sérotonine. C'est pourquoi il est employé pour le traitement des dépressions sévères, des troubles obsessionnels compulsifs (TOC), des troubles anxieux, du stress post-traumatique... Il doit être accompagné des inhibiteurs sélectifs de recapture de la sérotonine (ISRS) afin d'empêcher sa recapture par le neurone pré-synaptique ; ainsi le 5-HTP peut transiter dans l'espace inter-synaptique et stimuler le neurone récepteur.

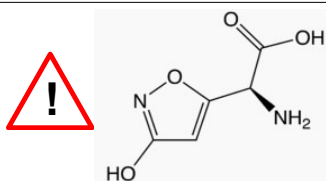
Acides aminés non protéinogènes non incorporés dans les protéines



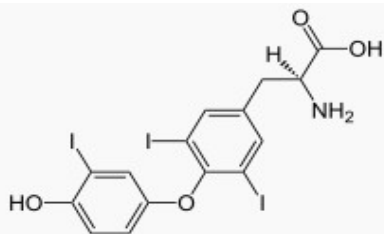
Acide aminolévulinique (ALA, $C_5H_9NO_3$) : cet AA participe à la formation de l'hème chez les mammifères, et de la chlorophylle chez les plantes. L'hème est un cofacteur enzymatique contenant un métal (généralement du fer) qui intervient dans la formation des protéines suivantes : hémoglobine (dans le sang), myoglobine (dans les muscles).



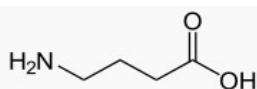
Cystathionine ($C_7H_{14}N_2O_4S$) : cet acide aminé est un intermédiaire dans la formation de la cystéine (qui, comme on l'a vu au tableau 1, a un rôle important dans la protection de l'organisme contre les oxydants), à partir de l'homocystéine et de la sérine.



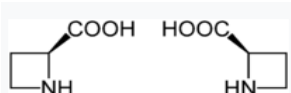
Acide iboténique ($C_5H_7NO_4$) : neurotoxique, présent dans certains champignons, provoquant des lésions cérébrales, avec hallucinations, vertiges, perte d'équilibre, contractions musculaires.



Triiodothyronine (T_3 , $C_{15}H_{12}I_3NO_4$) : c'est la plus importante des hormones thyroïdiennes, intervenant dans tous les processus physiologiques. L'antéhypophyse libère la thyrostimuline (TSH) qui intervient dans la production de T_3 (et de la prohormone T_4). Cette production est régulée : un excès de T_3 (ou T_4) dans le plasma sanguin tend à inhiber la production de TSH, et inversement, un déficit entraîne une surproduction de TSH. C'est pourquoi la mesure du taux de TSH dans le sang donne un bon indicateur de la production d'hormones thyroïdiennes, dans la surveillance des hypo ou hyperthyroïdie.



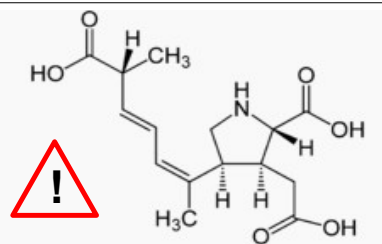
γ -Aminobutyrate (GABA, $C_4H_9NO_2$) : c'est un neurotransmetteur, modulant le fonctionnement du système nerveux central, et présent dans tout l'organisme ; le GABA limite l'activation excessive des neurones, notamment provoquée par le glutamate (voir tableau 1). Un déséquilibre entre GABA et le glutamate peut causer l'épilepsie, ou encore l'ischémie cérébrale (défaut des afflux sanguins). Le GABA assure aussi la croissance des neurones.



Les deux énantiomères L et D de Aze



Acide azétidine-2-carboxylique (Aze, $C_4H_7NO_2$) : De structure proche de celle de la proline (tableau 1), Aze peut prendre la place de celle-ci dans les protéines de certaines plantes : Liliacées telles que le Muguet commun, le Polygonatum officinal..., Fabacées, Betterave à sucre... Cette substitution entraîne chez la plante des effets très toxiques affectant sa croissance, et chez les animaux qui la consomment (canards, lapins, souris...).



Acide domoïque ($C_{15}H_{21}NO_6$) : c'est une toxine produite par des algues, telle que l'Algue rouge, et certaines Diatomées. Les anchois, sardines, fruits de mer qui se nourrissent des phytoplanctons contaminés par cet acide aminé, contaminent à leur tour l'homme qui les consomme. Une fois dans son organisme, l'acide domoïque amplifie les effets du glutamate sur le système nerveux, agissant alors comme neurotoxine causant : lésions cérébrales (hippocampe, amygdale...) par afflux excessif de calcium causant la destruction des cellules nerveuses, atteinte de la mémoire, et même la mort.

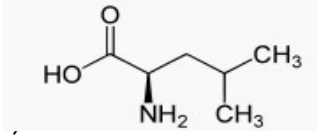
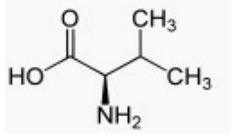
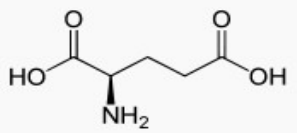
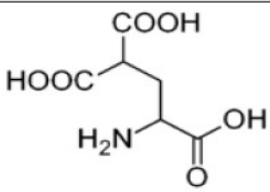
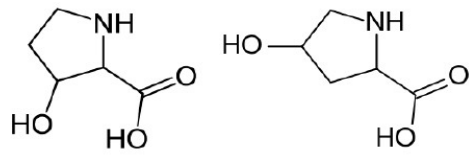
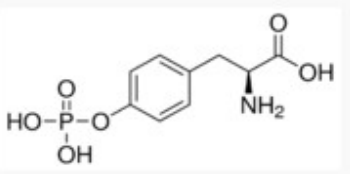
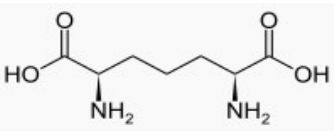
Acides aminés non protéinogènes non incorporés dans les protéines	
 Énantionère D ou R-Leucine	D-Leucine (ou R-Leucine) : c'est l'énantiomère D ou R de la Leucine, l'autre énantiomère, S ou L-Leucine étant un des AA protéinogènes (voir tableau 1)
 Énantionère D ou R-Valine	D-Valine (ou R-Valine) : c'est l'énantiomère D ou R de la Valine, l'autre énantiomère L ou S-Valine étant un des AA protéinogènes (voir tableau 1)
 Énantionère acide D ou R-glutamique	Acide D ou R-glutamique : c'est l'énantiomère D ou R de l'acide glutamique (ou glutamate), l'autre énantiomère acide L ou S-glutamique étant un des AA protéinogènes (voir tableau 1)

Tableau 4 – Quelques acides aminés non protéinogènes non incorporés dans les protéines

Acides aminés non protéinogènes incorporés dans les protéines	
	γ-Carboxyglutamate (ou acide carboxyglutamique, ou acide gamma-carboxyglutamique, formule brute $C_6H_9NO_6$) : cet AA non protéinogène est présent dans les protéines participant à la fixation du calcium (protéines des os, protéines de la coagulation sanguine). La vitamine K (voir plus haut) participe à la carboxylation du glutamate : retrait d'un hydrogène H au carbone C n°4 du glutamate, et transfert en celui-ci de CO_2 issu d'un ion bicarbonate. Le résultat de cette transformation est l'acide carboxyglutamique, qui est intégrée dans une prothrombine (notée prothrombine Gla), l'autre prothrombine contenant le glutamate (prothrombine Glu). Rappel (réf. [23]) : une prothrombine est une protéine précurseur de l'enzyme thrombine, ou facteur II de coagulation, ayant un rôle déterminant dans la coagulation sanguine et la digestion des viandes.
 Isomères : à gauche : 3-hydroxyproline à droite : 4-hydroxyproline	Hydroxyproline (formule brute $C_5H_9NO_3$) : cet AA non protéinogène est un dérivé de l'AA proline (voir plus haut), sous l'action d'une enzyme, la prolyl hydroxylase. Il existe sous forme de 8 isomères répartis en 3-hydroxyproline et 4-hydroxyproline. L'hydroxyproline intervient dans la consolidation des chaînes de polypeptides : en conséquence les protéines structurales, telles le collagène, sont rendues plus résistantes aux efforts mécaniques. L'hydroxyproline empêche aussi les enzymes protéases de détruire les protéines.
	O-Phosphotyrosine ($C_9H_{12}NO_6P$) : intervient dans l'activation des plaquettes dans le sang et la régénération du foie
	Acide diaminopimélique (DAP, $C_7H_{14}N_2O_4$) : intervient dans la formation et la croissance des parois bactériennes

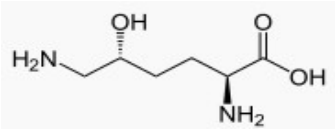
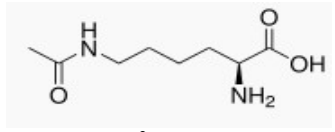
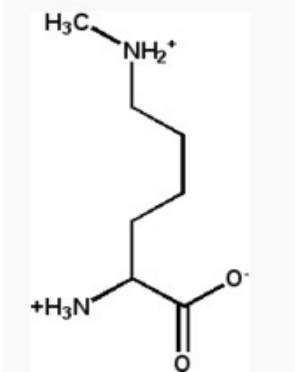
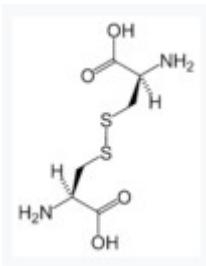
Acides aminés non protéinogènes incorporés dans les protéines	
	Hydroxylysine (C ₆ H ₁₄ N ₂ O ₃) : une de ses formes intervient dans le collagène
 Isomère N⁶-Acétyl-L-lysine	Acétyllysine (C ₈ H ₁₆ N ₂ O ₃) : Elle a deux isomères : N ² et N ⁶ . L'isomère N ⁶ intervient dans l'expression des gènes dans les chromosomes.
 N⁶-méthyl-L-lysine	Méthyllysine (C ₇ H ₁₆ N ₂ O ₂) : Sous la forme N ⁶ -méthyl-L-lysine, existe dans les histones (protéines présentes dans les chromosomes, dans lesquels elles assurent l'enroulement des ADN)
	Cystine (C ₆ H ₁₂ N ₂ O ₄ S ₂) : formé à partir de deux cystéines (tableau 1) liées par pont disulfure. Participe à divers effets: - indésirables : calculs rénaux, mauvaise haleine - thérapeutiques : favorise, en association avec la vitamine B6, la croissance des cheveux et des ongles ; contribue à la cicatrisation de la cornée.

Tableau 5 – Quelques acides aminés non protéinogènes incorporés dans les protéines
(Le nombre total de tels acides aminés est d'environ 140)

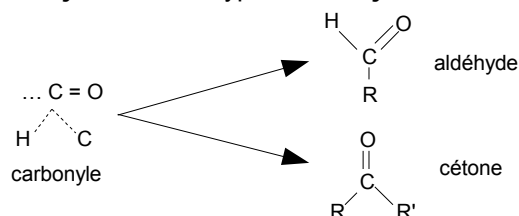
Pour aller plus loin sur les protéines et les acides aminés, voir référence [1].

4 - Glucides

4-1 – Définition et nomenclature

Les glucides sont des molécules constituées d'atomes de carbone, d'oxygène et d'hydrogène, de formule brute C_n(H₂O)_p, où n ≥ 3 (n étant le nombre d'atomes de carbone). Ils sont porteurs :

- de groupements **hydroxyle** -OH,
- et d'un groupement **carbonyle**, de deux types : **aldéhyde** -CHO ou **cétone** -C=O :



où R et R' sont des chaînes carbonées.

Nomenclature des glucides :

En représentation bidimensionnelle (projection de Fischer), on représente le glucide comme suit :

► On place en haut la fonction aldéhyde ou cétone

- Énantiomères (isomères optiques) D ou L : isomère D $\begin{array}{c} | \\ -C-OH \\ | \end{array}$, isomère L $\begin{array}{c} | \\ OH-C- \\ | \end{array}$ où C est le carbone le plus éloigné de la fonction carbonyle.
- Le carbone le plus oxydé (i.e. portant la fonction aldéhyde) est noté carbone n°1 ; la numérotation de la chaîne carbonée commence par le carbone C n°1.
- En représentation perspective de Haworth, et pour $n > 4$, la structure du glucide est cyclique. Compte tenu de la règle de numérotation, on a donc, par exemple pour le glucose, les deux représentations (figure 3) :

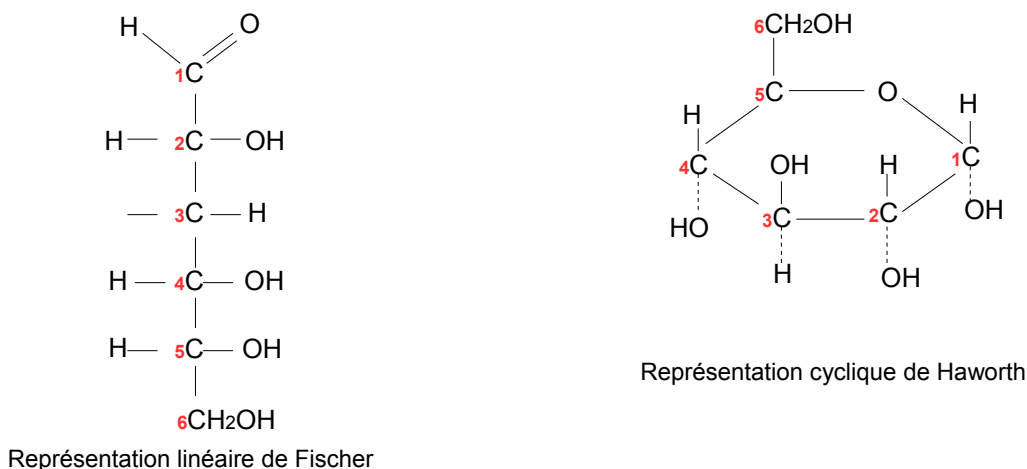
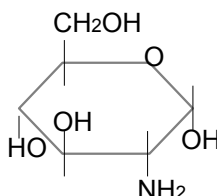


figure 3 : représentations du D-Glucose : $n = 6$; les numéros en rouge repèrent les atomes de carbone en commençant par celui de la fonction aldéhyde $-COH$, le carbone n°6 est celui de la fonction alcool primaire (ou hydroxyle) CH_2OH ; dans la représentation cyclique, les atomes de carbone forment un hexagone, les liaisons en trait plein sont au-dessus du plan hexagonal, celles en pointillés sont en-dessous du plan hexagonal

- **Sucres aminés** : Ils sont formés à partir de saccharides dont la fonction hydroxyle $-OH$ est remplacée par le groupement amine $-NH_2$. Exemple de la D-Glucosamine (1) :

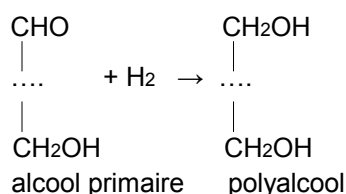


Les sucres aminés sont présents dans la chitine (2), le lait maternel, l'humeur vitrée de l'œil...

4-2 - Réactions chimiques liées aux différentes fonctions présentes dans les glucides

- La fonction aldéhyde $-CHO$ favorise les réactions suivantes :

- Réduction :



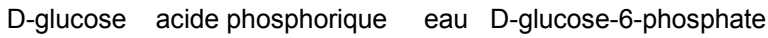
- Oxydation (par exemple, par un acide) : la fonction $-CHO$ est oxydée en $-COOH$, et si l'oxydant est fort, la fonction alcool primaire CH_2OH est aussi oxydée en $-COOH$.

- La fonction alcool CH_2OH favorise l'estérification :

par exemple le glucose et l'acide phosphorique donnent de l'eau et le glucose 6 phosphate qui est un ester :

1 Les atomes C et H seuls ne sont pas représentés (selon la convention en usage).

2 La chitine est un polysaccharide aminé de formule brute $(C_8H_{13}NO_5)_n$, on la trouve dans les champignons macroscopiques, les lichens, levures, dans l'exosquelette des insectes, la carapace des crustacés...



► **Monosaccharides** (ou **Oses**) : ce sont des glucides non hydrolysables, formés d'une chaîne carbonée non ramifiée.



aldose



cétose

page 22/49

formation d'eau H₂O) entre :

- la fonction hydroxyle -OH portée par le carbone anomérique de la fonction hémiacétalique (il s'agit du carbone n°1 pour un aldose, ou du carbone n°2 pour un cétose, cf. figure 4),
- et l'hydrogène d'une autre molécule.

S'agissant de deux monosaccharides, cette liaison résulte donc de l'élimination de H₂O entre le groupement hydroxyle de l'un et la fonction hémiacétal de l'autre, ou entre les fonctions hémiacétal des deux. L'inverse de cette réaction est une hydrolyse du disaccharide.

Il y a deux configurations de liaison glycosidique selon l'orientation (ou stéréochimie) du groupement hydroxyle porté par le carbone anomérique : si ce groupement -OH est orienté vers le haut dans la représentation de Haworth, le monosaccharide est un β-ose, s'il est orienté vers le bas c'est un α-ose. La liaison glycosidique est dite « alpha » si les deux glucides ont même stéréochimie (les deux sont des β-oses, ou bien les deux sont des α-oses), et elle est dite « bêta » si les deux glucides n'ont pas la même stéréochimie. Exemples de désignation « alpha » ou « bêta » de liaison glycosidique dans les disaccharides obtenus à partir de deux monosaccharides (tableau 6) :

monosaccharides		disaccharide	liaison glycosidique
α-D-glucose	β-D-glucose	β-maltose	β
α-D-glucose	α-D-glucose	α-maltose	α
β-D-glucose	β-D-glucose	β-cellobiose	α
β-D-galactose	α-D-glucose	α-lactose	β
α-D-glucose	β-D-fructose	saccharose	β

Tableau 6 : configurations de la liaison glycosidique de quelques disaccharides

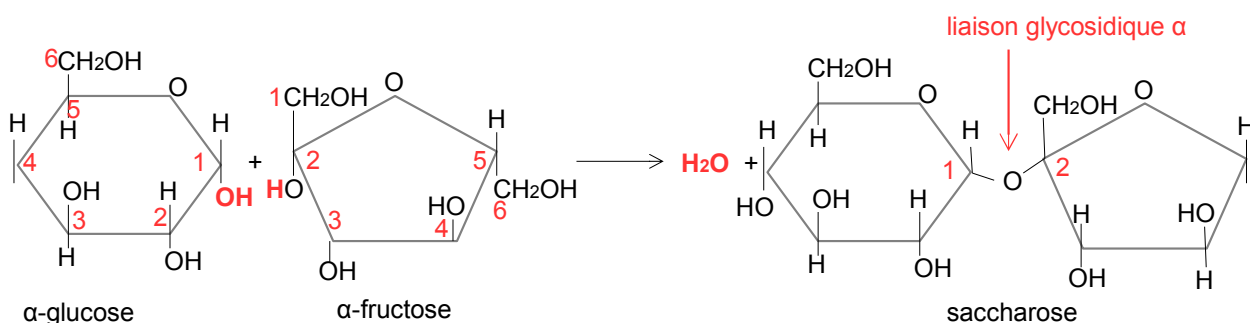


figure 6 : formation du saccharose (disaccharide) avec le glucose et le fructose (monosaccharides)

Une liste de disaccharides, avec indication des monosaccharides à partir desquels ils sont formés, est présentée en référence [2].

Propriétés des oligosaccharides :

- solubles dans l'eau,
- incolores, inodores, goût sucré,
- structures cristallines
- propriétés et réactivité proches de celles des monosaccharides

Principales sources : présents chez les animaux et les végétaux (betterave à sucre, canne à sucre...) sous forme libre ou liée.

Remarques :

- Pyranoses : ce sont des oligosaccharides cycliques à 6 côtés. Exemple : β-D-glucose, encore appelé β-D-glucopyranose.
- Furanoses : oligosaccharides à 5 côtés.

► **Polysaccharides** : Glucides constitués de plus de 8 unités constitutives (100 à 3000 monosaccharides). Exemples : amidon, cellulose... Les unités sont reliées par une liaison glycosidique. Les polysaccharides sont en majorité des structures linéaires (non cycliques).

Deux sortes de polysaccharides :

- Polysaccharides homogènes : leurs unités monosaccharides sont identiques. Exemples : cellulose, amidon, glycogène...
- Polysaccharides hétérogènes : leurs unités monosaccharides sont différentes.

Principales sources : domaines animal et végétal. Ce sont principalement des éléments de structure (par

exemple, cellulose pour les plantes), et de réserve d'énergie (par exemple, amidon pour les plantes et glycogène pour les animaux).

Exemples de polysaccharides : voir référence [2].

► **Hétérosides** : Ce sont des glucides obtenus par l'association d'un glucide et d'un élément non glucidique (aglycone ou génine) reliés par une liaison glycosidique. Ils sont hydrolysés en donnant cet élément non glucidique et la totalité ou une partie des unités monosaccharides :

hétéroside → élément non glucidique + N unités monosaccharides

La structure aglycone peut être porteuse d'une fonction alcool, phénolique, soufrée ou azotée (amine...).

Exemples d'hétérosides : voir référence [2].

Pour aller plus loin sur les glucides, voir référence [2].

5 - Lipides

5-1 – Définition et classification

La définition et la classification des lipides sont complexes. Cependant il est universellement adopté que les lipides rassemblent les acides gras, leurs dérivés et leurs esters (recommandation IUPAC)⁽³⁾, c'est-à-dire les produits de la réaction d'un acide gras avec un alcool, ou avec une molécule portant une fonction qui peut réaliser l'estérification, comme c'est le cas de la fonction hydroxyle -OH d'un stérol (réf. [24]) :

Lipides = {acides gras} ou {dérivés d'acides gras} ou {esters d'acides gras}
avec : ester d'acide gras = acide gras + alcool (ou équivalent)

Les lipides ont en commun la propriété d'être hydrophobes (donc insolubles dans l'eau), à des degrés divers, mais solubles dans les solvants organiques apolaires (benzène, éther, chloroforme, cétone...), et ils sont moins denses que l'eau.

Les lipides se répartissent en lipides simples et lipides complexes :

► **Lipides simples** (ou homolipides) : composés exclusivement de carbone C, hydrogène H, oxygène O (exemple : glycérides)

► **Lipides complexes** (ou hétérolipides) : composés aussi de phosphore P ou d'azote N (exemple : sphingolipides)

La **classification standard** propose huit catégories de lipides, mais ces catégories peuvent se répartir aussi en lipides simples et lipides complexes et selon la nature de la molécule (généralement alcool) qui intervient dans l'estérification de l'acide gras, ce qui donne (liste non exhaustive) ⁽⁴⁾ (voir par exemple réf. [25], [91]) :

► **Acides gras (et leurs dérivés)**

► **Lipides simples** :

- acylglycérols, ou glycérides
- cérides*
- stérides ou stérols
- phytol esters d'acides gras* (réf. [25])

► **Lipides complexes** :

- sphingolipides
- polycétides, ou polykétides
- prénols, ou lipides isopréniques (réf. [26])
- saccharolipides, ou glycolipides (qui sont des hétérosides, voir référence [2])
- phosphoacylglycérols, ou phosphoglycérides, glycérophospholipides, phospholipides
- galactolipides* (réf. [25])

Chaque catégorie se subdivise en un nombre plus ou moins important de sous-catégories.

Le caractère hydrophobe d'un lipide coexiste avec le caractère hydrophile : on dit que la molécule lipide est amphiphile ou amphipathique ou amphipolaire. En effet, les lipides sont des molécules bipolaires : une extrémité est un pôle hydrophile, dû à sa fonction acide organique -COOH, et la majeure partie de la molécule est un pôle hydrophobe, dû à la chaîne carbonée.

La propriété amphiphile des lipides a des conséquences importantes sur la structure du vivant : en environnement aqueux, cette propriété a pour effet que les lipides se structurent spontanément en des films mono-couche, des films bi-couche, des vésicules (vésicules simples ou liposomes...), des micelles, etc., structures qui permettent de séparer, isoler, stocker par les membranes des composés aux rôles biologiques très variés qui interviennent dans les milieux intracellulaires ou extracellulaires.

3 IUPAC : International Union of Pure and Applied Chemistry

4 Les lipides marqués d'un * n'apparaissent pas explicitement dans la classification standard.

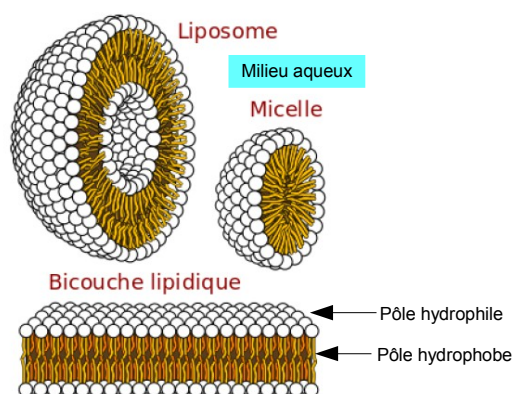


figure 7 : formation de vésicules (liposome...), micelles, bicouches par les lipides, due à leur caractère amphiphile (source : Wikipedia)

Dans les organismes vivants, les lipides remplissent diverses fonctions :

- Fourniture d'énergie : la dégradation des lipides dégage de l'énergie, 37,62 J/g de lipide, ce qui fait des lipides (surtout les triglycérides) la principale source d'énergie ; ils représentent environ 1/5 de la masse corporelle chez l'être humain.
- Formation des structures : membranes, vésicules, inclusions cytoplasmiques... comme mentionné plus haut.
- Signalisation cellulaire lipidique (notamment par lipoprotéines) : le lipide se fixe sur une protéine cible, laquelle, à son tour, produit des messages chimiques en fonction des propriétés résultant de son interaction avec le lipide.
- Précurseurs de certaines biomolécules : hormones (réf. [94], vitamines (point 2), prostaglandines (annexe 1 de la référence [3]).
- Réserves d'énergie : stockage de l'énergie qui sera utilisée dans le métabolisme lors de sa libération par β -oxydation (dégradation des lipides en acétyl-CoA ⁽⁵⁾ dans le cycle de Krebs, et contribution à la chaîne respiratoire)⁽⁶⁾. Un déficit dans le cycle de Krebs entraîne diverses pathologies (v. par ex. réf. [27]).

5-2 - Acides gras

En tant que composés organiques, ce sont des acides carboxyliques R-COOH. Ils sont constitués d'une longue chaîne hydrocarbonée linéaire R. La formule brute générale est $C_nH_mO_2$, où le nombre n d'atomes de carbone C est généralement pair.

Les acides gras peuvent être :

- hydroxylés : unis au groupement hydroxyle -OH (configuration rare pour les acides gras)
- ramifiés (rare)
- saturés (pas de double liaison carbone-carbone C=C)
- insaturés (une ou plusieurs doubles liaisons carbone-carbone C=C)

► Acides gras saturés :

Formule brute : $C_nH_{2n}O_2$, donc le nombre d'atomes d'hydrogène est $m = 2n$, et la formule semi-développée est : $CH_3 - (CH_2)_{n-2} - COOH$ où la chaîne carbonée R est donc $CH_3 - (CH_2)_{n-2}$.

Il est alors d'usage de noter les acides gras saturés par $(C_n : 0)$ où n est le nombre total de carbone et x = 0 le nombre de doubles liaisons carbone-carbone (nul ici).

Exemples :

- acide palmitique, ou acide hexadécanoïque ($C_{16}:0$) : $CH_3 - (CH_2)_{14} - COOH$, n = 16 (figure 8)
- acide stéarique, ou acide octodécanoïque ($C_{18}:0$) : $CH_3 - (CH_2)_{16} - COOH$, n = 18
- acide butyrique, ou acide butanoïque ($C_4:0$) : $CH_3 - (CH_2)_2 - COOH$, n = 4 ; c'est le premier acide gras saturé.

5 L'acétyl-CoA est l'acide acétique activé, c'est-à-dire uni à la coenzyme A qui permet le transfert du groupement acyle RCO- dans les divers processus métaboliques : β -oxydation, cycle de Krebs...

6 Le cycle de Krebs (ou cycle des acides tricarboxyliques) est un processus métabolique propre aux organismes aérobies. Il permet l'oxydation des groupes acétyle provenant de la dégradation des lipides, glucides et protéines. Cette oxydation conduit à la formation de molécules pouvant transférer l'énergie récupérée qui circulent via la chaîne respiratoire.

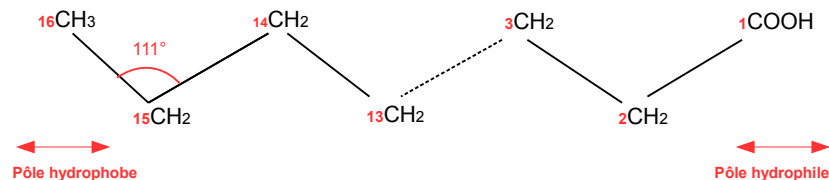


figure 8 : acide palmitique

► Acides gras insaturés :

Formule brute : $C_nH_{2(n-x)}O_2$, donc le nombre d'atomes d'hydrogène est $m = 2(n-x)$, où x est le nombre de doubles liaisons carbone-carbone.

La présence de double liaison $C=C$ entraîne deux isoméries de la molécule : cis et trans ⁽⁷⁾.

Lorsque $x = 1$ (une seule double liaison $C=C$), l'acide gras insaturé est dit mono-éthylénique ou mono-insaturé. Si $x > 1$, il est dit poly-éthylénique ou polyinsaturé; dans ce cas, sauf pour des végétaux, les doubles liaisons ne sont pas contiguës, mais séparées par des séquences $-CH_2-$.

Dans la nomenclature des acides gras insaturés, on ajoute la position de la ou des doubles liaisons en comptant à partir du carbone n°1 de la fonction carboxylique $-COOH$. Les doubles liaisons (ou insaturations) sont repérées, dans la nomenclature biochimique, par ω -a,b,c... où a, b, c... sont leurs positions, ou encore en mentionnant la première double liaison ω -a, en partant du côté opposé à la fonction carboxylique. Avec cette notation on obtient des familles d'acides gras insaturés désignées par ω (comme on le rencontre en nutrition lorsqu'on parle de corps gras oméga-3, oméga-6, etc.).

Exemples :

- Acide oléique : acide gras mono-insaturé, formule brute et semi-développée $C_{18}H_{34}O_2$ et $CH_3-(CH_2)_7CH=CH(CH_2)_7-COOH$ de désignation IUPAC acide cis-9-octadécamonoénoïque, désignation biochimique C18:1 ω -9 (n = 18 atomes de carbone, 1 seule double liaison située au carbone n°9) (figure 9). C'est la forme insaturée de l'acide stéarique. L'acide oléique se trouve dans un grand nombre d'huiles animales et végétales (huile d'olive, huile de pépin de raisin, graisse de canard...). C'est un aliment énergétique.

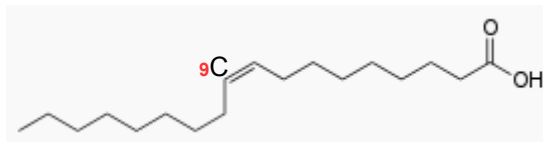


figure 9 : acide oléique (les C et CH_p sont sous-entendus)

- Acide linoléique (figure 10) : acide gras polyinsaturé, de la famille oméga-6, formule brute et semi-développée $C_{18}H_{32}O_2$ et $H_3C-(CH_2)_4-CH=CH-CH_2-CH=CH-(CH_2)_7-COOH$, de désignation IUPAC acide (9Z,12Z)-octadéca-9,12-diénoïque, désignation biochimique C18:2 ω -6 (n = 18 atomes de carbone, 2 doubles liaisons, la première étant au carbone n°6) (figure 10). L'acide linoléique a un rôle important dans la formation des membranes cellulaires. Il ne peut pas être synthétisé dans l'organisme humain, sa provenance ne peut qu'être d'origine alimentaire (c'est donc un acide gras essentiel). On le trouve dans l'huile de pépin de raisin, l'huile de carthame (plante oléagineuse), l'huile de colza, l'huile de maïs...

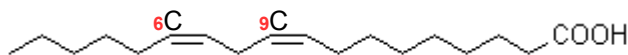


figure 10 : acide linoléique

- Acide arachidonique (figure 11) : acide gras polyinsaturé, de la famille ω -6, formule brute $C_{20}H_{32}O_2$ (figure 11). Désignation IUPAC : acide(5Z,8Z,11Z,14Z)-eicosa-5,8,11,14-tétraénoïque ; désignation biochimique C20:4 ω -6 (n = 20 atomes de carbone, 4 doubles liaisons, la première étant au carbone n°6). L'organisme des mammifères peut produire l'acide arachidonique à partir de l'acide linoléique (voir ci-dessus); si ce dernier est insuffisant dans l'organisme, l'acide arachidonique doit être fourni par l'alimentation. Une de ses fonctions importantes est d'être le précurseur des eicosanoïdes, qui interviennent directement dans la production de certaines hormones dites lipophiles, c'est-à-dire pouvant traverser les membranes plasmiques des cellules : prostaglandines, thromboxanes, etc. participent aux réponses inflammatoires et aux contractions des muscles lisses ; les eicosanoïdes des séries oméga-3 et 6 interviennent ont une action dans les maladies cardiovasculaires et le diabète. On trouve l'acide arachidonique dans les huiles de tournesol et de maïs.

7 Lorsque les groupes fonctionnels de part et d'autre de la chaîne principale sont du même côté, l'isomère est « cis », il est « trans » quand ces groupes fonctionnels ne sont pas du même côté. Pour les acides gras insaturés, cela revient à distinguer les positions relatives des fonctions $-COOH$ et $-CH_3$ par rapport à la chaîne hydrocarbonée. Ces configurations induisent des propriétés différentes de la molécule. Les acides gras insaturés naturels sont généralement de configuration cis : celle-ci tend à courber la chaîne hydrocarbonée.

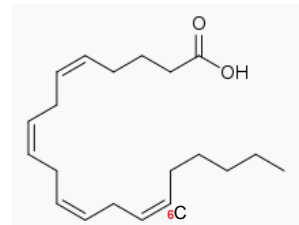
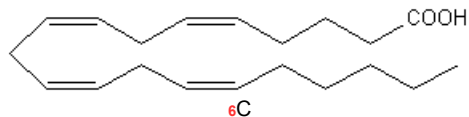
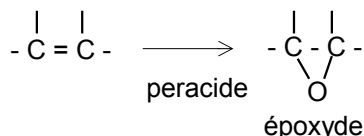


figure 11 : représentations de l'acide arachidonique

• Conséquences des doubles liaisons sur la réactivité chimique des acides gras insaturés :

Les doubles liaisons C=C rendent possibles l'addition de H₂ (hydrogénation) qui a pour effet le durcissement de l'acide gras saturé obtenu : par exemple, les huiles se solidifient et ont leurs points de fusion qui augmente (comme c'est le cas pour la margarine).

Les doubles liaisons peuvent subir une oxydation par l'action d'un peracide ⁽⁸⁾, en donnant une fonction époxyde (molécule comportant un oxygène lié à deux carbone liés simplement) :



Les doubles liaisons C=C peuvent être coupées par le permanganate de potassium KMnO₄ qui est un oxydant fort, transformant l'acide gras insaturé en un ou plusieurs acides carboxyliques.

Les acides gras insaturés peuvent aussi subir une auto-oxydation, ce qui cause leur rancissement ; par exemple l'oxygène de l'air produit le rancissement des huiles qui se traduit par une odeur et un goût caractéristiques. L'oxydation rompt la double liaison, et le processus aboutit à un aldéhyde, responsable de ces odeurs. Plus le nombre de doubles liaisons est élevé (x grand), plus l'acide gras insaturé est fragile et subit d'autant plus facilement le rancissement. C'est pourquoi il faut éviter l'usage d'huiles polyinsaturées pour les fritures alimentaires.

Pour aller plus loin sur les lipides et acides gras, voir référence [3].

6 – Oligoéléments et minéraux

6-1 – Généralités

Dans l'organisme vivant, les éléments minéraux, c'est-à-dire non organiques, sont sous forme de sels minéraux : ce sont des ions, porteurs d'une charge électrique soit positive (ce sont alors des cations), soit négative (ce sont alors des anions). Par exemple, le calcium est sous forme d'ions Ca²⁺, le chlore sous forme d'ions Cl⁻. Les éléments minéraux sont indispensables pour le fonctionnement de l'organisme où ils sont présents en quantité relativement faible. Ils sont dits **essentiels** lorsque leur carence, ou au contraire leur excès, produisent des troubles importants de l'organisme.

Les fonctions des minéraux dans l'organisme sont principalement dues à leur grande faculté de fixation sur les protéines, donnant des métalloprotéines qui interviennent de manière importante dans les métabolismes. En effet les ions ne sont pratiquement jamais à l'état libre dans l'organisme.

Selon l'ordre de grandeur de leur concentration dans l'organisme humain, les éléments minéraux se répartissent en deux grandes familles : les macro-éléments (ou éléments minéraux majeurs, ou simplement, minéraux), et les oligo-éléments (réf. [28], [29], [30]) :

6-2 – Macro-éléments

Les minéraux sont présents dans l'organisme avec une concentration en poids corporel d'au moins 0,1 g/kg et nécessitent un apport journalier de l'ordre de 1 mg/kg/jour. Ils sont présents sous formes d'électrolytes, d'oxydes, de sels minéraux. Ce sont principalement le calcium Ca, le magnésium Mg, le phosphore P, le potassium K, le sodium Na, le soufre S. Tous ces macro-éléments sont essentiels.

Quelques propriétés des macro-éléments (les concentrations, notées c, ainsi que les apports journaliers moyens requis, sont exprimées en g/kg du poids corporel et en pourcentages) :

- Oxygène O : c = 614 g/kg (soit 61,4%)
- Carbone C : c = 228,6 g/kg (soit 22,86%). Apport journalier requis : 4,29 g/kg.

8 Peracide, ou acide peroxyacide, ou acide peroxylique : molécule formée d'un groupement peroxyde lié à un atome d'hydrogène par l'un des atomes d'oxygène, l'autre atome d'oxygène étant lié à un atome de carbone, lui-même lié par double liaison à un atome d'oxygène, et par simple liaison à une chaîne carbonée R, ce qui donne la formule semi-développée : R-(C=O)-OOH

- Hydrogène H : c = 100 g/kg (soit 10%)
- Azote N : c = 25,7 g/kg (soit 2,57%). Apport journalier requis : 0,07 g/kg.
- Calcium Ca : c = 14,29 g/kg (soit 1,43%). Apport journalier requis : 0,014 g/kg. Il intervient dans la composition du squelette, des dents, dans la coagulation du sang, la contraction musculaire y compris cardiaque, dans les échanges cellulaires, la perméabilité des membranes, la libération d'hormones, l'influx nerveux, l'équilibre acido-basique (pH). Voir réf. [4].
- Phosphore P : c = 11,14 g/kg (soit 1,11%). Apport journalier requis : 0,011 g/kg. Il intervient dans la composition du squelette, la synthèse des phospholipides des membranes cellulaires, dans la synthèse de l'adénosine triphosphate ATP (transporteur d'énergie dans les cellules), l'ADN, l'ARN, dans l'équilibre acido-basique. Voir réf. [4].
- Potassium K : c = 2 g/kg (soit 0,2%). Apport journalier requis : 0,03 g/kg. Il intervient dans les cellules des muscles, les hématies, les neurones, l'équilibre chimique interne des milieux cellulaires. Voir référence [4].
- Soufre S : c = 2 g/kg (soit 0,2%) (réf. [4]).
- Sodium Na : c = 1,43 g/kg (soit 0,14%). Apport journalier requis : 0,014 g/kg. En association avec le chlore (chlorure de sodium NaCl), intervient dans la pression osmotique des liquides extracellulaires. La carence en sodium conduit à la neurasthénie, la fatigue, la déshydratation (réf. [4]).
- Chlore Cl : c = 1,36 g/kg (soit 0,14%).
- Magnésium Mg : c = 0,27 g/kg (soit 0,03%). Apport journalier requis : 0,006 g/kg. Intervient dans l'activation des enzymes en grande partie dans les tissus osseux ; il contribue à la régulation du métabolisme des glucides et des lipides des tissus musculaires, cardiaques et nerveux (réf. [4]).

6-3 – Oligo-éléments

Par définition leur concentration dans l'organisme est inférieure ou égale à 1 ppm (c'est-à-dire 1 mg/kg du poids corporel), réf. [31].

► **Oligo-éléments essentiels** : ce sont des oligo-éléments dont la carence ou bien l'excès produisent des troubles importants de l'organisme. Plus précisément, ils remplissent les **critères de Cotzias** (réf. [29]) :

- critère d'universalité : ils sont présents dans tous les tissus sains de l'organisme ;
- critère d'homéostasie : ils sont présents avec une concentration relativement constante dans tous les tissus vivants.
- critère de carence : leur carence entraîne des dysfonctionnements structuraux et fonctionnels similaires dans plusieurs espèces vivantes.
- critère du seul apport : le seul apport suffisant de l'élément carencé prévient ou guérit les dysfonctionnements causés par la carence.

Il existe 15 oligo-éléments classés essentiels : chrome Cr, cobalt Co, cuivre Cu, étain Sn, fer Fe, fluor F, iode I, lithium Li, manganèse Mn, molybdène Mo, nickel Ni, sélénium Se, silicium Si, vanadium V, zinc Zn.

► **Oligo-éléments non essentiels** : ils n'ont pas d'action physiologique qui leur soit spécifiquement associée. Ils ne sont pas présents naturellement dans l'organisme. Cependant, ils possèdent des propriétés pharmacologiques démontrées pour traiter des troubles dans le cadre de l'oligothérapie catalytique (thérapie où ces oligo-éléments servent de catalyseurs de certaines réactions biochimiques).

Ce sont principalement : aluminium Al, argent Ag, bismuth Bi, or Au.

Quelques propriétés des **oligo-éléments essentiels** (les concentrations sont exprimées en pourcentages relatifs au poids corporel) :

- Iode I : c = 0,1%. Il contribue à la production des hormones thyroïdiennes. La carence conduit au nanisme, goitre, déficit intellectuel (réf. [4]).
- Fer Fe : c = 0,1%. Il contribue à l'hémoglobine, la myoglobine (protéine de l'oxygénation des muscles), certaines enzymes. La carence conduit à l'anémie (réf. [4]).
- Chrome Cr : c < 0,01%. Il est présent dans les enzymes et contribue à leur activation.
- Cobalt Co : c < 0,01% (réf. [4]).
- Cuivre Cu : c < 0,01%. Il intervient dans les enzymes cellulaires et dans l'hématopoïèse (formation des cellules du sang). Sa carence conduit à des déficits immunitaires (réf. [4]).
- Manganèse Mn. Il intervient dans la constitution de la pyruvate-carboxylase (réf. [4]).
- Fluor F. Il fait partie de la constitution de l'émail des dents. La carence entraîne les caries (réf. [4]).
- Sélénium Se. Il intervient dans les enzymes anti-oxydation. Il diminue les radicaux libres et a des effets stimulants du système immunitaire (réf. [4]).
- Zinc Zn. Il contribue aux activités de 200 enzymes, dont la protection contre les radicaux libres, la synthèse protéique qui intervient dans le renouvellement cellulaire, la cicatrisation, l'immunité, le système pileux et la production du sperme). Conséquence importante de la carence : maladies de peau (réf. [4], [32]).

Quelques propriétés des **oligo-éléments non essentiels** :

• Aluminium Al : employé, entre autre, dans les traitements du retard psychomoteur de l'enfant (réf. [4]).

• Argent Ag : employé, entre autre, dans les traitements des états grippaux et inflammatoires des voies aériennes supérieures.

• Bismuth Bi : employé dans les traitements des manifestations inflammatoires de la sphère ORL.

• Or Au : utilisé pour ses propriétés stimulantes de l'immunité contre les rhumatismes inflammatoires.

• **Toxicité des oligo-éléments** : L'effet d'un oligo-élément essentiel dépend directement de son dosage. Pour certains oligo-éléments essentiels, la carence, tout autant que l'excès, conduit au risque de causer la mort chez l'homme. Ce sont : l'iode, le fer, le cuivre, le zinc, le sélénium, le chrome, le molybdène et le fluor.

Les oligo-éléments dont la carence conduit à des risques moindres (du moins pas observés chez l'homme) sont : le manganèse, le silicium, le vanadium, le nickel, l'étain, le cobalt.

Pour aller plus loin sur les oligoéléments et les minéraux, voir référence [4].

7 - Fibres alimentaires

7-1 – Définition, familles, critères de teneur et allégations nutritionnelles des fibres alimentaires

La définition officielle des fibres alimentaires, les critères de teneur en fibres des aliments, et les allégations nutritionnelles ont évolué au cours des années, et présentent même des différences selon les organismes de sécurité alimentaire de divers pays. Dans le présent document, cette présentation très simplifiée s'appuie sur les définitions précises et réglementaires de l'ANSES (réf. [33], et [34]).

Dit simplement, les fibres alimentaires sont des nutriments que les enzymes du système digestif humain ne peuvent pas digérer.

Ce sont des glucides (voir point 4 et réf. [2]) : majoritairement des polysaccharides à longue chaîne, d'origine végétale. Plus précisément, il s'agit de polymères glucidiques de degré de polymérisation $DP \geq 3$ ⁽⁹⁾, généralement présents dans les parois végétales : cellulose, hémicelluloses, substances pectiques, autres polysaccharides ou oligosaccharides d'origine végétale (gommes végétales, inuline, mucilages, amidons résistants...), réf. [40]. Ils sont parfois associés, dans la plante, à la lignine et d'autres constituants non glucidiques : polyphénols, cires, saponines, cutine, phytates, phytostérols...

Le degré de polymérisation DP comme facteur déterminant dans la reconnaissance d'une fibre alimentaire recommandée pour sa capacité nutritionnelle fait partie des critères réglementaires pour les raisons suivantes. Pour $3 \leq DP < 12$, il est établi que les fibres présentes dans les plantes, une fois ingérées par le système digestif humain, sont très fermentescibles (capacité à produire la fermentation) et ont un rôle prébiotique important (capacité à renforcer ou maintenir la « flore » intestinale). Pour $DP < 3$, en revanche ce n'est plus le cas : pour $DP = 1$ la fibre est très absorbable dans l'intestin grêle, et pour $DP = 2$ elle est même laxative.

Les fibres alimentaires répondent aussi à un critère énergétique : leur dégradation par les bactéries intestinales dégage en moyenne 2 kcal/g de fibre ⁽¹⁰⁾.

On distingue deux grandes familles de fibres alimentaires (FA) : les FA solubles et les FA insolubles :

► **Fibres alimentaires solubles** :

Elles ont une faible capacité de rétention de l'eau. Elles sont dégradées en acides gras à chaînes courtes (AGCC) par les bactéries du gros intestin (voir par exemple réf. [35]). Les AGCC ainsi formés ont des effets bénéfiques importants dans l'organisme humain (par ex. réf. [36], [37]) :

• Diminution du taux de cholestérol : réduction du taux sanguin du LDL-cholestérol (LDL : lipoprotéine de basse densité, voir référence [3]) dit « mauvais cholestérol ».

• Diminution des triglycérides.

• Ralentissement de l'absorption des glucides.

• Régulation de la glycémie : les AGCC agissent sur l'insulinémie post-prandiale (taux d'insuline 2 heures après un repas) en contribuant à la régulation de la production d'insuline par le pancréas et de la fonction glycogénique du foie (réf. [2]).

• Stimulation de la fermentation colique : acidification favorisée (diminution du pH).

• Amélioration de l'absorption des macro-éléments et oligoéléments au niveau du côlon ⁽¹¹⁾.

9 Le degré de polymérisation est le nombre de monomères identiques constitutifs du polymère : c'est donc le nombre de répliquations d'un monomère.

10 Par définition, cette dégradation est seulement possible par les bactéries de la flore intestinale, puisqu'elle ne peut être réalisée par les enzymes digestives.

11 **Remarque importante** : certaines fibres alimentaires des plantes contiennent l'*acide phytique*, qui est un composé contenant du phosphore ; sa molécule contient six groupements phosphoryle $-O-PO_3H_2$ (c'est donc une forme hexaphosphorylée), et l'acide phytique des plantes à lui seul détient 80% du phosphore qu'elles contiennent. Il a l'inconvénient de défavoriser l'absorption du

- Diminution du risque de formation de polypes du côlon.
 - Amélioration de la protection du système immunitaire par la stimulation de la production des lymphocytes T, leucocytes, cytokines, anticorps...
 - Amélioration de la protection des tissus du côlon contre les inflammations.
 - Stimulation de la production des bactéries intestinales probiotiques (principales FA concernées : inulines, oligofructoses).
- Exemples de fibres alimentaires solubles : pectine, amidon résistant, inuline, oligofructose, gomme végétale, mucilage, bêta-glucane, gélifiants...

► **Fibres alimentaires insolubles :**

Elles ont une forte capacité de rétention d'eau : au contact de l'eau elles gonflent. Elles sont très peu dégradées par la flore intestinale, et sont donc éliminées avec les selles. Exemples de FA insolubles : cellulose, hémicellulose, lignine...

Leurs effets bénéfiques sur l'organisme humain sont :

- Ralentissement de la vidange gastrique, ce qui favorise la sensation de satiété et donc réduit la surconsommation alimentaire.
- Contrôle de la consistance et du volume des selles, d'où amélioration de la production des selles (réduit les risques de constipation).

Allégations nutritionnelles des fibres alimentaires :

Un aliment est reconnu comme source de fibres alimentaires, ou bien comme riche en fibres alimentaires, selon des critères quantitatifs normalisés, réf. [33], Directive réf. [34] 2008/100/CE de la Commission modifiant la directive 90/496/CEE du Conseil *relative à l'étiquetage nutritionnel des denrées alimentaires en ce qui concerne les apports journaliers recommandés, les coefficients de conversion pour le calcul de la valeur énergétique et les définitions* :

► Un aliment d'origine végétale est une **source de fibres alimentaires** si sa teneur en FA est au moins : 3 g/100 g (100 grammes de l'aliment contient au moins 3 grammes de FA).

Si l'on tient compte de l'apport d'énergie de l'aliment, le critère devient : 1,5 g/100 kcal. L'emploi de ce critère est plus pertinent car il exclut les aliments raffinés (comme par exemple le pain blanc en comparaison du pain complet). Voir tableau 8 la teneur moyenne des FA dans certaines sources végétales.

► Un aliment d'origine végétale est reconnu **riche en fibres alimentaires** si sa teneur en FA est au moins : 6 g/100 g, soit de manière équivalente : 3 g/100 kcal. Le but des allégations nutritionnelles est d'inciter à la consommation des fibres alimentaires tout en restant vigilant sur la qualité et la provenance des aliments qui les contiennent. A noter qu'elles concernent aussi les fibres alimentaires de synthèse qui entrent souvent comme des additifs alimentaires (tableau 9) (voir un exemple réf. [38] pour le pain).

► **Apport quotidien en fibres alimentaires recommandé pour un adulte**, réf. [39], [40] : au moins 30 g/jour/personne, ce qui est facilement atteint dans une alimentation variée contenant des crudités, des légumes verts cuits, des céréales, des fruits, des légumineuses ⁽¹²⁾.

7-2 - Quelques fibres alimentaires solubles, leurs propriétés et leurs sources

► **Inuline** : Polysaccharide de formule brute $C_6H_{10n+2}O_{5n+1}$

- Effets : réduction de la glycémie post-prandiale, favorise le transit intestinal ; contre-indiqué en cas d'intolérance au fructose.
- Principales sources végétales : Topinambour, racine de chicorée, artichaut, pissenlit, Yacon ou poire de terre, bulbes de dahlia, bardane, grande aunée, échinacée.

► **Pectine** : La pectine (ou substance pectique) est un polysaccharide acide (v. réf. [2]), qui est un constituant important des parois des plantes (principalement fruits et légumes), assurant l'assemblage des tissus végétaux.

La structure moléculaire est formée d'un acide uronique (α -D-galacturonique) et de rhamnose (α -L-rhamnose), l'ensemble étant composé d'une partie « lisse » HG uniquement constituée de l'acide uronique

fer, calcium, zinc, magnésium vitamine C. Il présente l'avantage d'être un bon anti-oxydant et de réduire l'ostéoporose. L'acide phytique est contenu principalement dans les graines des plantes, céréales complètes et légumineuses. Il est indispensable à la croissance des plantes, mais il s'unit facilement aux minéraux cités précédemment en formant des sels : les phytates ; c'est la raison pour laquelle il les empêche d'être absorbés par les intestins. On peut cependant consommer les végétaux qui contiennent l'acide phytique tout en minimisant ses inconvénients en employant les méthodes suivantes : a) le trempage pendant quelques heures avant cuisson ou consommation crue ; b) la germination des graines, qui présente l'intérêt de neutraliser l'acide phytique puisqu'il est dégradé par l'enzyme phytase lorsque les graines sont germées ; c) la lacto-fermentation qui produit l'acide lactique, lequel dégrade les phytates et rend donc biodisponibles les nutriments minéraux ; d) consommation avec des végétaux riches en vitamine C et les alliums (ail, oignon...) qui font baisser l'acide phytique ; e) légère cuisson de certaines graines, car la chaleur a pour effet de briser les phytates. Pour aller plus loin sur l'acide phytique et les phytates, voir par exemple réf. [41], [42].

12 **Remarque importante** : une faible hydratation jointe à une consommation riche en fibres alimentaires entraîne le risque de constipation.

désignée chaîne homogalacturonique HGA), et d'une partie en zig-zag RG constituée d'une chaîne rhamnogalacturonique qui combine l'acide uronique et le rhamnose (figure 12).

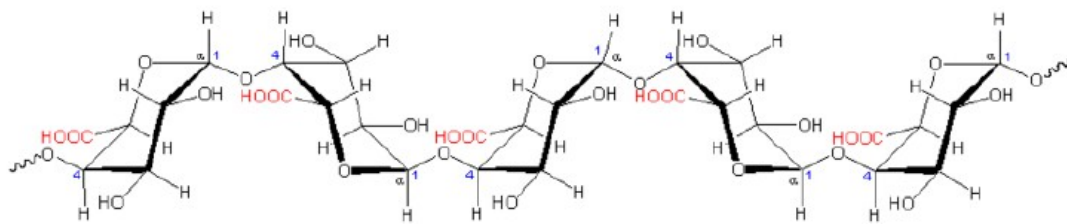


figure 12, structure de la pectine

d'après Tilly G. 2010. « Pectines ». Techniques de l'ingénieur 1-11, cité dans réf. [43]

Les pectines peuvent être estérifiées par du méthanol (méthylation : liaisons avec un groupe $-CH_3$) ou par un acétyle (acétylation : liaison avec un groupe acétyle $-COCH_3$), selon différents degrés variant d'une pectine à l'autre. Le **degré d'estérification** d'une pectine est le rapport (en %) du nombre des acides galacturoniques estérifiés (par méthylation et/ou par acétylation) sur le nombre total d'acides galacturoniques de la pectine : le degré est noté DM pour l'estérification par méthylation et DA pour l'estérification par acétylation. On distingue alors 3 classes de pectines selon ce degré :

- DM < 5% : la pectine est un acide pectique
- DM < 50% : pectine faiblement estérifiée ou méthylée (LM)
- DM > 50% : pectine hautement estérifiée ou méthylée (HM).

Les pectines naturellement présentes dans les végétaux ont un DM élevé (DM = 60 à 80%) : les chaînes pectiques forment alors généralement un réseau de gel, ce qui permet une importante rétention d'eau.

On définit un gel comme un système colloïdal : ensemble de macromolécules qui forment un réseau solide tridimensionnel en se solvatant, dont les mailles contiennent une phase liquide (réf. [43]).

La flexibilité des molécules de pectine, qui conditionne leur pouvoir gélifiant (capacité des chaînes pectiques à former un gel), dépend de DM, de l'acidité de la chaîne pectique donc du pH (cette acidité dépend de la proportion des monomères estérifiés ou non), de la température. Par exemple :

- Si les chaînes pectiques ont un pH > 7 (alcalin) et contiennent un nombre élevé de groupements carboxyle, la cohésion moléculaire est élevée et donc le pouvoir gélifiant est grand.
- Les pectines HM (DM grand) et de pH < 3,5 (acides) peuvent s'assembler facilement par liaisons hydrogène, la gélification est alors favorisée. De même si la proportion de sucre est importante.
- Les pectines LM (DM bas) et de pH > 4,5 ont aussi un bon pouvoir gélifiant.

Les pectines sont facilement solubles dans l'eau ou les solvants si leur DM est bas (LM).

Dans les fruits qui mûrissent, les pectines qu'ils contiennent subissent une hydrolyse par suite du relâchement des fibres de cellulose.

Les pectines sont utilisées dans différentes applications, notamment pour ses propriétés gélifiantes, stabilisantes, augmentation de la viscosité... : agroalimentaires et nutrition (voir par exemple réf. [44], [45], [46]), l'obtention de molécules spécifiques à partir du bois (v. par ex. réf. [47]), les cosmétiques (v. par ex. réf. [48]), la santé (réf. [49], [50]), etc., et même dans le domaine de traitement et de prévention des expositions aux métaux lourds et de certains rayonnements ionisants (v. par ex. réf. [51]). Pour cela différentes techniques d'extraction et transformation de la pectine sont employées : hydrolyse en milieu acide, micro-ondes, enzymatique, chauffage assisté par ultrasons, agents de chélation, autoclave... réf. [50], [48].

- Principaux effets sur la santé : comme évoqué précédemment, certaines pectines peuvent absorber des métaux lourds ingérés dans le tube digestif ; les pectines préviennent aussi des colites consécutives à l'absorption de substances toxiques.

- Principales sources végétales de la pectine : elles représentent 0,5 à 4% du poids frais d'un végétal (réf. [49]) ; quelques données : pulpe de citron (2,5 à 4%), écorce d'orange (3,5 à 5,5%), péricarpe du fruit de la passion (2,1 à 3,0%), marc de pomme (1,5 à 2,5%), tamarin (1,71%), banane (0,7 à 1,2%), betterave (1,0%), papaye (0,7 à 1,0%), goyave (0,8 à 1,0%), pêche (0,1 à 0,9%), fraise (0,6 à 0,7%), tomate (0,2 à 0,6%), carotte (0,2 à 0,5%), fruit de la passion (0,5%), litchi (0,4%), mangue (0,3 à 0,4%)...

► Alginate ou acides alginiques :

Les alginates sont les dérivés sels, esters, ou bases conjuguées des acides alginiques qui sont des polysaccharides de formule brute $(C_6H_8O_6)_n$. Leur structure est celle d'un copolymère (polymère formé par la répétition de deux monomères différents) dont les monomères sont : acide D-mannuronique, acétylé ou non, et acide L-guluronique (figure 13).

Le mode d'association des monomères étant très diversifié, leur répétition n'étant pas régulière, la masse moléculaire du copolymère peut varier de 50 à 200 kDa ⁽¹³⁾.

- Propriétés : Les alginates ont une grande capacité gélifiante (comme les pectines) et stabilisante,

¹³ Le Dalton (Da) est l'unité de masse moléculaire. Elle est égale à la masse d'un atome d'hydrogène 1 Da = $1,66 \cdot 10^{-27}$ kg, valeur qui est égale au douzième de la masse d'un atome de carbone 12.

stable à la chaleur. Ces propriétés sont exploitées dans les processus de transformation pour en faire des additifs alimentaires (E401 à E407)⁽¹⁴⁾ servant à la texture des aliments (jambons, poissons panés, crèmes glacées, etc.). À l'état naturel, ils peuvent former des biofilms chez les bactéries qui augmentent ainsi considérablement leur résistance aux antibiotiques (pharmacorésistance), telles que le bacille pyocyanique de la fibrose kystique pulmonaire, ou les borrélias de la maladie de Lyme.

- Intérêts pour la santé : encapsulation des médicaments ou des substances biologiques pour faciliter et sécuriser leur ingestion chez le patient.
- Sources végétales principales : algues brunes (laminariacées, fucacées).

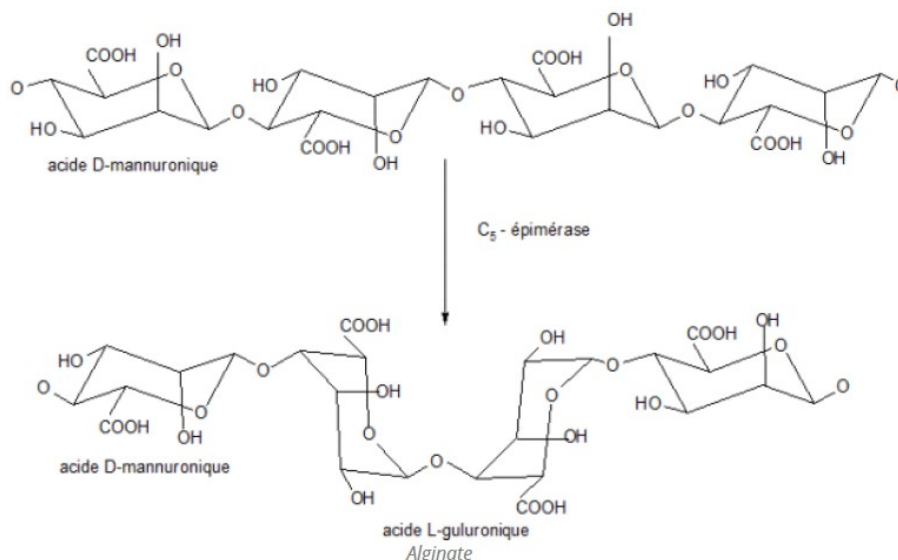


figure 13 : séquence de copolymère d'alginate formé par les acides mannuronique et guluronique
(source : <https://biochim-agro.univ-lille.fr/polysaccharides/>)

► Raffinose :

Le raffinose (formule brute $C_{18}H_{32}O_{16}$) est un oligosaccharide (cf. point 4 et réf. [2]) formé de trois unités : galactose, glucose, fructose (figure 14). Son hydrolyse, par l'enzyme α -galactosidase (que ne possède pas le système digestif humain), donne le saccharose (formé du glucose et du fructose) et le galactose.

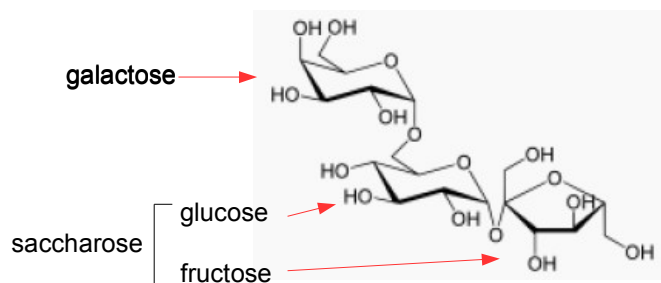


figure 14 : structure du raffinose

- Propriétés : Dans le tube digestif humain, lorsqu'il est en grande quantité, le raffinose entraîne des fermentations et des flatulences. En tant que constituant des plantes, il a un rôle important sur leur résistance à divers stress : stress oxydatif, stress dû à la sécheresse (voir par exemple réf. [52], [53], [54]).

- Intérêts pour la santé : Le raffinose peut être utilisé dans les régimes alimentaires sans sucres, qu'il remplace sans en avoir les inconvénients. Par ailleurs, dans le domaine médical, des études montrent que dans certaines maladies d'origine bactérienne (comme le *Pseudomonas*, bacille pyocyanique), la résistance aux antibiotiques pourrait être amoindrie grâce à l'action inhibitrice du raffinose sur les biofilms qui protègent les bactéries (réf. [55], [56]). En Pharmacie, le raffinose intervient comme agent de cryopréservation des substances thérapeutiques. En techniques alimentaires, il est utilisé comme édulcorant, ou encore dans l'élaboration des sucres bruns, etc.

- Sources végétales : lentilles, haricots, choux communs, choux de Bruxelles, brocoli, asperge, betterave, oignons, graines d'oléagineuses (graines de soja, graines de tournesol, cacahuètes...).

14 Les différents additifs à base d'alginate sont : E401 alginate de sodium, E402 alginate de potassium, E403 alginate d'ammonium, E404 alginate de calcium, E405 alginate de propylène-glycol, E406 agar-agar, E407 carraghénanes (issues des algues rouges).

► **Lactulose (ou galactofructose) :**

Le lactulose (formule brute $C_{12}H_{22}O_{11}$) est un sucre (disaccharide) de synthèse obtenu à partir de l'isomérisation du lactose ; il est formé par la liaison du galactose et du fructose (point 4 et réf. [2], figure 15). On ne trouve pas le lactulose à l'état naturel dans les plantes, mais il est présent dans le lait des vaches après pasteurisation.

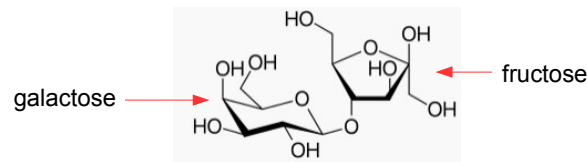


figure 15 : structure du lactulose

- Effets : Dans l'intestin le lactulose est dégradé par les bactéries du microbiote en acides gras, méthane et hydrogène, ce qui entraîne des effets laxatifs et acidifiants, ainsi que des flatulences.

- Intérêts pour la santé et l'alimentation : le pouvoir sucrant du lactulose est 70% celui du saccharose (le sucre classique), il est donc intéressant dans les régimes avec peu de sucre. Sa stabilité permet de l'intégrer dans divers aliments pour leur aromatisation, leur texture, leur conservation (pain, produits laitiers, biscuits, viandes, charcuterie...). Le lactulose améliore le transit intestinal, a un effet régulateur sur le microbiote intestinal, inhibe l'action de certaines bactéries pathogènes (salmonellose, dysenterie...), réf. [57], [58], [59]. Il permet aussi d'inhiber et d'éliminer l'ammoniac qui est produit dans l'organisme lors de l'insuffisance hépatique ⁽¹⁵⁾, et dont les effets toxiques sur le système nerveux conduisent à l'encéphalopathie hépatique.

7-3 - Quelques fibres alimentaires insolubles, leurs propriétés et leurs sources

► **Cellulose :**

La cellulose est constituée d'un très grand nombre d'unités cellobiose reliées par des liaisons β -glycosidiques.

Le cellobiose est formé de monosaccharides composés de deux D-glucose sous forme pyranosique. Leur liaison est β -glycosidique ; propriété chimique : réducteur ; le cellobiose est un isomère du maltose.

Caractéristiques de la cellulose :

- Degré de polymérisation DP : c'est le nombre d'unités constitutives et répétitives de la macromolécule ; pour le polysaccharide, DP est donc le nombre d'unités monosaccharides. Selon la plante dans laquelle elle se trouve, la cellulose n'a pas le même DP. Par exemple :

- dans le coton brut : DP = 14000
- dans le lin : DP = 8000
- dans un conifère : DP = 2500

- la cellulose de faible DP est dissoute dans une lessive de soude concentrée à 10%

- la cellulose est très hygroscopique (capacité à gonfler dans l'eau), par exemple :

- coton : 18%
- soie : 86%
- viscose : 74%

- température de décomposition de la cellulose : 180°C

- température d'inflammation de la cellulose : 290°C

- la cellulose ne peut pas être hydrolysée par l'amylase, à cause des liaisons glycosidiques : elle ne peut donc pas entrer dans l'alimentation humaine. Mais les ruminants peuvent décomposer la cellulose en glucose par les enzymes cellulases.

- Principales sources de cellulose : parois des cellules des plantes supérieures, algues vertes, champignons. Quelques exemples de quantité de cellulose en % de masse sèche :

- fibres de coton : 95%
- bois de pin : 44%
- bois de bouleau : 40%
- paille : 40 à 50%
- feuilles : 10 à 20%

15 L'insuffisance hépatique est une maladie du foie causée par des intoxications (médicaments, stupéfiants, alcool...) ou des virus (par exemple hépatite B). Les symptômes peuvent être : ictère (jaunisse), défauts de coagulation du sang (dus à un taux de prothrombine devenu insuffisant), nécrose des cellules du foie...auxquelles succèdent des affections des reins (syndrome hépatorénal...), encéphalopathie due aux effets toxiques de substances azotées dont l'ammoniac (œdème cérébral...), anomalies du système immunitaire avec d'éventuels chocs septiques, troubles du métabolisme, éventuellement œdème pulmonaire... (voir par exemple : <https://www.msmanuals.com/fr/>)

► Chitine :

La chitine est un polysaccharide aminé de formule brute $(C_8H_{13}NO_5)_N$, on la trouve dans les champignons macroscopiques, les lichens, levures, dans l'exosquelette des insectes, la carapace des crustacés...

► Hémicellulose :

Polymère glucidique (polysaccharide), constitutif de la paroi des cellules végétales, et dont les monomères peuvent être du glucose, xylose, mannose, galactose, arabinose...

- Propriétés et intérêts pour la santé : L'hémicellulose est très peu fermentescible, exceptée l'arabinoxylane dérivée de l'arabinose, que l'on trouve dans les téguments des graines de Psyllium blond ou ispaghul (*Plantago ovata*) et qui possède des effets laxatifs, anticholestérolémiant, hypoglycémiant.

- Principales sources végétales : Son de blé, céréales complètes, fruits, légumes, légumineuses, noix. Sur les hémicelluloses, notamment leur présence dans le bois, voir par exemple réf. [47].

► Hexoses :

Voir réf. [2] et point 4.

- Source végétale des hexoses : blé, orge.

- Intérêts pour la santé : Les sucres (hexoses, glucose, galactose, fructose) sont d'importantes sources alimentaires pour l'énergie des mammifères, dont l'Homme. Ils ont un rôle déterminant dans la régulation de cette énergie, ce qui nécessite leur diffusion dans les cellules à travers leurs membranes cellulaires. La diffusion de ces molécules nécessite des protéines transporteurs spécialisées capables de traverser les membranes en entrée comme en sortie (réf. [60], [61], [62]). Dans ce système, le transport des hexoses contribue à l'ensemble de l'homéostasie énergétique des sucres. Les recherches ont permis d'identifier 2 familles de transporteurs d'hexoses selon leur affinité à la concentration de glucose :

- Transporteurs d'hexoses à diffusion facilitée (GLUT) : ils diffusent dans le sens du gradient de concentration de glucose. On a identifié 3 classes de GLUT regroupant au total 14 transporteurs intervenant de manière spécifique dans les différents tissus de l'organisme humain :

- classe I : GLUT1 (omniprésent), GLUT2 (intestins, foie...), GLUT3 (neurones), GLUT4 (muscles, cœur...),

- classe II : GLUT5 (intestin, sperme), GLUT7 (intestin), GLUT9a et b (reins), GLUT11 (pancréas, cœur, muscles, placenta, reins),

- classe III : GLUT6 (cerveau, rate), GLUT8 (cerveau, foie, rate, testicules), GLUT10 (cœur, poumons), GLUT12 (tissus sensibles à l'insuline), GLUT13 (cerveau)

- Transporteurs d'hexoses dépendants du sodium (SGLUT) : ils diffusent dans le sens inverse du gradient de concentration de glucose en utilisant l'énergie électrochimique fournie par un gradient de concentration de sodium : SGLUT1, SGLUT2, qui sont co-transporteurs des GLUT.

Les différents transporteurs et co-transporteurs interviennent de manière spécifique en fonction de l'environnement biochimique du site où s'effectuent les échanges. Par exemple, le transfert de l'hexose depuis l'intestin grêle jusque dans le sang s'effectue à travers les cellules épithéliales de l'intestin grêle (figure 16) : au niveau de la membrane côté intestin c'est le SGLUT1 qui permet à la cellule de recevoir le glucose et le galactose par co-transport utilisant le gradient de sodium existant entre cet interface et celui côté sang, et c'est le transporteur GLUT5 qui permet la réception du fructose. A l'interface opposé, côté sang, c'est par exemple GLUT2 qui permet le transfert dans le sang de ces trois monosaccharides glucose, galactose et fructose dans le sens du gradient de leurs concentrations.

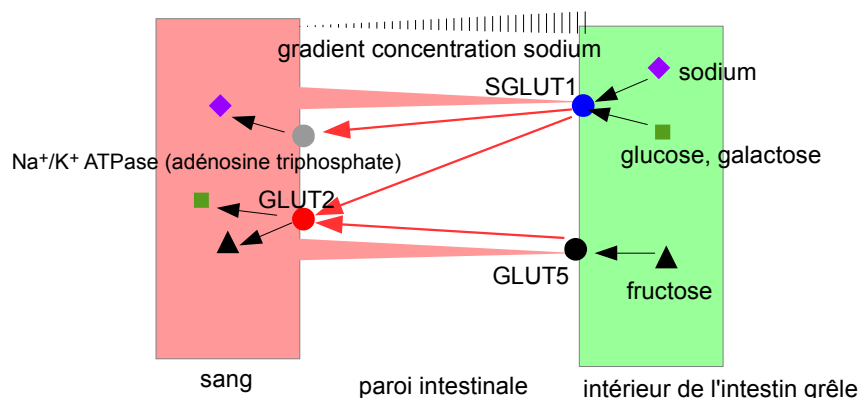


figure 16 : exemple de transfert des sucres par les GLUT et SGLUT (réf. [62])

Les transporteurs des hexoses sont exprimés par des gènes spécifiques (voir par ex. réf. [63]).

S'agissant plus particulièrement du GLUT4, son expression dans les tissus sensibles à l'insuline suggère un intérêt thérapeutique dans le diabète non insulino-dépendant (voir par ex. réf. [60]).

► **Pentose :**

Voir réf. [2] et point 4.

- Source végétale du pentose : seigle, avoine.
- Propriétés et intérêts pour la santé :

Le métabolisme énergétique fait intervenir principalement le glucose, lequel, d'ailleurs, est le seul carburant énergétique chez le fœtus humain.

Dans ce métabolisme tous les glucides alimentaires sont absorbés sous forme de glucose, ou bien sont convertis en glucose dans le foie. Le métabolisme énergétique met en œuvre 4 voies métaboliques principales :

■ Une voie catabolique où le glucose est dégradé principalement en pyruvate par la glycolyse. Le pyruvate (figure 17), ou acide pyruvique (¹⁶), est un métabolite clé de plusieurs voies métaboliques énergétiques dans les cellules vivantes : glycolyse, cycle de Krebs, néoglucogenèse (synthèse du glucose à partir de composés non glucidiques).

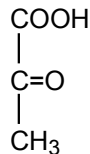
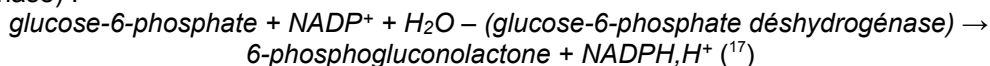


figure 17 : structure de l'acide pyruvique

■ Une voie catabolique où le glucose est dégradé en pyruvate selon la voie d'Entner-Doudoroff (ou voie KDGP). Cette voie est propre aux bactéries. La dégradation du glucose en pyruvate suit 6 étapes :

- 1 : phosphorylation du glucose, catalysée par une enzyme kinase :
 $\text{glucose} + \text{ATP} - (\text{kinase}) \rightarrow \text{glucose-6-phosphate} + \text{ADP}$
- 2 : oxydation du glucose-6-phosphate en lactone, catalysée par une enzyme déshydrogénase) :



- 3 : hydratation du 6-phosphogluconolactone, catalysée par une enzyme lactonase :
 $\text{6-phosphogluconolactone} + \text{H}_2\text{O} - (\text{lactonase}) \rightarrow \text{6-phosphogluconate}$
- 4 : déshydratation du 6-phosphogluconate, catalysée par une enzyme déshydrase :
 $\text{6-phosphogluconate} - (\text{déshydrase}) \rightarrow \text{2-céto-3-désoxy-6-phosphogluconate}$
- 5 : première synthèse du pyruvate, catalysée par une enzyme aldolase :
 $\text{2-céto-3-désoxy-6-phosphogluconate} - (\text{aldolase}) \rightarrow \text{pyruvate} + \text{3-phosphoglyceraldéhyde}$
- 6 : deuxième synthèse du pyruvate :
 $\text{3-phosphoglyceraldéhyde} + \text{ADP} + \text{NAD}^+ \rightarrow \text{pyruvate} + \text{ATP} + \text{NADH}, \text{H}^+$

■ La voie du méthylglyoxal. Le méthylglyoxal (MGO), de formule brute $\text{CH}_3\text{-CO-CHO}$, est l'aldéhyde de l'acide pyruvique. Il est très toxique pour les cellules (cytotoxicité). Chez l'homme c'est une cause de diabète et de diverses pathologies neurodégénératives. En situation normale, le MGO est détecté et dégradé dans l'organisme humain par les enzymes glyoxalases. Les cellules cancéreuses privilégient les métabolismes anaérobiques (ne nécessitant pas d'oxygène), y compris pour la glycolyse, même en présence d'un niveau normal d'oxygène. Cela a pour effet de produire le MGO qui, alors, ne peut pas être dégradé par les voies normales et qui perturbe les cellules, réf. [64].

■ Une voie privilégiant l'anabolisme (biosynthèse) : **voie des pentoses phosphates PPP** (« *pentoses phosphates path* » en anglais), ou de Otto Warburg, Frank Dickens, Bernard Honecker. Chez l'homme la voie PPP est donc une alternative à la voie glycolyse. Les principaux produits de la voie PPP sont (réf. [65]) :

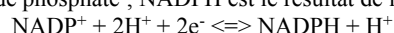
- NADPH + H^+ , utilisé lors de la biosynthèse des acides gras, cholestérol et réduction du glutathion ;
- ribose-5-phosphate, utilisé dans la synthèse des nucléotides ;
- érythrose-4-phosphate, précurseur des acides aminés aromatiques : phénylalanine, tyrosine, tryptophane (tableau 1).

La voie PPP a lieu dans le cytoplasme, en présence comme en absence d'oxygène. Elle se décompose en 3 parties (figure 18), réf. [66] :

- partie oxydative : oxydation du glucose-6-phosphate, réduction du NADP^+ en NADPH, et formation du ribulose-5-phosphate (réf. [67]) ; elle correspond aux réactions n°1, 2, 3. La réaction n°1 est

16 Le pyruvate est plus précisément la base conjuguée de l'acide pyruvique $\text{C}_3\text{H}_4\text{O}_3$.

17 NADP : Nicotinamide adénine dinucléotide phosphate ; NADPH est le résultat de la réaction de réduction du NADP :



catalysée par l'enzyme glucose-6-phosphate déshydrogénase (G6PD) ; la réaction n°2 est catalysée par l'enzyme lactonase ; la réaction n°3 fait intervenir l'enzyme 6-phosphogluconate déshydrogénase ;

- partie non oxydative : réactions réversibles d'isomérisation et d'épimérisation ; elle correspond aux réactions n°4 (isomérisation), 5 (épimérisation) ; les enzymes qui les catalysent sont respectivement l'isomérase et l'épimérase. A l'issue de la réaction n°4, la voie PPP se termine lorsque les cellules utilisent le ribose-5-phosphate pour la synthèse des nucléotides ;

- autre partie non oxydative : transcétolisation ⁽¹⁸⁾ et transaldolisation ⁽¹⁹⁾ ; elle correspond aux réactions n°6, 7, 8. Les deux enzymes qui interviennent (transcétolase et transaldolase) permettent l'établissement d'un passage réversible entre les voies PPP et glycolyse. C'est pourquoi à l'issue de cette partie les produits entreront dans la voie glycolyse.

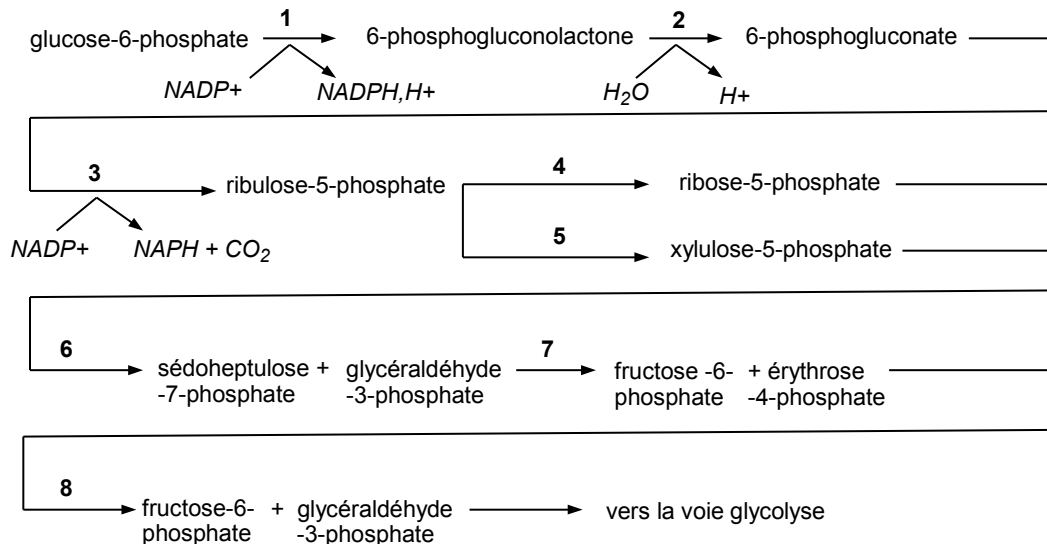


figure 18 : schéma simplifié des trois séquences de la voie PPP, les numéros indiquent les réactions ou les initiations de chaînes de réactions d'une partie à la suivante. Pour des données détaillées sur les composés qui interviennent dans ce système, voir réf. [68]

La voie PPP peut emprunter différents procédés pour la régularisation des effets liés aux déficits ou aux excès des métabolites, enzymes et coenzymes.

La voie PPP est réalisée dans le compartiment cytosolique des cellules. Ce compartiment, le cytosol, est l'espace liquide de l'intérieur du cytoplasme dans lequel on trouve le noyau et les organites. Il est riche en eau et ions potassium K^+ , et peu d'ions sodium Na^+ et de chlore Cl^- . Il contient des lipides, des glucides, des protéines, des ribosomes, le protéasome ⁽²⁰⁾... Le bilan énergétique de la voie PPP est nul. Elle est réalisée un peu partout dans l'organisme mais plus spécifiquement dans :

- le foie, où elle contribue à la synthèse des acides gras et du cholestérol ;
- les globules rouges, où elle contribue à la réduction du glutathion ;
- les tissus adipeux ;
- les glandes mammaires lors de la lactation ;
- les glandes surrénales, glandes sexuelles ;
- les muscles.

Les **anomalies dans la voie PPP** conduisent à au moins deux sortes de pathologies (voir aussi réf. [69]) :

- Déficit en enzyme G6PD, dont on a vu le rôle dans l'initialisation de la voie PPP : ce déficit est d'origine héréditaire, porté par le chromosome X, et touche principalement les garçons. La pathologie qui en résulte est due à la destruction des globules rouges conduisant à une anémie hémolytique sévère, avec douleur, frissons, état fébrile, chute de l'hémoglobine. Ces effets surviennent souvent lors des crises consécutives à un stress oxydatif d'origine alimentaire ou médicamenteuse, ou d'exposition aux produits toxiques, dont les conséquences (hémolyse) peuvent être mortelles.

- Excès de G6PD : il entraîne une suractivation de la voie PPP, donc une augmentation du ribose-5-

18 La transcétolisation est le transfert d'un groupement céto (CH_2OH-CO) du xylulose-5-phosphate au ribose-5-phosphate. Elle est catalysée par l'enzyme transcétolase qui nécessite la coenzyme pyrophosphate de thiamine (TPP).

19 La transaldolisation est le transfert d'un groupement dihydroxy-acétone ($CH_2OH-CO-CH_2OH$) du sédoheptulose-7-phosphate au 3-phospho-D-glyceraldéhyde. Elle est catalysée par l'enzyme transaldolase.

20 Le protéasome (ou protéasome 26S) est un complexe protéique macromoléculaire (taille de l'ordre de 2,5 millions de daltons), possédant au moins 45 chaînes polypeptidiques. Il dégrade les protéines en utilisant l'hydrolyse de l'ATP (adénosine triphosphate).

phosphate, créatrice de purines conduisant à une hyperuricémie (augmentation du taux d'acide urique dans le sang) (voir par ex. réf. [70], [71]).

► **Lignine :**

- Présence et effets dans les végétaux :

Les lignines sont des polymères polyphénoliques (tannins). Les lignines sont présentes principalement dans les plantes vasculaires (ligneuses, herbacées) et certaines algues. Ce sont un des principaux constituants du bois, avec la cellulose et l'hémicellulose (en moyenne, cellulose : 45%, hémicellulose : 25%, lignines : 25%). Plus précisément, leur proportion dans les végétaux varie avec leur nature (tableau 7, réf. [72]) :

	graminées	feuillus	conifères
lignine	15%	20%	28%
cellulose	45%	40%	44%

Tableau 7 : présence moyenne des lignines dans certaines espèces végétales

Les lignines apportent aux végétaux les propriétés suivantes :

- rigidité, robustesse ;
- en tant que molécules hydrophobes, imperméabilité à l'eau ;
- résistance à la décomposition d'origine microbienne, fongique, thermique...
- résistance à l'implosion (par baisse de pression) des cellules qui participent à la circulation de la sève brute.

Les lignines sont principalement situées entre les cellules. Dans le végétal, leur répartition est variable :

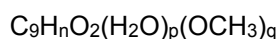
- dans les feuilles : 3-5%
- dans les tiges des herbacées : 17-24%
- dans les tiges ligneuses : 18-25% pour le bois dur, 27-33% pour le bois tendre
- les plantes vivaces contiennent plus de lignines que les plantes annuelles.

- Structures et propriétés chimiques des lignines :

Les lignines sont des polymères associant, de manière irrégulière, trois monomères, les **monolignols** (figure 19) :

- alcool paracoumarylique (ou p-coumarylique), désignée par unité H
- alcool coniférylique, ou unité G
- alcool sinapylique, ou unité S

La synthèse des monolignols résulte d'une chaîne de réactions assez complexes, impliquant plusieurs enzymes, et dont le précurseur est l'acide aminé protéinogène phénylalanine Phe (tableau 1 et réf. [1]). De par la multiplicité des liaisons entre les monolignols, la formule brute générale des lignines s'écrit (réf. [72]) :



où $n \approx 8 - q$, avec $p < 1$ et $q < 1$. Les unités H, G, S sont réparties de manière très diverses selon le classement végétal, l'espèce, l'organe et les tissus de la plante, par exemple :

- Plantes vasculaires monocotylédones : H, G, S
- Plantes vasculaires dicotylédones : H, G, S
- Plantes vasculaires gymnospermes : H, G
- Plantes vasculaires fougères : H, G
- Protistes (algues rouges Calliarthron) : H, G, S

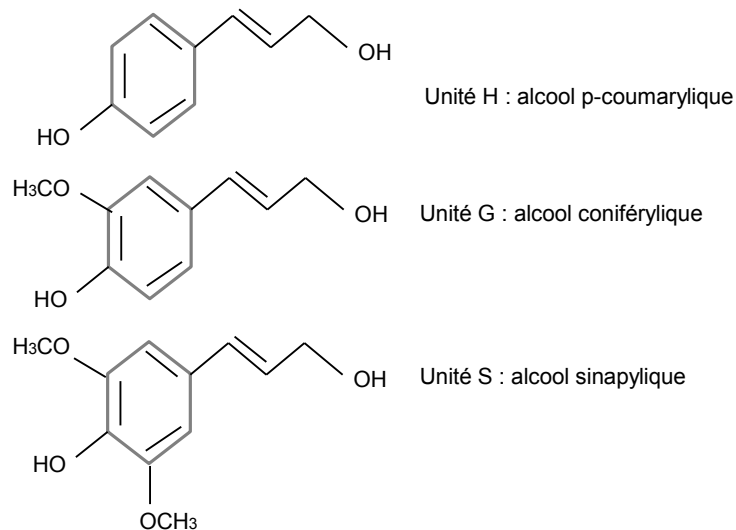


figure 19 : unités monolignols (monomères de la lignine)

Formules brutes de lignine de quelques végétaux (réf. [72]) :

- Hêtre (*Fagus silvatica*) : $C_9H_{6,57}O_2[H_2O]_{0,64}[OCH_3]_{1,41}$
- Épinette rouge (*Picea excelsa*) : $C_9H_{7,12}O_2[H_2O]_{0,40}[OCH_3]_{0,92}$
- Luzerne (*Medicago sativum*) : $C_9H_{7,22}O_2[H_2O]_{0,41}[OCH_3]_{0,84}$
- Jalousie (*Lycopodium obscurum*) : $C_9H_{7,37}O_2[H_2O]_{0,49}[OCH_3]_{0,73}$
- Mousse commune (*Polytrichum*) : $C_9H_{7,94}O_2[H_2O]_{0,78}[OCH_3]_{0,25}$
- Mousse de tourbe (*Sphagnum*) : $C_9H_{7,96}O_2[H_2O]_{0,90}[OCH_3]_{0,25}$

La figure 20 montre une structure possible de lignine, polymère non régulièrement répliatif, amorphe :

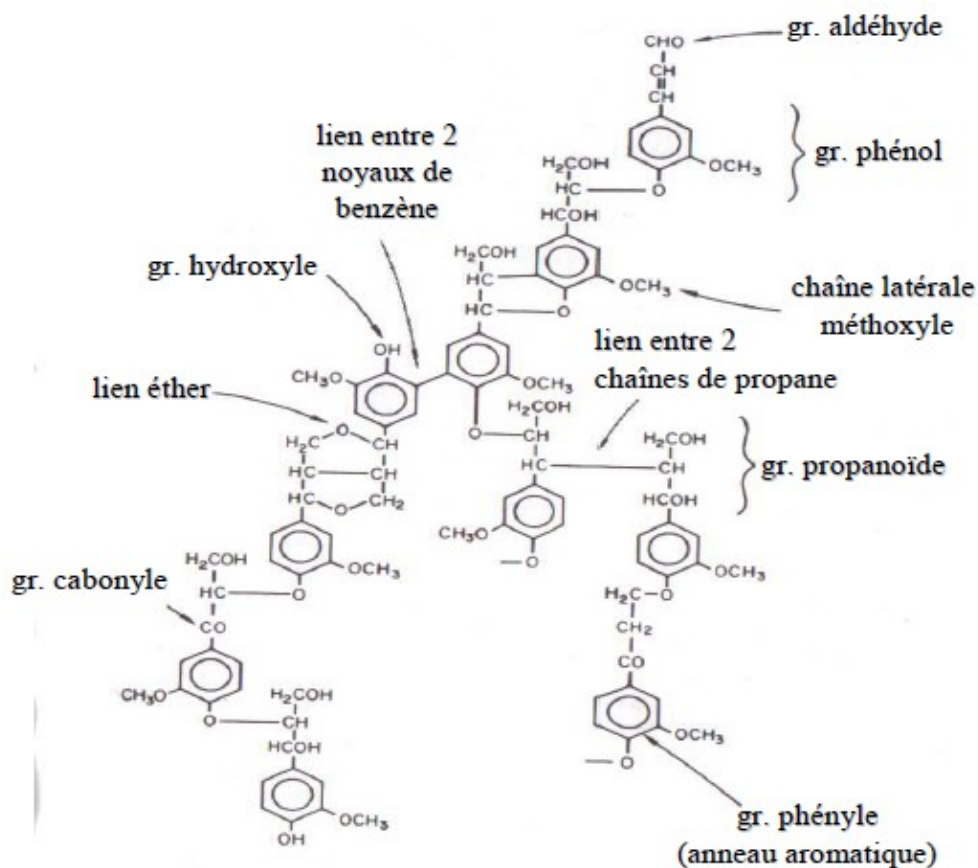
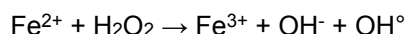


figure 20 : modèle structural possible d'une lignine (source : réf. [72])

• Dégradation des lignines :

Les lignines forment des liaisons avec la cellulose et l'hémicellulose (donnant une lignocellulose), ce qui a pour effet de créer des barrières aux enzymes, et donc de protéger le végétal. Mais il existe des

champignons basidiomycètes (« pourriture » blanche ou brune) capables de dégrader la lignine par des enzymes lignocellulolytiques (hydrolyse de la lignocellulose), ou par des enzymes ligninases. La dégradation des lignines se produit aussi par oxydation de la lignocellulose sans ces enzymes, par production de radicaux libres hydroxyles (OH°) selon la réaction de Fenton :



- Intérêts alimentaires, pharmaceutiques et industriels de la lignine :

De nombreuses applications industrielles et à caractère durable de la lignine sont mentionnées dans une littérature abondante. Voir par exemple réf. [73].

Dans le domaine alimentaire, les lignines étant peu digestes, elles sont employées dans certaines alimentations animales industrielles. Pour l'alimentation humaine, elles sont utilisées dans la fumaison (produits aromatiques issus de la combustion des lignines et donnant l'arôme des produits fumés) et pour obtenir la vanilline de synthèse (que l'on trouve par ailleurs naturellement dans les gousses de vanille) qui est un arôme alimentaire très employé.

L'industrie pharmaceutique utilise des produits dérivés de matériaux lignocellulosiques.

- Principales sources alimentaires des lignines : légumes (exemple : filaments des haricots), céréales, noyaux de fruits...

► Amidons résistants :

Les amidons résistants (AR) sont des glucides qui ne se décomposent pas en glucose, ils ne sont pas absorbés par l'intestin grêle. Cinq types d'AR sont recensés :

- AR1 : amidon présent dans les graines ou les légumineuses, ou dans certains grains entiers ou germes : grains à blé entier non transformés, graines de soja, haricots, lentilles, pois secs...

- AR2 : amidons naturellement présent sous forme de grains, dans : pommes de terre crues, bananes vertes, maïs à forte teneur en **amylose**. L'amylose, de formule brute $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$ est un polysaccharide formé d'unités glucose (cf. réf. [2]) : avec l'amylopectine, l'amylose est un des principaux constituants de l'amidon. La dégradation de l'amylose par l'enzyme α -amylase donne le maltose.

- AR3 : amidon dit rétrogradé : lorsque les aliments qui contiennent l'amidon sont cuits puis refroidis. Ce procédé a pour effet d'augmenter la teneur en amidon résistant. Exemples : pommes de terre, pâtes cuites puis refroidies pour salade, riz à sushi, etc.

- AR4 : amidons chimiquement modifiés pour les rendre résistants à la digestion : additifs alimentaires issus de maïs, de pommes de terre, de riz...

- AR5 : amidons résistants créés à partir d'aliments riches en amidons chauffés et refroidis en présence de lipides : graisses, cires...

Effets des amidons résistants sur la santé : d'après de très nombreuses études, ces effets sont (voir entre autres références [74], [75], [76], [77], [78], [79], [80]...) :

- contrôle de la glycémie ;
- ralentissement de la prise de poids ;
- prévention du cancer colorectal ;
- AR2 et AR4 augmentent la population des bactéries du microbiote intestinal ;
- encapsulation permettant aux médicaments d'être diffusés et d'agir sur une plus grande longueur du tube digestif.

7-4 - Teneur en fibres alimentaires de quelques sources végétales

Aliment d'origine végétale	Teneur en fibre g/100g (ou g/100kcal)	Source ou riche en fibres
céréales		
Son de blé	48-55	riche
Flocons d'avoine complets	11,3	riche
Pain complet	8,5 - 7 (2,99) réf. [33]	riche
Pain blanc	2,7 - 3,5 (1,29) réf. [33]	source
Céréales sucrées du petit déjeuner	1,7 (0,44) réf. [33]	-
Riz blanc cuit	3,0 - 0,5 (0,42) réf. [33]	-
Riz complet cuit	1,4 (1,19) réf. [33]	-
Muesli	7,8 - 7,1 (1,74) réf. [33]	riche

Aliment d'origine végétale	Teneur en fibre g/100g (ou g/100kcal)	Source ou riche en fibres
légumineuses		
Haricot blanc	26	riche
Pois cassés	25	riche
Pois chiche	15	riche
Lentille cultivée cuite	12 - 7,8 (8,76) réf. [33]	riche
Petit pois	6,3	source
légumes		
artichaut	8,6	source
Carotte cuite	3,7 - 2,7 (10,8) réf. [33]	riche
Pomme de terre, non pelée, fraîche	3,5 - 2,1 (4,29) réf. [33]	riche
Chou vert	3,4	-
Maïs, soja	2,5	-
potiron	2	-
Épinard, laitue, tomate	1,6 - 1,5 (12,5)	riche
fruits		
amande	14,3	riche
groseille	8	source
pruneau	7	source
noix	5,2	-
banane	3,4	source
poire	2,4	-
fraise	2,1 - 2,2 (6,47) réf. [33]	riche
myrtille	1,7	-
datte	1,6	-
Pomme (non pelée, fraîche)	1,4 - 2,1 (4,29) réf. [33]	riche
Orange (pulpe, fraîche)	1,8 (4,29) réf. [33]	riche
Courgette cuite	1,4 (10,7) réf. [33]	riche

Tableau 8 : teneur en fibres alimentaires de quelques aliments d'origine végétale

7-5 - Quelques fibres alimentaires de synthèse

substance	Procédé de synthèse	Propriétés physiologiques
fructo-oligosaccharides	Synthèse enzymatique à partir de saccharose	Ingrédient à effet bifidogène : les prébiotiques nourrissent les bifidobactéries du microbiote intestinal car ils sont fermentés par elles. Les bifidobactéries (ou bifidus) sont des bactéries lactiques (bactéries à Gram+ ⁽²¹⁾ , anaérobies, transformant les sucres en acide lactique), ce qui a pour conséquence de diminuer le pH (l'acidité augmente), ce qui les favorise au détriment d'autres germes pathogènes. Elles limitent les infections et la croissance tumorale.
oligofructose	Hydrolyse enzymatique de l'inuline de la racine de chicorée	idem
Amidon résistant	Traitement hydrothermique de maltodextrines issues du tapioca, et débranchement enzymatique	Stimulation de la fermentation colique, et source de butyrate

Tableau 9 : synthèse de certains types de fibres alimentaires (source : réf. [33])

21 Sur une définition du Gram+, voir par exemple réf. [92].

8 – Mémo d'une alimentation équilibrée

8-1 – Deux objectifs d'une alimentation équilibrée

Une alimentation équilibrée consiste, d'une part, à garantir le maintien du poids corporel dans des valeurs normales (quantifiées par l'indice de masse corporelle), et d'autre part à garantir un apport journalier des nutriments conforme aux besoins de l'organisme :

8-2 - La condition de poids « normal » : indice de masse corporelle (IMC), et autres indices

► **L'IMC, ou indice de Quetelet**, est défini par :

$$IMC = M/T^2$$

où M est la masse corporelle, exprimée en kilogrammes (kg), et T est la taille ou stature, exprimée en mètre (m). IMC est donc être exprimé en kg/m². Mais usuellement, M est désignée par « poids » noté P encore exprimé en kg, ce qui est en toute rigueur inexact puisque $P = Mg$ est une force (en newton N), avec $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ accélération de la pesanteur, et l'écriture $IMC = P/T^2$ devrait s'exprimer en N/m². En se souvenant de cette signification, l'écriture conventionnelle adoptée pour l'IMC, par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) en 1997 (réf. [81]) et bien d'autres organismes de santé publique dans le monde, est :

$$IMC \text{ (kg/m}^2\text{)} = P \text{ (kg)}/T^2 \text{ (m}^2\text{)}$$

Cet indice est un indicateur normalisé de risques associés au surpoids chez l'adulte (voir par exemple réf. [82], [83]). C'est plus son évolution chez un même individu que sa valeur instantanée qui instruit sur l'évolution de ces risques (v. par ex. réf. [84]). Néanmoins, l'exploitation des corrélations statistiques entre l'IMC et la mortalité liée à l'excès de poids (mais aussi à la faiblesse de poids) a conduit l'OMS à définir des critères de valeurs normales et d'écarts à cette normalité, en déficit (maigre ou sous-poids) et en excès (surpoids, obésité faible, moyenne, sévère) (figure 21).

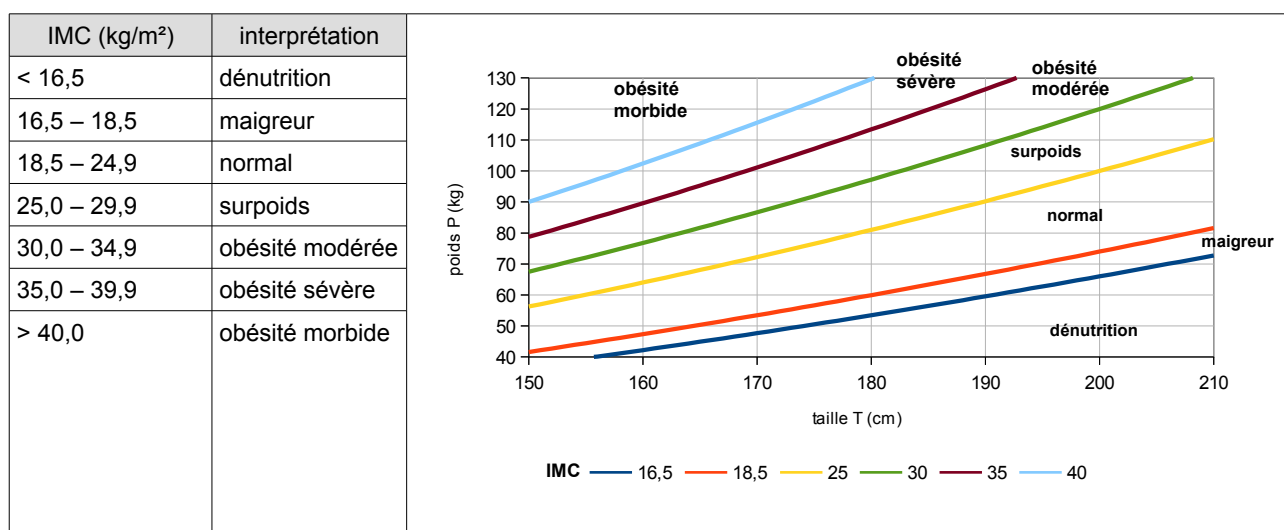


figure 21 : classement des intervalles standards de l'IMC

Dans le cadre de la pandémie de la Covid-19, des études sont menées sur la corrélation qui pourrait exister entre le taux de morbidité et la surcharge pondérale (par exemple, réf. [85]). Pour évaluer plus précisément les risques liés aux valeurs de la masse grasse d'autres indicateurs sont nécessaires. En voici quelques uns :

► **Indice de masse grasse (IMG)** : Il évalue la proportion des tissus adipeux chez l'adulte, exprimé en %. Selon ses valeurs, 5 catégories de corpulence sont adoptées sans préjuger a priori du niveau de gravité de leurs éventuelles conséquences sur la santé ou la morbidité (tableau 10, source ACE, American Council on Exercise) :

IMG		description
Homme	femme	
2-5%	10-13%	minimum vital

6-13%	14-20%	athlétique
14-17%	21-24%	en forme
18-24%	25-31%	moyen
> 25%	> 32%	obèse

tableau 10 : corpulence selon l'IMG

L'IMG peut être déterminé selon différentes méthodes, pour mémoire : densitométrie hydrostatique, comptage du potassium 40, mesure de l'eau corporelle, méthode des plis cutanés avec un adipomètre, ostéodensitométrie, RMN, impédancemétrie... Toutes ces méthodes présentent des limites.

L'IMG dépend de l'IMC ainsi que de l'âge et du sexe, comme l'exprime la formule de Deurenberg et al :

$$\text{IMG} (\%) = 1,2 \times \text{IMC} + 0,23 \times \text{âge} - 10,8 \times S - 5,4$$

où IMC est en kg/m², l'âge est en années (valable uniquement pour 15 ≤ âge ≤ 50 ans), S = 0 pour une femme, S = 1 pour un homme. La connaissance de la densité des tissus adipeux et des autres tissus permet d'exprimer l'IMG par une expression semblable à celle de l'IMC mais pour la masse grasse MG (dans cette expression l'IMG n'est donc plus en % mais en kg/m² : $\text{IMG}^* (\text{kg/m}^2) = \text{MG} (\text{kg})/\text{T}^2 (\text{m}^2)$). On définit de même l'indice de masse maigre IMM exprimé avec le même type de relation où intervient la masse maigre MM (kg) : $\text{IMM} (\text{kg/m}^2) = \text{MM} (\text{kg})/\text{T}^2 (\text{m}^2)$. On montre alors la relation entre l'IMC, l'IMG et l'IMM (réf. [84]) :

$$\text{IMC} = \text{IMM} + \text{IMG}$$

D'après ce modèle, l'IMC peut donc être élevé même avec peu de masse grasse, ou bien faible même avec une proportion de masse grasse élevée ; les effets suivants sont donc pris en compte :

- effet de la composition corporelle sur l'IMC ;
- effet de l'âge et du sexe sur la masse grasse ;
- effet d'excès ou au contraire de déficit musculaire sur l'IMC.

► **Indice de corpulence fondé sur la surface corporelle** (SBSI, surface based body shape index) (réf. [82]) : Cet indice prend en compte à la fois la taille et la forme du corps, son expression simplifiée est un nombre sans dimension donné par :

$$\text{SBSI} \approx \frac{T^2 \times C}{A \times L}$$

avec : T taille, C tour de ceinture, A surface corporelle, L périmètre longitudinal du tronc (longueur mesurée à partir de la base du cou de la boucle passant verticalement sur l'avant puis remontant verticalement sur l'arrière du tronc : torse et abdomen). T, C, A, L doivent être exprimés avec la même unité de base (m ou bien cm).

► **Système d'Edmonton pour évaluer le stade de l'obésité** (EOSS, Edmonton Obesity Staging System) (réf. [87], [88]) : L'indicateur EOSS est particulièrement appliqué à l'état d'obésité. Il classe la population atteinte d'obésité sur une échelle à 5 niveaux, selon la gravité de l'obésité, évaluée non seulement par IMC ou IMG, mais aussi par l'appréciation médicale des problèmes de santé avérés ou potentiels dans le contexte desquels l'obésité existe : certaines pathologies, comorbidités psychiatriques, et qualité de vie. C'est donc une approche systémique.

Description de ces niveaux :

- stade EOSS 0 :
 - absence de signes de facteurs de risque liés à l'obésité ;
 - et : absence de symptômes physiques ;
 - et : absence de symptômes psychologiques ;
 - et : absence de limitations fonctionnelles.
- stade EOSS 1 :
 - facteurs de risques subcliniques (hypertension artérielle HTA modérée, intolérance au glucose, taux des enzymes du foie élevés...) ;
 - ou : symptômes physiques légers, ne nécessitant pas de traitement spécifique des comorbidités (dyspnée d'effort modérée, douleurs articulaires ponctuelles, états de fatigue ponctuels...) ;
 - ou : symptômes psychologiques légers avec maintien de la qualité de vie.
- stade EOSS 2 :
 - comorbidités nécessitant un traitement médical (HTA, diabète type 2, syndrome d'apnée du sommeil SAS, arthrose, reflux gastro-œsophagiens...)

- *ou* : symptômes psychologiques modérés (dépression, troubles du comportement alimentaire, addictions, crises d'angoisse...) ;
- *ou* : limitations fonctionnelles modérées dans la vie quotidienne.
- stade EOSS 3 :
 - atteinte sévère d'un organe en relation avec l'obésité (infarctus du myocarde, insuffisance cardiaque, complications du diabète, problèmes rénaux...) ;
 - *ou* : symptômes psychologiques sévères (dépression importante, état suicidaire...) ;
 - *ou* : diminution importante de la qualité de vie.
- stade EOSS 4 :
 - atteinte importante par les comorbidités ;
 - *ou* : symptômes psychologiques très handicapant (maladies neurodégénératives...) ;
 - *ou* : limitations fonctionnelles majeures (perte de mobilité...).

8-3 - La condition d'apport journalier des nutriments

L'alimentation quotidienne doit apporter les nutriments que nous avons vus précédemment :

- ▶ L'eau, pour une hydratation suffisante ;
- ▶ Les vitamines (point 2) : liposolubles A, E, K, D et hydrosolubles B, C ;
- ▶ Les protéines (point 3) : sources d'énergie, éléments bâtisseurs de l'organisme. Toutes les protéines animales contiennent les acides aminés (indispensables dans les muscles, neuromédiateurs...). Voir aussi réf. [19].
- ▶ Les glucides (point 4) : ils sont les carburants de l'organisme. Sur un plan nutritionnel, on distingue :
 - les sucres lents : amidon (pâtes, féculents...) qui se dégradent en glucose (qui a un rôle fondamental, entre autres, pour le cerveau) ;
 - les sucres rapides : fructose, lactose (dans les fruits et légumes principalement) ;
 - les sucres ajoutés : saccharose (sucre blanc, sucre brun).
- ▶ Les lipides (point 5) : ils jouent, entre autres, un rôle fondamental dans la structure des membranes des cellules, et les tissus du cerveau. On a vu qu'ils se répartissent en acides gras saturés, et en acides gras insaturés :
 - Les acides gras saturés (beurre, viandes...), lorsqu'ils sont en excès présentent un risque sur les artères ;
 - Les acides gras insaturés (oméga 3, oméga 6, oméga 9 dans les végétaux, huile d'olive, pépins de raisin, noix, colza, tournesol, amandes, poissons gras tels que sardines...) protègent le cœur et les vaisseaux.
- ▶ Les minéraux (macro-éléments ou micro-éléments, point 6) : magnésium, potassium, calcium... que l'on trouve surtout dans les produits laitiers, les légumes secs...
- ▶ Les fibres alimentaires (point 7), dont on a vu l'importance du rôle sur le transit intestinal et la flore intestinale.

La durée minimale d'un repas doit être de 20 minutes. Un repas trop rapide bouleverse la sensation de satiété et les processus d'assimilation des nutriments.

Une **alimentation quotidienne équilibrée** doit donc utiliser comme produits :

- ▶ **Viandes, poissons et œufs** : ils contiennent des protéines, des lipides en quantité variable, du fer, vitamines du groupe B. À consommer : 1 à 2 fois/jour.
- ▶ **Produits laitiers** : Fromages, lait et laitages. Ils apportent des protéines, des lipides en quantité variable, du calcium, des vitamines D. À consommer : 1 à 2 fois/jour.
- ▶ **Fruits et légumes** : ils apportent des fibres, des minéraux et des vitamines. À consommer : 5 fois/jour (3 portions de fruits et 2 portions de légumes/jour, où 1 portion = 150 g).
- ▶ **Féculents** : pain, biscottes, pâtes, riz, légumes secs, pommes de terre... Ils apportent des glucides complexes, des protéines végétales, des vitamines et des minéraux. À consommer : à chaque repas.
- ▶ **Matières grasses** : beurre, margarine, crème fraîche, graisses animales, huiles... Ils contiennent des lipides, des acides gras et des vitamines liposolubles. À consommer : avec modération.
- ▶ **Boissons** : la seule boisson indispensable est l'eau ; méfiance sur les sodas, sirops qui contiennent beaucoup de sucre ajouté. À consommer : 1,5 L/jour de boisson non alcoolisée ni sucrée.
- ▶ **Produits sucrés** : confiseries, miel, confitures, pâtisseries... Ils contiennent des glucides ajoutés, parfois complexes, et souvent des lipides. À consommer : par « plaisir », toujours avec modération.

Annexe A1 : Nicotinamide (vitamine PP ou B3)

Autres noms de cette vitamine: niacinamide, amide de l'acide nicotinique, nicotylamide.

Il s'agit d'une vitamine hydrosoluble synthétisée dans l'organisme par le tryptophane. Besoin quotidien: 20

mg/jour.

La carence en vitamine PP provoque la pellagre, maladie caractérisée par des lésions cutanées (érythèmes rouges bilatéraux, collier de Casal, desquamation de la peau) et des muqueuses (stomatite, langue rouge, gastrite, hypochlorhydrie du tube digestif), des diarrhées et des troubles nerveux (fatigue, insomnie, dépression, hallucinations, délire, agitation, confusion ou folie pellagreuse, psychose organique avec perte de mémoire, désorientation, rigidité des membres). La vitamine PP joue un rôle important dans les réactions enzymatiques impliquées dans l'oxydoréduction des glucides et des protéines.

Hormis sa présence dans l'ail, la vitamine PP se trouve dans la levure de bière, quelques céréales, les viandes, poissons, oeufs, légumes, fruits, lait.

Références

- [1] Frédéric Élie : *Protéines et acides aminés* - site <http://fred.elie.free.fr> , décembre 2022
- [2] Frédéric Élie : *Notions sur les glucides* - site <http://fred.elie.free.fr> , décembre 2022
- [3] Frédéric Élie : *Notions sur les lipides et les acides gras* - site <http://fred.elie.free.fr> , décembre 2022
- [4] Frédéric Élie : *Notions sur les oligoéléments et minéraux en nutrition* - site <http://fred.elie.free.fr>, décembre 2022
- [5] ANSES : *Les compléments alimentaires, nécessité d'une consommation éclairée*, site www.anses.fr, 8 février 2021
- [6] V. Costil, J-C. Létard, A-L. Tarrerias, J-M. Canard : *Fiches de recommandations alimentaires*. CREGG, mars 2012
- [7] Collectif d'auteurs réunis par l'AFSSA : *La santé vient en mangeant, le guide alimentaire pour tous*. INPES, septembre 2002
- [8] Organisation Mondiale de la Santé (OMS), World Health Organization (WHO) : *Alimentation saine*. 23 octobre 2018
- [9] Comité de rédaction : J. Bernard, R. Delalandre, C. Diard, T. Gilbert, F. Heyberger, B. Leonarduzzi, C. Sauvegrain, B. Varea. *Guide de l'alimentation en accueil collectif de mineurs*. Eure Animation n°9, DDCS27, juillet 2017
- [10] ANSES: *Les vitamines*. Site <http://www.anses.fr/PN7801.htm>
- [11] ANSES: *Les vitamines liposolubles*. Site <http://www.anses.fr/PNR901.htm>
- [12] ANSES: *Alimentation humaine. Vitamine A & caroténoïdes provitaminiques*. Site <http://www.anses.fr/PNT701.htm>
- [13] ANSES: *Alimentation humaine. Vitamine D*. Site <http://www.anses.fr/PNU901.htm>
- [14] ANSES: *Les vitamines hydrosolubles*. Site <http://www.anses.fr/PN2B01.htm>
- [15] A.C. Carr et S. Maggini : *Vitamin C and Immune Function*, Nutrients 2017, 9, 1211 ; doi:10.3390/nu9111211, www.mdpi.com/journal.nutrients
- [16] Lindsay B. Nicholson : *The immune system*, Essays in Biochemistry (2016) 60 275-301 ; doi : 10.1042/EBC20160017, Portland Press
- [17] A. Puisieux : *Les acides aminés*, Tutorat Santé Lyon Sud (2016-2017) UE1
- [18] Edgar Relyveld et Jean-Claude Chermann : *Les protéines*, coll. Que sais-je ? N°679, Presses Universitaires de France, 1970
- [19] Daniel Tomé : *Besoin en protéines et en acides aminés, et qualité des protéines alimentaires*. Cholé-Doc n°111, janvier-février 2009, Centre de Recherche et d'Information Nutritionnelles, www.cerim.org
- [20] Cécile Faure : *Intérêt de la citrulline dans la prise en charge du sujet âgé dénutri : études expérimentale*

et clinique – Thèse de doctorat. Alimentation et Nutrition. AgroParisTech, 2010. Français. NNT : 2010AGPT0096. Pastel-00565413

[21] Yannick Vallee, Ibrahim Shalayel, Kieu-Dung Ly et K. V. Raghavendra Rao, « *At the very beginning of life on Earth: the thiol-rich peptide (TRP) world hypothesis* », International Journal of Developmental Biology, vol. 61, n 8-9, 8 novembre 2017

[22] Wim Derave et al : *β-Alanine supplementation augments muscle carnosine content and attenuates fatigue during repeated isokinetic contraction bouts in trained sprinters* - J Appl Physiol 103: 1736–1743, 2007

[23] Frédéric Élie : *La coagulation du sang et ses défauts : taux de prothrombine, INR, phlébite, thrombose, embolie pulmonaire* – site <http://fred.elie.free.fr> octobre 2009

[24] Fahy E., Subramaniam S., Brown H.A., Glass C.K., Merrill A.H. Jr., Murphy R.C., Raetz C.R., Russell D.W., Seyama Y., Shaw W., Shimizu T., Spener F., van Meer G., VanNieuwenhze M.S., White S.H., Witztum J.L., Dennis E.A. (2005) *A comprehensive classification system for lipids*, J Lipid Res., vol. 46(5):839-861

[25] Houda Nacir : *Nature et origine des lipides des plastoglobules*, Thèse de doctorat, Biologie végétale, Université de Bordeaux, 2015 (Français) NNT:2015BORD0080.tel-0155229

[26] Michel Rohmer, dans : *La chimie et la nature*, coordonné par Minh-Thu Dinh-Audouin, Danièle Olivier, Paul Rigny, édition EDP Sciences, octobre 2012

[27] Paule Bénit, Sylvie Bortoli, Dominique Chrétien, Malgorzata Rak et Pierre Rustin : *Pathologies liées aux déficits du cycle de Krebs*, Revue Francophone des Laboratoires n° 501 avril 2018, © 2018 – Elsevier Masson SAS

[28] Andrée Goudot-Perrot et Henry Picard : *Les oligoéléments en médecine*, coll. Que sais-je ? Presses Universitaires de France, 1988

[29] Claire Picaud : *Oligo-éléments : excès, carences et conseil officinal*, Thèse pour le diplôme d'État de docteur en pharmacie, Université de Limoges, Faculté de Pharmacie, 20 décembre 2017

[30] Collège des Enseignants de Nutrition : Support de cours : Les oligo-éléments (http://campus.cerimes.fr/nutrition/enseignement/nutrition_11/site/html/cours.pdf), © Université Médicale Virtuelle Francophone, 2010-2011

[31] Collège des Enseignants de Nutrition : *Les oligo-éléments*, 2010-2011, © Université Médicale Virtuelle Francophone

[32] Robert B. Saper et Rebecca Rash : *Zinc : An Essential Micronutrient*, American Family Physician, copyright ©2009, site www.aafp.org/afp

[33] ANSES (AFSSA) : *Les fibres alimentaires : définitions, méthodes de dosage, allégations nutritionnelles*, Rapport du Comité d'Experts spécialisé Nutrition humaine, 24 septembre 2002, rapporteur : Martine Champ ; lien : <http://anses.fr/fr/system/files/NUT-Ra-Fibres.pdf>

[34] Directive 2008/100/CE de la Commission modifiant la directive 90/496/CEE du Conseil relative à l'étiquetage nutritionnel des denrées alimentaires en ce qui concerne les apports journaliers recommandés, les coefficients de conversion pour le calcul de la valeur énergétique et les définitions, JOUE n°285 du 29 octobre 2008, consultable sur <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000019706287/>

[35] Ahmed Ben Mohamed : *Impact des fibres alimentaires et des acides gras à chaîne courte sur le dialogue tube digestif, foie, et tissus périphériques, dans le cadre d'une surnutrition*, Thèse de Doctorat Spécialité Nutrition humaine et santé, Université Clermont Auvergne, 6 décembre 2018

[36] Pascale Mosoni : *Dégradation des fibres alimentaires par le microbiote colique de l'Homme*, Innovations Agronomiques 36 (2014), 83-96, consultable sur <https://www.researchgate.net/publication/282243166>

[37] Julie Paquin : *Étude de l'effet de la consommation d'un jus enrichi en fibres alimentaires sur la satiété et la réponse glycémique*, Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval dans le cadre du programme de maîtrise en Sciences et technologie des aliments pour l'obtention du grade de maître ès sciences, lien <https://corpus.ulaval.ca/jspui/handle/20.500.11794/19848>

- [38] F. Le Bleis et al : *Comment intégrer dans le procédé de panification les modifications de propriétés rhéologiques de la pâte dues à l'incorporation de fibres alimentaires ?* Conference Paper, INRAE October 2013, consultable sur <https://www.researchgate.net/publication/289243644>
- [39] EFSA (European Food Safety Authority) Panel on Dietetic Products, Nutrition, and Allergies (NDA) : *Scientific Opinion on Dietary Reference Values for carbohydrates and dietary fibre*, EFSA Journal 2010; 8(3):1462, lien : <https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.2903/j.efsa.2010.1462>
- [40] Luc Saulnier : *Diversité et caractérisation des fibres alimentaires*, INRA, 29 mars 2018, lien : <http://www.iar-pole.com/wp-content/uploads/2018/04/Saulnier-Luc-Diversité-et-caractérisation-des-fibres-alimentaires.pdf>
- [41] Julien Comel : *L'acide phytique : réactif de précipitation bio-sourcé pour une hydrométallurgie verte*. Chimie. Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2021. Français. NNT : 2021LORR0067. Tel-03354081
- [42] Eléonor Foisnet : *Acide Phytique : Fermentation et réduction de la quantité d'acide phytique dans les produits alimentaires à base de céréales ou de protéagineux*. Master [Stage]STLOMEM324, Université de Rennes 1. 2020, 23p. Hal-02957537
- [43] Joaquim Mahé : *La Pectine, Applications d'un polymère biodégradable dans le domaine de la santé*. Thèse pour le diplôme d'État de Docteur en Pharmacie soutenue publiquement le 24 octobre 2018. Université d'Angers, Faculté de Santé, lien <http://dune.univ-angers.fr/fichiers/20062240/2019PPHA9841/fichier/9841F.pdf>
- [44] M-C. Gentès : *Utilisation de complexes formés de pectine et d'isolat de protéines sériques dans la formulation de yogourts brassés*. Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval pour l'obtention du grade de maître ès sciences. Université de Laval, Québec, 2007
lien : <https://corpus.ulaval.ca/jspui/bitstream/20.500.11794/19742/1/25036.pdf>
- [45] Sid-Ahmed Rezzoug, Zoulikha Maache-Rezzoug, Karim Allaf : *Étude de la disponibilité de la pectine extraite à partir d'écorces d'oranges suite à un prétraitement thermomécanique*. Récents Progrès en Génie des Procédés – Numéro 96 – 2007, ISBN 2-910239-70-5, Ed. SFGP, Paris, France
<https://www.researchgate.net/publication/29598725>
- [46] Thi Diem Uyen Huynh : *Structuration de matrices à base de pectine : formulation, caractérisation, fonctionnalités et libération contrôlée lors de l'encapsulation*. Thèse de doctorat soutenue publiquement : le 12 Octobre 2016, Université de Bourgogne-Franche Comté (UBFC), <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01508191/document>
- [47] ADEME. Hugues de Cherisey. 2015. *État de l'art sur la production de molécules chimiques issues du bois en France*. Rapport. 149 pages. Cet ouvrage est disponible en ligne www.ademe.fr, rubrique Médiathèque (URL)
- [48] Véronique Brudieux : *Extraction, modification enzymatique et caractérisation chimique de nouvelles structures pectiques. Application de la relation structure / activité à la dermocosmétique*. Thèse de doctorat de chimie appliquée, 2007, Université de Limoges ;
lien : <http://aurore.unilim.fr/ori-oai-search/notice/view/unilim-ori-23401?lightbox=true>
- [49] Agnan Marie Michel Combo, Mario Aguedo, Michel Paquot : *Les oligosaccharides pectiques : production et applications possibles*. Biotechnol. Agron. Soc. Environ. 2011 15(1), 153-164,
<http://hdl.handle.net/2268/145902>
- [50] Joaquim Mahé : *La Pectine, Applications d'un polymère biodégradable dans le domaine de la santé*. Thèse pour le diplôme d'État de Docteur en Pharmacie soutenue publiquement le 24 octobre 2018. Université d'Angers, Faculté de Santé, lien <http://dune.univ-angers.fr/fichiers/20062240/2019PPHA9841/fichier/9841F.pdf>
- [51] J-R. Jourdain et al : *Évaluation de l'emploi de la pectine chez les enfants vivant sur les territoires contaminés par le césium, État de l'art et analyse critique des publications*. IRSN, Direction de la Radioprotection de l'Homme, rapport IRSN/DRPH/2005-008
- [52] A. Egert et al : *Abiotic stress-induced accumulation of raffinose in Arabidopsis leaves is mediated by a single raffinose synthase*. BMC Plant Biology 2013,13:218, <http://www.biomedcentral.com/1471-2229/13/218>

- [53] Tao Li et al : *Raffinose synthase enhances drought tolerance through raffinose synthesis or galactinol hydrolysis in maize and Arabidopsis plants*. J. Biol. Chem. (2020) 295(23) 8064–8077, The American Society for Biochemistry and Molecular Biology, Inc.
- [54] Ayako Nishizawa, Yukinori Yabuta, and Shigeru Shigeoka : *Galactinol and Raffinose Constitute a Novel Function to Protect Plants from Oxidative Damage*. Plant Physiology, July 2008, Vol. 147, pp. 1251–1263, www.plantphysiol.org © 2008 American Society of Plant Biologists
- [55] Minhas V, Harvey RM, McAllister LJ, Seemann T, Syme AE, Baines SL, Paton JC, Trappetti C. 2019. *Capacity to utilize raffinose dictates pneumococcal disease phenotype*. mBio 10:e02596-18. <https://doi.org/10.1128/mBio.02596-18>.
- [56] Han-Shin Kim, Eunji Cha, YunHye Kim, Young Ho Jeon, Betty H. Olson, Youngjoo Byun & Hee-Deung Park : *Raffinose, a plant galactoside, inhibits Pseudomonas aeruginosa biofilm formation via binding to LecA and decreasing cellular cyclic diguanylate levels*. Nature Scientific Reports | 6:25318 | 2016 DOI: 10.1038/srep25318, www.nature.com/scientificreports
- [57] Dethlefsen L, Huse S, Sogin ML, Relman DA (2008) : *The pervasive effects of an antibiotic on the human gut microbiota, as revealed by deep 16S rRNA sequencing*. PLoS Biol 6(11): e280. doi:10.1371/journal.pbio.0060280, www.plosbiology.org
- [58] Myron M. Levine and Richard B. Hornick : *Lactulose Therapy in Shigella Carrier State and Acute Dysentery*. Antimicrobial Agents And Chemotherapy, Nov. 1975, P. 581-584, Vol. 8, No. 5 Copyright © 1975 American Society for Microbiology, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC429425/>
- [59] Abul Kalam Azad, Manobendro Sarker, Tiejun Li, and Jie Yin : *Probiotic Species in the Modulation of Gut Microbiota: An Overview*. BioMed Research International, Volume 2018, Article ID 9478630, <https://www.hindawi.com/journals/bmri/2018/9478630/>
- [60] JP. Bastard, C. Jardel, M. Guerre-Millo, B. Hainque : *Les transporteurs d'hexoses chez l'homme: leur rôle dans l'insulinosensibilité des tissus périphériques*. La Revue de Médecine Interne, Volume 19, Issue 2, February 1998, Pages 108-118, [https://doi.org/10.1016/S0248-8663\(97\)83420-0](https://doi.org/10.1016/S0248-8663(97)83420-0)
- [61] Andrei R. Manolescu, Kate Witkowska, Adam Kinnaird, Tara Cessford, and Chris Cheeseman : *Facilitated Hexose Transporters: New Perspectives on Form and Function*. PHYSIOLOGY 22: 234–240, 2007; 10.1152/physiol.00011.2007
- [62] Chris I. Cheeseman : *Intestinal hexose absorption: transcellular or paracellular fluxes*. Journal of Physiology (2002), 544.2, p. 336, DOI: 10.1113/jphysiol.2002.029850 © The Physiological Society 2002 www.jphysiol.org
- [63] Nadai, C., Crosato, G., Giacomini, A., Corich, V. : *Different Gene Expression Patterns of Hexose Transporter Genes Modulate Fermentation Performance of Four Saccharomyces cerevisiae Strains*. Fermentation 2021, 7, 164. <https://doi.org/10.3390/fermentation7030164>
- [64] Leone A., Nigro C., Nicolò A., Prevezano I., Formisano P., Beguinot F., Miele C. (2021) : *The Dual-Role of Methylglyoxal in Tumor Progression – Novel Therapeutic Approaches*. Novel Therapeutic Approaches. Front. Oncol. 11:645686. doi: 10.3389/fonc.2021.645686, consultable sur <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fonc.2021.645686/full>
- [65] Anna Stincone et al : *The return of metabolism: biochemistry and physiology of the pentose phosphate pathway*. Biol Rev Camb Philos Soc. 2015 August ; 90(3): 927–963. doi:10.1111/brv.12140. Consultable sur Researchgate <https://www.researchgate.net/publication/265912314>
- [66] KEGG PATHWAY Database, Wiring diagrams of molecular interactions, reactions and relations : <https://www.genome.jp/kegg/pathway.html>, map00030 : pentose phosphate pathway, © Kanehisa Laboratories, 09/09/2020
- [67] Aude Sadet : *Études de cinétiques enzymatiques par polarisation dynamique nucléaire avec dissolution (D-DNP) : application à l'étape oxydative de la voie des pentoses phosphates (PPP)*. Thèse de doctorat, Chimie analytique. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2017. Français. NNT : 2017PA066217. Tel-01893014

- [68] Site spécialisé sur les protéines et leurs fonctions UniProt: <https://www.uniprot.org/> , pour la voie PPP : pages uniprot/P11413, O95336, P52209, P49247, Q96AT9, P29401, P37837, P29401
- [69] C. Peiró, T. Romacho, V. Azcutia, L. Villalobos, E. Fernández, J. P. Bolaños, S. Moncada and C. F. Sánchez-Ferrer : *Inflammation, glucose, and vascular cell damage: the role of the pentose phosphate pathway*. Cardiovascular Diabetology, DOI 10.1186/s12933-016-0397-2, BioMed Central, 1er juin 2016
- [70] Gérard Chalès : *La conduite à tenir devant une hyperuricémie asymptomatique*. Collège des Hautes Études en Médecine, 6 mai 2020, <https://www.chem-sante.fr/>
- [71] Santé sur le Net : *Hyperuricémie*, 30 décembre 2020, <https://www.sante-sur-le-net.com/maladies/urologie-nephro/hyperuricemie/>
- [72] Vincent Poirier : *La dégradation biochimique de la lignine*. Avril 2004, consultable sur Researchgate : <https://www.researchgate.net/publication/283570212>
- [73] Jean-Luc Wertz : *La lignine* (note de synthèse, 22 novembre 2010). Document ValBiom – Gembloux AgroBioTech
- [74] D. F. Birt et al : Resistant Starch : *Promise for Improving Human Health*. American Society for Nutrition, Adv. Nutr.4, 587-601, 2013, doi. : 10.3945/an.113.004325
- [75] Mohr, A.E.; Minicucci, O.; Long, D., Jr.; Miller, V.J.; Keller, A.; Sheridan, C.; O'brien, G.; Ward, E.; Schuler, B.; Connelly, S.; et al. *Resistant Starch Combined with Whey Protein Increases Postprandial Metabolism and Lowers Glucose and Insulin Responses in Healthy Adult Men*. Foods 2021, 10, 537. <https://doi.org/10.3390/foods10030537>
- [76] Bindels, Laure B.; Walter, Jens; and Ramer-Tait, Amanda E. *Resistant starches for the management of metabolic diseases* (2015). Faculty Publications in Food Science and Technology. 196. <http://digitalcommons.unl.edu/foodsciefacpub/196>
- [77] Zs. Zurbó et J. Csapó : *The role of resistant starch in human nutrition*. ACTA UNIV. SAPIENTIAE, ALIMENTARIA, 14 (2021) 57–83. DOI: 10.2478/ausal-2021-0004
- [78] Ramadass Balamurugan, Srinivasan Pugazhendhi, Gowri M Balachander, Tamilselvan Dharmalingam, Elissa K Mortimer, Geetha L Gopalsamy, Richard J Woodman, Rosie Meng, David H Alpers, Mark Manary, Henry J Binder, Ian L Brown, Graeme P Young, and Balakrishnan S Ramakrishna : *Effect of Native and Acetylated Dietary Resistant Starches on Intestinal Fermentative Capacity of Normal and Stunted Children in Southern India*. Int. J. Environ. Res. Public Health 2019, 16, 3922; doi:10.3390/ijerph16203922 www.mdpi.com/journal/ijerph
- [79] Anthony R. Bird, Ahmed Regina : *High amylose wheat: A platform for delivering human health benefits*. Journal of Cereal Science, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcs.2017.07.005> , 0733-5210/© 2017 Elsevier Ltd. All rights reserved
- [80] Office of Nutrition and Food Labeling Center for Food Safety and Applied Nutrition : *Review of the Scientific Evidence on the Physiological Effects of Certain Non-Digestible Carbohydrates*. June 2018. Food and Drug Administration U.S. Department of Health and Human Services
- [81] World Health Organization. *Report of a WHO consultation on obesity*. Geneva: World Health Organization, 1998.
- [82] Syed Ashiqur Rahman, Donald Adjeroh : *Surface-Based Body Shape Index and Its Relationship with All-Cause Mortality*. 2015, PLoS ONE 10(12): e0144639. doi:10.1371/journal.pone.0144639 ; consultable sur <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0144639>
- [83] Dossier réalisé en collaboration avec Karine Clément et Nathalie Viguerie (INSERM) : *Obésité, Une maladie des tissus adipeux*. INSERM, 22/11/2019, <https://www.inserm.fr/dossier/obesite/>
- [84] Malatesta D. (2013) : *Validité et pertinence de l'index de masse corporelle (IMC) comme indice de surpoids et de santé au niveau individuel ou épidémiologique*. Institut des Sciences du Sport de l'Université de Lausanne, Faculté de biologie et de médecine – Département de physiologie. (Promotion Santé Suisse Document de travail 8). Berne: Promotion Santé Suisse. Consultable sur : <https://promotionsante.ch/>

- [85] Marcela Rodríguez-Flores et al : *The utility of the Edmonton Obesity Staging System for the prediction of COVID-19 outcomes: a multi-centre study*. International Journal of Obesity, August 2021, <https://doi.org/10.1038/s41366-021-01017-8>
- [86] Syed Ashiqur Rahman, Donald Adjeroh : *Surface-Based Body Shape Index and Its Relationship with All-Cause Mortality*. 2015, PLoS ONE 10(12): e0144639. doi:10.1371/journal.pone.0144639 ; consultable sur <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0144639>
- [87] Karissa L. Canning, Ruth E. Brown, Sean Wharton, Arya M. Sharma, and Jennifer L. Kuk : *Edmonton Obesity Staging System Prevalence and Association with Weight Loss in a Publicly Funded Referral-Based Obesity Clinic*. Journal of Obesity, Volume 2015, <http://dx.doi.org/10.1155/2015/619734>
- [88] Günter Vogel et Hartmunt Angermann : *Atlas de la Biologie*. Livre de Poche, Librairie Générale Française 1994
- [89] M. Medrano et al : *Vitamin D : Effect on Haematopoiesis and Immune System and Clinical Applications*, International Journal of Molecular Science 2018, 19, 2663 ; doi : 10.3390/ijms19092663
www.mdpi.com/journal/ijms
- [90] WHO/FAO/UNU. 2007 : *Protein and amino acid requirements in human nutrition*. Technical Report Series 935. Report of a Joint WHO/FAO/UNU Expert Consultation.
- [91] Isabelle Hininger-Favier : *Les lipides et dérivés*, Université Joseph Fourier de Grenoble, Année universitaire 2011/2012, UE1 Biochimie, MEDATICE, Études de santé, www.medatice-grenoble.fr
- [92] Frédéric Élie : *La légionellose* - site <http://fred.elie.free.fr> , 26 février 2004
- [93] Frédéric Élie : *Notions sur les enzymes et coenzymes* - site <http://fred.elie.free.fr>, décembre 2022
- [94] Frédéric Élie : *Les hormones* - site <http://fred.elie.free.fr>, décembre 2022
- [95] Frédéric Élie : *Archéobactéries ou Archées, et les trois grands domaines du vivant* - site <http://fred.elie.free.fr>, décembre 2022