

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

---

جامعة غرداية

Faculté des Sciences de la  
Nature et de la Vie et  
Sciences de la Terre



كلية علوم الطبيعة و الحياة  
و علوم الأرض

Département de Biologie

قسم البيولوجيا

Université de Ghardaïa

**Cours de Biochimie Nutritionnelle**

**3<sup>ème</sup> année**

**L.M.D.**

**Licence académique : Biochimie**

Conçu et Préparé par :  
M. BELHACHEMI Mohammed Habib



**Semestre : 6 / Unité d'enseignement découverte 2 (UED 3.2.1) / Biochimie nutritionnelle**

**Objectifs de l'enseignement :** Le cours vise à donner aux étudiants la capacité d'appréhender l'impact des aliments, des nutriments et des comportements alimentaires sur le métabolisme de l'homme, son bien-être et sa santé, grâce à une bonne connaissance de leurs effets sur les principales voies métaboliques, interrelations entre organes et fonctions physiologiques de l'organisme.

**Connaissances préalables recommandées :** Ce cours vise à faire l'intégration des connaissances fondamentales en biochimie, en physiologie de la digestion et en métabolisme par leur application à des données d'ordre nutritionnel.

**Contenu de la matière :**

Introduction à la biochimie nutritionnelle

1. Besoins et apports nutritionnels
2. L'eau
3. Macromolécules
  - 3.1. Glucides
  - 3.2. Lipides
  - 3.3. Protéines
4. Macroéléments
  - 4.1. Les électrolytes (sodium, potassium et le chlore)
  - 4.2. Les minéraux des os (calcium, phosphore et le magnésium)
5. Oligoéléments (fer, le zinc, le cuivre, le manganèse, l'iode, le sélénium, le chrome, le fluor,...)
6. Vitamines hydrosolubles (Vitamine C et les vitamines du groupe B)
7. Vitamines liposolubles (Vitamine A, D3, E, K)

**Références**

- Hecketsweiler, Bernadette, and Philippe Hecketsweiler. *Voyage en biochimie : circuits en biochimie humaine, nutritionnelle et métabolique*. Elsevier, 2004.
- Stipanuk, Martha H., and Marie A. Caudill. *Biochemical, physiological, and molecular aspects of human nutrition-E-book*. Elsevier health sciences, 2018.
- Nollet, Leo ML, and Fidel Toldrá, eds. *Handbook of analysis of active compounds in functional foods*. CRC Press, 2012.
- Beaufrere, Bernard, et al. *Carences nutritionnelles : étiologies et dépistage*. Diss. Institut national de la santé et de la recherche médicale (INSERM), 1999.



# Introduction à la biochimie nutritionnelle

## 1. Introduction

La nutrition est une discipline souvent mal définie. Le problème vient sans doute du fait que la nutrition est un domaine contemporain, qui se construit et évolue pour trouver son identité propre.

Confrontés au problème de nourrir une population mondiale croissant de façon inquiétante, les spécialistes du développement et de l'agronomie se sont intéressés à la nutrition.

Aujourd'hui, la nutrition est encore fragmentée en différents domaines relevant de disciplines spécialisées qu'il n'est à priori pas aisé de concilier :

- le *domaine social et économique*, dont on reconnaît de plus en plus l'importance fondamentale. Notamment, a contribué d'une manière décisive à la compréhension du processus de la famine comme étant de nature essentiellement économique et sociale ;
- le *domaine de la pathologie d'excès*, de déséquilibre et de carence, sur lequel se penche une foule de chercheurs pour affronter les gigantesques problèmes de santé publique liés aux maladies nutritionnelles de carence, d'abondance et de déséquilibre ;
- le *domaine de l'écologie*, parce que les modes de production de l'alimentation humaine sont dévastateurs. Cela est vrai, tout d'abord, dans les pays développés, avec l'utilisation de l'énergie fossile, l'épuisement des sols et la pollution, créée aussi bien par les résidus des intrants que par les sous-produits de l'agriculture. Mais la préoccupation écologiste est tout aussi importante dans les pays en développement, à cause de la surexploitation souvent désespérée des ressources ;
- le *domaine de l'agronomie* qui se remet mal de l'immense controverse soulevée par la politique de développement agricole qu'on a appelé la révolution verte, mais dont tout le monde se rend compte qu'il est un facteur-clé pour approcher les crises alimentaires de plus en plus graves qui menacent la planète ;
- le *domaine des situations dites d'urgence*, qui a sorti la malnutrition du dispensaire et de l'hôpital pour lui donner rang d'épidémie, et pour lequel les concepts ne sont pas encore fermement établis. L'approche la plus courante se limite encore trop souvent à apprécier l'état nutritionnel des enfants à travers une approche épidémiologique tatillonne et des techniques controversées, et dans une stratégie visant au traitement de la malnutrition grave et modérée.

En fait, tous ces domaines sont compatibles, parce qu'ils s'intéressent fondamentalement à la même chose : l'échange de matière et d'énergie entre l'organisme humain et son environnement.

Cet échange est dicté par le besoin de se nourrir (ou besoin nutritionnel), qui est un besoin biologique vital, et il est accompli par le processus alimentaire, qui est le processus par lequel l'être humain tente de satisfaire au besoin nutritionnel.

## 2. Définitions

- **Nutrition** : C'est l'ensemble des réactions (métaboliques) par lesquelles notre organisme transforme et utilise les aliments pour obtenir tout ce dont il a besoin pour son bon fonctionnement et pour se maintenir en vie.

- **Aliments** : Ce sont des substances naturelles complexes qui contiennent au moins deux nutriments. Ils fournissent les nutriments (glucides, protéines, lipides, vitamines et minéraux) nécessaires à l'homme pour le bon fonctionnement de son corps (rester en vie, se déplacer, travailler, construire de nouvelles cellules et tissus pour la croissance, la résistance et la lutte contre les infections).

- **Nutriments** : Ce sont des substances chimiques provenant de la transformation de l'aliment dans l'organisme. Les nutriments essentiels pour la santé sont les macronutriments et les micronutriments, (Tableau n°01).

Les macronutriments sont des substances qui sont nécessaires en grande quantité au bon fonctionnement de l'organisme. Ce sont les protéines, les glucides et les lipides.

Les micronutriments sont des substances qui sont nécessaires en petite quantité au bon fonctionnement de l'organisme. Ce sont les éléments tels que les vitamines, les sels minéraux et les oligo-éléments. Ces micronutriments sont indispensables à la bonne assimilation, à la bonne transformation, à la bonne utilisation des macronutriments. Les micronutriments ne peuvent pas être fabriqués par l'organisme et doivent impérativement être apportés par une alimentation variée, équilibrée et de bonne qualité.

**Tableau n°01 : Les nutriments essentiels pour la santé**

| Micronutriments                                 | Macronutriments                                    |
|---|--|
| Vitamines, minéraux                             | Protéines, glucides, lipides                       |
| Présents dans les aliments en petites quantités | Présents dans les aliments en grandes quantités    |
| Essentiels                                      | Essentiels   |
| Ne fournissent pas d'énergie                    | Fournissent de l'énergie                           |
| Sont absorbés tels quels                        | Sont transformés pendant le processus de digestion |

**-Alimentation :** C'est l'action d'introduire les aliments dans l'organisme.

- **Alimentation équilibrée :** Ensemble de mesures concernant la quantité de nourriture, leur répartition dans la journée, le type d'aliments et la manière de s'alimenter dans un but de respect de l'équilibre alimentaire. Une alimentation équilibrée est composée de toutes les substances nécessaires au bon fonctionnement de notre organisme. Elle doit donc apporter suffisamment de macro et de micronutriments.

- **Besoins nutritionnels:** Ils représentent la quantité moyenne d'énergie et d'autres nutriments nécessaires chaque jour à l'organisme pour se maintenir en bon état de santé physique et psychique en tenant compte de son état physiologique, de son sexe, de son poids, de son âge et de l'activité physique. Le métabolisme de base est l'énergie minimale dont l'organisme a besoin.

- **Calories :** C'est l'unité de mesure de la valeur énergétique ou de la quantité d'énergie contenue dans les aliments.

- **Digestion :** C'est le processus de transformation par l'appareil digestif des aliments en substances plus petites, les nutriments afin qu'ils soient absorbés et passent dans le sang.

- **Eau :** C'est la principale composante du corps humain (60 % de la masse corporelle). Elle est nécessaire pour la digestion, l'absorption et les autres fonctions du corps. Elle est perdue régulièrement par la sueur, les urines et la respiration. Environ 1 000 ml (4-8 verres) d'eau sont nécessaires à l'organisme chaque jour.

- **Etat nutritionnel :** C'est l'état physiologique d'un individu qui résulte de la relation entre la consommation alimentaire (en macro et micro nutriments) et les besoins, ainsi que de la capacité du corps à absorber et utiliser les nutriments.

- **Malnutrition :** C'est un état pathologique résultant d'une inadéquation par excès ou par défaut entre les apports alimentaires et les besoins de l'organisme. La malnutrition revêt trois formes différentes :

- La sous-alimentation ou sous- nutrition (manger insuffisamment)
- Les carences alimentaires (manger mal ou de façon déséquilibrée)
- La suralimentation ou sur- nutrition (manger trop)

La malnutrition est le plus souvent un état complexe où peuvent se mêler des carences multiples et concomitantes en calories, en protéines et en micronutriments.

-**Sécurité alimentaire :** existe lorsque tous les êtres humains ont, à tout moment, la possibilité physique, sociale et économique de se procurer une nourriture suffisante, saine et nutritive leur permettant de satisfaire leurs besoins et préférences alimentaires pour mener une vie saine et active.

### 3. Energie et kilocalories :

Comme toute "machine", le corps a besoin d'énergie pour fonctionner. Cette énergie lui sert pour les contractions musculaires, mais aussi pour tous les autres processus du corps: fonctionnement du système nerveux, régénération des tissus, croissance,....

Cette énergie est fournie par l'alimentation et elle est exprimée en kilo joules ou en kilo calories ou kcal (plus courant en alimentation). Elle définit pour un aliment sa valeur de "carburant" pour l'organisme après ingestion. L'énergie provient des lipides (9 kcal/g), des protéines (4 kcal/g) et des glucides (4kcal/g), mais également de l'alcool (7 kcal/g).

Avant de commencer, petit rappel de physique :

- la calorie est l'unité de mesure de la chaleur. Une calorie représente la quantité de chaleur nécessaire pour augmenter de 1°C la température de 1gr d'eau.
- l'énergie se mesure en joules.

La correspondance entre ces deux unités est la suivante :

- 1 kilocalorie (kcal ou Cal) = 4,18 kilojoules (kJ) ou 1(kJ)= 0.239 (Kcal).

Le bilan énergétique est la différence entre les apports et les dépenses énergétiques. Un bilan énergétique est équilibré quand les dépenses énergétiques sont égales aux apports énergétiques :

|   |
|---|
| Dépenses > Apports (Bilan déficitaire) → perte de poids<br>Apports > Dépenses (Bilan excédentaire) → prise de poids |
|---|

Les apports énergétiques proviennent de l'alimentation : ils sont donc variables. Les dépenses énergétiques sont la somme :

Du métabolisme de base (énergie dépensée au repos pour rester en vie : respiration, digestion, battements du cœur,...)

Des dépenses de thermorégulation : l'énergie nécessaire pour maintenir la température du corps à 37°C

Des dépenses dues à l'activité physique (les seules sur lesquelles on peut influencer volontairement)

Les besoins énergétiques sont différents selon l'âge, le sexe, l'activité... En dessous de 1500-1600 kilo calories par jour pour un adulte, un régime alimentaire est déséquilibré, souffrant de carences vitaminiques et minérales.

Les besoins peuvent monter au-delà de 5000 kilo calories par jour pour certaines catégories de sportifs.

Les apports les plus habituels pour une population adulte, sous nos climats, se situent entre 1800 et 2800 kilo calories par jour, (Tableau n°02).

Les aliments sont les fournisseurs d'énergie, mais tous n'en fournissent pas la même quantité :

- 1g de protéines : 4 kcal (16,72 kJ) ;
- 1g de glucides : 4 kcal (16,72 kJ) ;
- 1g d'alcool : 7 kcal (29,26 kJ) ;
- 1g de lipides : 9 kcal (37,62 kJ) ;

On notera que l'alcool est bien plus énergétique que les glucides ou les protéines mais il n'est pas métabolisé par l'organisme, celui-ci est rapidement évacué par l'organisme car il agit comme une toxine. Le plus énergétique restant les lipides. On comprend alors pourquoi même une faible quantité de lipides peut apporter un grand nombre de calories. Les aliments contenant beaucoup de lipides sont appelés "denses", car leur teneur en calorie est élevée.

À noter que l'eau, les vitamines, minéraux, fibres et oligo-éléments ne fournissent aucune énergie : 0 calorie.

Une ration équilibrée quotidienne doit apporter (en % de l'énergie et non de quantité) :

- 10 à 15 % de protéines (sachant qu'1 g de protéine = 4 Kcal)
- 30 à 35 % de lipides (sachant qu'1 g de lipide = 9 Kcal)
- 50 à 55% de glucides (sachant qu'1 g de glucide = 4 Kcal)
- Des sels minéraux et des vitamines selon les besoins recommandés au niveau international.

**Tableau n°02 : Besoins énergétiques recommandés selon les catégories d'âge**

| Groupes de population                  | Kilocalories (kcal)/jour |
|--|--------------------------|
| 6-11 mois                              | 680                      |
| 12-23 mois                             | 900                      |
| 2-5 ans                                | 1260                     |
| 6-9 ans                                | 1650                     |
| 10-14 ans                              | 2020                     |
| 15-17 ans                              | 2800                     |
| Adultes non enceintes/ non allaitantes | 2000-2580                |
| Femmes enceintes et allaitantes        | 2460-2570                |

Source: Adapted from WHO. 2009a. Nutritional Care and Support for People Living with HIV/AIDS: A Training Course. Participant's Manual. Geneva: WHO.

## Besoins et apports nutritionnels

Le besoin physiologique en un nutriment est la plus faible quantité de ce nutriment, sous la forme chimique la plus adaptée, nécessaire à l'organisme pour maintenir un développement et un état de santé normaux, sans perturber le métabolisme des autres nutriments.

L'apport alimentaire le plus approprié correspondrait donc à celui qui serait tout juste suffisant, compte tenu de la biodisponibilité, pour couvrir le besoin physiologique en ce nutriment, évitant de solliciter à l'extrême les mécanismes de régulation et d'entraîner une déplétion ou une surcharge des réserves.

Il est aujourd'hui impossible d'évaluer en routine le besoin physiologique en un nutriment chez un individu donné. Cette difficulté tient au fait que sa valeur diffère d'une personne à l'autre et que nous ne disposons d'aucun marqueur suffisamment précis et fiable pour prédire ces variations. En conséquence, il n'est pas possible de définir, pour chaque individu, l'apport alimentaire qui lui serait le plus approprié.

En pratique, on cherche à déterminer la quantité de nutriments qu'il faudrait apporter pour couvrir les besoins de presque tous les individus d'une population donnée afin de la protéger, dans son ensemble, du risque de carence.

### 1. AJR et ANC

Les AJR (Apports Journaliers Recommandés) et les ANC (Apports Nutritionnels Conseillés) sont des repères moyens pour les apports en nutriments. Ils constituent plutôt un minimum qu'on dépassera bien volontiers.

Les AJR et ANC sont deux façons de mesurer la quantité des principaux nutriments indispensables au bon fonctionnement du corps et présents dans les aliments. Ces apports présentent les quantités nécessaires à couvrir les besoins de l'organisme, pour ne pas subir de carences.

Les besoins nutritionnels sont divers, en fonction :

- du sexe ;
- de l'activité physique ;
- du poids et de la taille ;
- du stress quotidien ;
- ...

Ces multiples facteurs font qu'il est impossible de connaître avec précision les besoins d'un individu, d'où la création de valeurs moyennes.

L'ANC est une de ces valeurs : il définit selon divers critères, les valeurs nutritionnelles moyennes (de chaque nutriment) à consommer pour ne pas être malade. Il y a donc par exemple des ANC pour les hommes de 35 à 40 ans, pour les femmes de 20 à 25 ans, ... À noter que ces valeurs étant des moyennes, être au-dessus des ANC ne signifie pas être en excès. Par contre, plus on s'éloigne des ANC et plus le risque de carence devient important. L'ANC, de part sa multitude et sa complexité n'est utilisé que par les professionnels (industries agro-alimentaires, études scientifiques, ...).

Les AJR sont des valeurs moyennes pour toute la population. Ces moyennes sont harmonisées au niveau mondial mais l'Europe et les Américains n'ont pas défini les mêmes critères. Il n'existe donc qu'un seul AJR pour chaque nutriment. Cette valeur se base sur les besoins d'un adulte d'âge moyen non malade (qui ne veut pas dire en «bonne» santé). Ce sont les AJR qui sont utilisés par les consommateurs et notés sur les étiquettes des produits. Comme pour les ANC, si on apporte quotidiennement les AJR dans les principaux nutriments, vitamines et minéraux, les risques de carence sont limités.

Pour bien comprendre que les AJR constituent un minimum et non un maximum, il faut comprendre comment ils ont été établis. Les AJR ont vu le jour au moment de la «1ère guerre mondiale» où les soldats américains tombaient subitement malades sans que l'on comprenne pourquoi. C'est à partir de là que les scientifiques ont compris le rôle fondamental des carences vitaminiques et minérales.

Les scientifiques ont pu déterminer ainsi un «apport minimum» recommandable afin que les soldats ne tombent plus malade. Les années qui ont suivis cette création d'apport minimum a été réactualisé pour en faire profiter la population mondiale. Dorénavant nous savons combien de vitamines et minéraux nous devons ingérer pour éviter la carence. Toutefois, ce qui nous intéresse, c'est à partir de quel dosage de chaque vitamine et de chaque minéral que l'on obtient un maximum de bénéfice pour la santé.

## **2. Composition du corps humain**

On divise souvent le corps humain en trois compartiments, dont voici les proportions respectives chez un adulte bien portant de sexe masculin :

- Masse cellulaire, 55%;
- Tissu de soutien extracellulaire, 30 %;
- Masse grasse, 15 %.

La masse cellulaire est constituée de muscles, d'organes (cerveau, foie, intestins) et de sang. Elle est impliquée dans le métabolisme, les différentes fonctions du corps, le travail, etc.

Le tissu de soutien extracellulaire comprend les liquides extracellulaires (comme le plasma sanguin qui sert de soutien aux cellules sanguines) et le squelette et autres structures de soutien.

La masse grasse se trouve presque entièrement sous la peau (graisse sous-cutanée) et autour d'organes comme les intestins et le cœur. Elle sert notamment d'énergie de réserve. On en trouve une petite quantité dans la paroi des cellules et des nerfs.

Le liquide intracellulaire contient surtout des ions potassium alors que le liquide extracellulaire contient du chlorure de sodium, parmi d'autres ions bien sûr. L'eau totale peut être estimée par différentes méthodes, dont les techniques de dilution qui mesurent le volume plasmatique.

La composition du corps est largement influencée par des carences nutritionnelles perturbent la croissance et altèrent la composition du corps, la taille d'ensemble et même la taille des organes.

L'amaigrissement du marasme et de l'inanition d'une part, et la surcharge pondérale de l'obésité en constituent deux exemples extrêmes. Elle varie aussi avec le sexe et légèrement avec la race. Enfin, la composition du corps varie avec la grossesse et l'allaitement et l'âge (chez les enfants).

## **3. Métabolisme et énergie**

Le terme de métabolisme recouvre tous les processus chimiques effectués par les cellules du corps. Le processus le plus important est l'oxydation ou combustion des aliments qui fournit de l'énergie. Il est similaire au principe du moteur de voiture qui brûle de l'essence pour faire avancer le véhicule. En général, toute combustion, humaine ou automobile, produit de la chaleur en plus de l'énergie.

Les trois macronutriments – glucides, protides et lipides – produisent de l'énergie. L'énergie utilisée par l'organisme provient de l'alimentation et, en cas de jeûne, n'est produite que par la consommation de ses propres tissus.

Toutes les formes d'énergie peuvent être converties en chaleur. On peut mesurer la chaleur produite par la combustion d'un litre d'essence par exemple. De la même façon, on mesure l'énergie produite par la combustion des aliments et on l'exprime en énergie calorifique.

L'unité de mesure est la kilocalorie (kcal) égale à 1 000 fois la calorie utilisée en physique. Mais on tend à la remplacer par le joule (J) ou le kilojoule (kJ). En nutrition, on utilise le kilojoule : 1 kcal correspond à 4,184 kJ. Ces unités mesurent l'énergie, tout comme les litres mesurent une quantité et les mètres, une longueur.

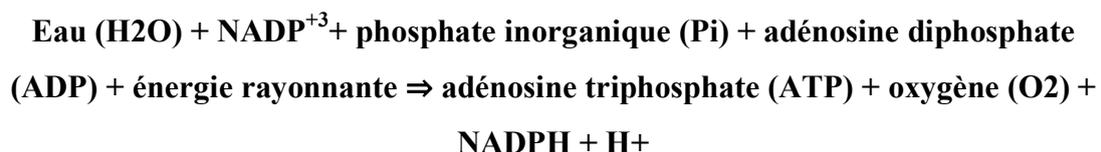
Le corps a besoin d'énergie pour assurer toutes ses fonctions, notamment le travail, le maintien de la température corporelle et le fonctionnement continu du cœur et des poumons. Chez l'enfant, l'énergie est indispensable à la croissance. Elle est aussi nécessaire à la destruction, à la réparation et au renouvellement des tissus. Ce sont des processus métaboliques, et on appelle **métabolisme de base (MB)** le rythme auquel ces fonctions s'effectuent.

### 3.1. Flux d'énergie dans la biosphère

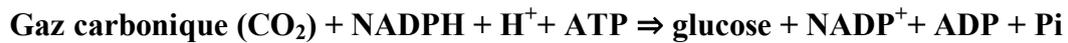
Dans le flux de l'énergie dans la biosphère, on observe deux étapes :

- ▶ Première étape, l'énergie rayonnante est transformée en énergie chimique par transfert sur une molécule transporteuse d'énergie ;
- ▶ Deuxième étape, l'énergie chimique de la molécule transporteuse est transférée à des réactions qui fournissent un travail biologique et de la chaleur.

On pense en particulier aux plantes vertes, qui la réalisent grâce à leur pigment caractéristique, la chlorophylle. Mais il y a aussi le phytoplancton des océans, qui contribue pour plus de la moitié à toute la photosynthèse terrestre. La réaction de photosynthèse transfère l'énergie rayonnante à l'adénosine, selon les termes suivants :



L'énergie chimique portée par l'ATP permet alors d'accomplir la deuxième étape, c'est-à-dire de réaliser un travail, en particulier celui de la synthèse du glucose :



Cette deuxième réaction permet de fabriquer un composé réduit (riche en énergie chimique potentielle), grâce à l'énergie chimique de l'ATP agissant sur des molécules oxydées (pauvres en énergie chimique potentielle).

Il est maintenant possible d'écrire l'équation globale de la photosynthèse telle qu'elle est donnée habituellement :



Le glucose sert ensuite d'intermédiaire pour fabriquer les autres composés carbonés des plantes (glucides, lipides et protéines), au cours de réactions qui, elles aussi, requièrent de l'énergie fournie par l'ATP. Pour les protéines, il faut encore des molécules azotées, prises dans le sol en provenance indirecte de l'atmosphère.

Le règne animal est incapable de photosynthèse. Il a néanmoins besoin d'ATP pour accomplir le travail biologique. Les animaux l'obtiennent en consommant des composés carbonés réduits qui viennent tous directement ou indirectement des organismes capables de photosynthèse. Ces composés sont oxydés au cours de la fermentation et de la respiration, et l'énergie dégagée par l'oxydation est récupérée sous forme d'ATP. Par exemple, l'oxydation complète du glucose fournira 38 molécules d'ATP.

Finalement, les règnes survivent dans leur environnement grâce à l'ATP qui permet l'accomplissement du travail biologique. Ce dernier se résume à trois formes principales :

- Le travail chimique, essentiellement de synthèse pour fabriquer les constituants de l'organisme ;
- Le travail osmotique, de transfert et de concentration de substances à l'intérieur de l'organisme ;
- Le travail mécanique, sous forme de forces de traction exercées par des fibres contractiles, dont l'exemple le plus spectaculaire est la contraction du muscle des animaux supérieurs.

### **3.2. L'ATP, molécule clef de l'énergétique cellulaire**

Les êtres vivants tirent leur énergie de l'oxydation des nutriments, et ceci est vrai même pour les plantes chlorophylliennes (qui utilisent l'énergie des photons pour fabriquer de la matière organique qui pourra être oxydée ultérieurement). Cependant, l'énergie libérée lors de cette oxydation n'est pas directement utilisable par les cellules. Elle est captée par un intermédiaire qui, dans l'immense majorité des cas, se révèle être l'ATP.

L'ATP est une molécule qui joue un rôle central dans ce flux. Dans un premier temps, régénérée au cours de la photosynthèse, elle fait la liaison entre les deux étapes, en présidant à la formation des précurseurs de tous les composés carbonés utilisés ultérieurement dans la biosphère. Ensuite, régénérée par la fermentation et la respiration, elle préside aux réactions qui fournissent un travail biologique.

L'ATP est donc le donneur immédiat d'énergie libre de très loin le plus important dans les systèmes biologiques. Ce rôle d'intermédiaire, couplé au fait que les stocks d'ATP ne sont pas très importants, fait que cette molécule est soumise à un renouvellement intense, ce qui nécessite une production permanente, rapide et importante.

Si on fait le calcul chez l'homme, on estime que la consommation énergétique moyenne d'un individu est d'environ 8 360 kJoules (2 000 kcal) par 24 heures. Cette énergie, contenue dans les molécules organiques (généralement glucides et lipides), doit servir à fabriquer de l'ATP avant d'être utilisée par les cellules. Le rendement de cette synthèse est l'ordre de 0,5, le reste étant perdu sous forme de chaleur. C'est donc environ 4 180 kJoules (1 000 kcal) qui seront stockés transitoirement dans les molécules d'ATP puis utilisés par les cellules.

Les 4 180 kJoules fournis aux cellules correspondent donc à l'hydrolyse de 83,6 moles d'ATP, ce calcul est bien sûr basé sur de nombreuses approximations et le résultat n'est pas à prendre comme un chiffre exact, mais il donne un ordre de grandeur et permet de conclure qualitativement que l'ATP est une molécule possédant un turnover extrêmement rapide.

### **4. Eléments et les fonctions des aliments**

Le tableau n°03, présente une classification simplifiée des constituants des aliments.

L'être humain consomme des aliments et non des éléments nutritifs isolés. La majorité des aliments, dont des denrées de base comme le riz, le maïs et le blé, fournissent principalement des glucides, sources d'énergie, mais aussi des quantités non négligeables de protéines, un peu de lipides et d'autres nutriments utiles.

Si une personne a un besoin de maintenance de 2 000 kcal (8 360 kJ), elle peut le couvrir en brûlant 500 g d'acides aminés ou de glucides ( $2\,000 \text{ kcal} / (4 \text{ kcal} / \text{g}) = 500 \text{ g}$ ) ou 222,2 g d'acides gras ( $2\,000 \text{ kcal} / (9 \text{ kcal} / \text{g}) = 222,2 \text{ g}$ ).

En réalité, elle brûlera un mélange de glucides, d'acides aminés et d'acides gras pour une consommation se situant entre 222 et 500 g de nutriments. L'individu ne consommant pas à proprement parler des nutriments mais des aliments, on calculera le besoin en combustible à partir des tables de composition alimentaire, en fonction des différents aliments consommés, pour en établir la proportion qui fournira 2 000 kcal (8 360 kJ).

**Tableau n°03 : Classification simple des constituants alimentaires**

| Elément   | Rôle  |
|---|---|
| Eau   | Fournit les liquides du corps et contribue à la régulation thermique  |
| Glucides  | Energie servant au travail et au maintien de la température   |
| Lipides   | Energie et acides gras essentiels   |
| Protéines   | Croissance et cicatrisation   |
| Minéraux  | Formation des tissus, métabolisme et protection   |
| Vitamines   | Métabolisme et protection   |
| Eléments non digestibles et non absorbables dont fibres | Véhicule pour d'autres nutriments, volume, habitat de la flore bactérienne, contribue à une bonne élimination des déchets |

## L'eau

L'eau est le support et le milieu liquide de la vie. C'est aussi le composé le plus abondant de tout organisme vivant, elle intervient dans presque tous les processus vitaux. Elle sert à éliminer les déchets et à réguler la température du corps. C'est le nutriment le plus important en termes de quantité. On peut survivre des semaines sans manger, mais sans eau, on meurt en quelques jours.

La quantité moyenne d'eau contenue dans un organisme adulte est en effet de 65 %, ce qui correspond à environ 45 litres d'eau pour une personne de 70 kilogrammes. La teneur totale en eau du corps humain dépend de plusieurs facteurs (corpulence, âge notamment...).

Plus précisément, près de 60 % du corps humain d'un homme adulte est constitué d'eau, ce qui correspond à peu près à 42 litres d'eau chez une personne de 70 kg. Chez les femmes, en raison de la proportion plus importante des tissus adipeux, ce taux est de 55%. À la naissance, ce pourcentage atteint même 78 % chez le bébé.

Cette eau n'est pas répartie uniformément dans le corps humain, certains organes en contiennent plus que d'autres :

- poumons : 78 % ;
- sang : 79 % ;
- cerveau : 76 % ;
- muscles lisses : 75 % ;
- os : 22,5 % ;
- tissus adipeux : 10 %.

Rappelons que les besoins de base sont estimés à 2 600 mL/j et qu'ils sont couverts par des apports exogènes (1 300 mL pour l'eau des boissons, 1 000 mL pour l'eau contenue dans les aliments) et par la production endogène d'eau par le métabolisme.

Par contre, chaque jour, le corps humain élimine 2400 mL d'eau à travers la respiration, la sueur, l'urine... Il faut donc remplacer ce volume d'eau par la boisson et l'alimentation pour éviter la déshydratation.

Le comportement dipsique est finement régulé. Pourtant les apports en eau sont souvent inadaptés. Les insuffisances d'apports sont fréquentes, notamment chez le sujet âgé. Les excès ne sont pas rares et doivent être recherchés chez l'insuffisant cardiaque ou rénal.

La molécule est hautement réactive, et ses produits d'ionisation ( $\text{H}_3\text{O}^+$  et  $\text{OH}^-$ ) déterminent en grande partie les caractéristiques structurelles et les propriétés biologiques de la plupart des composants cellulaires. L'ionisation de l'eau favorise les échanges de protons ( $\text{H}^+$ ) et joue donc un rôle fondamental dans les réactions acide-base biologiques.

De par sa polarité, la molécule est en outre un excellent solvant. En fin, l'eau fournit l'oxygène émis au cours de la photosynthèse dont dépendent tous les êtres dont le flux énergétique procède de la respiration.

## Macromolécules (les glucides)

Les glucides ou sucres, sont la principale source de carburant du corps avec les lipides, ce sont eux qui fournissent l'énergie nécessaire à la vie des cellules, aux contractions musculaires et aux réflexions de notre cerveau.

### 1. Classification des glucides

Les glucides sont composés de carbone, d'hydrogène et d'oxygène dans les proportions 6:12:6, avec leur formule générale  $(CH_2O)_n$ ,

Leur métabolisme produit de l'énergie et libère du dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) et de l'eau ( $H_2O$ ). Ils se distinguent en deux catégories : les glucides simples et les glucides complexes, (Tableau n°04).

Selon ses structures chimiques, on peut les diviser en trois groupes :

- Les monosaccharides comme le glucose, le fructose et le galactose ;
- Les disaccharides comme le saccharose (sucre de table), le lactose et le maltose ;
- Les polysaccharides comme l'amidon, le glycogène et la cellulose.

**Tableau n°04 : Classification générale des glucides**

| Classification générale des glucides |                  | Sources principales                                   |
|--------------------------------------|------------------|---|
| Glucides simples                     | Monosaccharides  | Glucose, Galactose, Fructose                          |
|                                      | Disaccharides    | Saccharose, Lactose, Maltose, Tréhalose, Isomaltulose |
| Glucides complexes                   | Oligosaccharides | Maltodextrines<br>F.O.S*                              |
|                                      | Polysaccharides  | Amidon  |

\* Fructo-OligoSaccharides

### **1.1. Monosaccharides**

Les glucides les plus simples sont les monosaccharides ou sucres simples. Ils traversent la barrière intestinale sans être modifiés par les enzymes digestives. Les plus courants sont le glucose, le fructose et le galactose.

- Le glucose, appelé aussi dextrose, se trouve notamment dans les fruits, les patates douces et les oignons. La majorité des autres glucides, comme les disaccharides et l'amidon, sont convertis en glucose par les enzymes digestives. Le glucose est oxydé pour produire de l'énergie et du dioxyde de carbone qui est rejeté par la respiration. Comme le glucose est le sucre présent dans le sang, c'est celui qu'on utilise le plus pour fournir de l'énergie en alimentation intraveineuse. Il s'agit généralement de glucose dissous à 5 ou 10 pour cent dans de l'eau stérile.
- Le fructose se trouve dans le miel et les fruits.
- Le galactose résulte de la digestion du lactose, sucre du lait, qui se scinde en galactose et glucose.

### **1.2. Disaccharides**

Les disaccharides, composés de deux sucres simples, doivent être scindés en monosaccharides avant de pouvoir être absorbés par l'intestin. Ce sont le saccharose, le lactose et le maltose. Le sucrose ou saccharose est le nom du sucre de table (qui sert par exemple à sucrer le café). Il est extrait de la canne à sucre ou des betteraves sucrières. On le trouve aussi dans les carottes et l'ananas. Le lactose se trouve dans le lait animal et humain ; sa saveur est beaucoup moins sucrée. Le maltose se trouve dans les graines germées.

### **1.3. Polysaccharides**

Les polysaccharides sont les sucres les plus complexes. Ils sont habituellement insolubles dans l'eau et quelques-uns seulement sont utilisables par l'homme. Ce sont par exemple l'amidon, le glycogène et la cellulose.

- L'amidon est une source d'énergie majeure que l'on trouve surtout dans les graines de céréales et dans les racines comme les pommes de terre et le manioc. L'amidon est libéré par la cuisson sous l'effet de la chaleur qui fait éclater les granules.
- Le glycogène est fabriqué par l'organisme ; on l'appelle aussi amidon humain. Il est constitué de monosaccharides produits par la digestion de l'amidon de

l'alimentation. Dans l'intestin, l'amidon du riz ou du manioc, par exemple, est scindé en monosaccharides qui passent dans le sang. Les monosaccharides en excédent qui ne sont pas utilisés immédiatement pour produire de l'énergie sont réunis pour former du glycogène. Le glycogène est stocké dans les muscles et le foie en petites quantités.

Tous les glucides digestibles qui sont consommés en quantité supérieure aux besoins immédiats de l'organisme sont transformés en graisse et stockés dans le tissu adipeux sous-cutané ou ailleurs.

- La cellulose, l'hémicellulose, la lignine, la pectine et les gommes sont parfois appelées glucides non assimilables, car l'homme ne peut pas les digérer. La cellulose et l'hémicellulose sont des polymères végétaux qui constituent la base des parois cellulaires. Ce sont des substances fibreuses. La cellulose qui est un polymère du glucose est l'une des fibres des plantes vertes. L'hémicellulose est habituellement un polymère d'hexose et de pentose. La lignine est le principal constituant du bois. Les pectines se trouvent dans les tissus végétaux et la sève et sont des polysaccharides colloïdaux. Les gommes sont des glucides visqueux extraits de plantes. Les pectines et les gommes sont utilisées par l'industrie alimentaire.

Le tube digestif humain ne peut pas les décomposer ou les utiliser pour produire de l'énergie. Par contre, le bétail possède des bactéries intestinales qui permettent de décomposer la cellulose et de produire de l'énergie.

Chez l'homme, ces substances non assimilables traversent le tube digestif et constituent la majeure partie du volume et du ballast des selles, c'est pourquoi on les appelle néanmoins "fibres alimentaires". Les fibres font l'objet d'un intérêt croissant, car on considère à présent les régimes riches en fibres comme favorables à la santé.

Le premier avantage de ces régimes riches en fibres est de réduire l'incidence de la constipation. Le volume alimentaire produit par les fibres contribue sans doute à la sensation de satiété et devrait permettre de réduire les excès alimentaires et l'obésité. La présence de ces fibres accélère le transit des aliments et contribue donc au bon fonctionnement de l'intestin. Enfin, les fibres se lient à la bile dans l'intestin grêle.

## 2. Notions propres aux glucides

- Sucre lent ou rapide : définit la vitesse d'assimilation
- Glucide simple ou complexe : détermine la taille des molécules, mais pas forcément leur vitesse d'assimilation, car un sucre complexe peut aussi être rapide
- Index glycémique : il donne la vitesse à laquelle la digestion du glucide va augmenter la production d'insuline, l'hormone anabolisante responsable de l'utilisation ou du stockage des glucides.

Les glucides sont caractérisés par leur index glycémique, c'est-à-dire leur capacité à augmenter le taux de glucose dans le sang, (Tableau n°05).

**Tableau n°05 : Index glycémique de certains aliments**

Index glycémique dit «rapide» (IG > 70) :

| Sucre   | IG  |
|---|-----|
| <b>Glucose pur</b>  | 100 |
| <b>Carotte (cuites)</b>   | 92  |
| <b>Miel</b>   | 88  |
| <b>Raisin</b>   | 85  |
| <b>Jus de pomme</b>   | 75  |
| <b>Riz blanc cuit (non complet)</b>   | 73  |
| <b>Pain blanc (non complet)</b>   | 72  |
| <b>Pommes de terre cuites à la vapeur (alors que la purée à un IG de 81), on voit bien ici la différence que peut produire le mode de cuisson</b> | 70  |

Index glycémique dit «modéré» (50 < IG < 70)

| Sucre  | IG |
|--|----|
| <b>Riz complet</b>   | 66 |
| <b>Sucre de table blanc (saccharose)</b>                     | 65 |
| <b>Pain complet</b>  | 65 |
| <b>Banane</b>  | 63 |
| <b>Pâtes cuites (à base de farine blanche, non complète)</b> | 51 |
| <b>Petits pois</b>   | 50 |

Index glycémique dit «lent» (IG < 50) :

| Sucre                               | IG |
|-------------------------------------|----|
| <b>Pâtes alimentaires complètes</b> | 42 |
| <b>Pois chiches</b>                 | 36 |
| <b>Lait</b>                         | 25 |
| <b>Lentilles</b>                    | 29 |
| <b>Germes de soja</b>               | 15 |

- Index glycémique bas <50 (à privilégier dans l'alimentation) : fructose, lactose, cerise, pomme, poire, pêche, pamplemousse, pain au son, pâtes, pois chiche, petit pois, lentille, haricot sec, lait, yaourt.

- Index glycémique intermédiaire entre 50 et 74: saccharose, kiwi, banane, mangue, ananas, jus d'orange, pain de seigle, riz, pomme de terre nouvelle, betterave, carotte, chips, pizza, pâtisserie, croissant, crème glacée
- Index glycémique élevé > 75 (à limiter dans l'alimentation) : miel, glucose, maltose (bière), pastèque, corn flakes, baguette, riz cuisson rapide, rutabaga, frites, pomme de terre en flocons, gaufre, fève.

### **3. Apports nutritionnels conseillés en glucides**

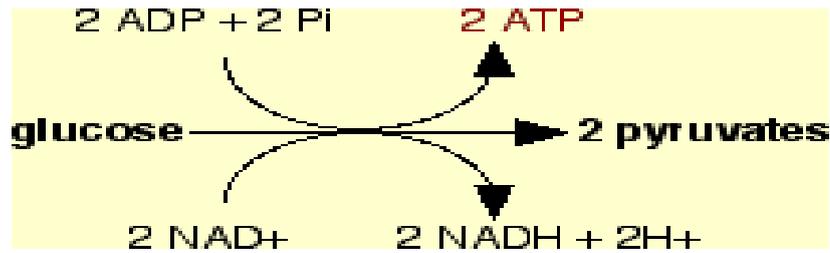
Une alimentation équilibrée comprend entre 50 et 55% de la ration énergétique en glucides, soit 1000 à 1100 kcal pour un régime équilibré à 2000kcal. C'est donc au minimum 250 grammes de glucides qui doivent être ingérés par jour.

Leur rôle est celui de carburant. Les glucides ingérés sont transformés en glucose qui apporte de l'énergie. Le glucose est le carburant unique du cerveau, mais également du cristallin et de la rétine. Les autres organes fonctionnent soit avec du glucose, soit avec l'énergie provenant des lipides. Les glucides sont stockés en très petite quantité dans l'organisme, sous forme de glycogène. On retrouve le glycogène dans le foie et dans le muscle, mais cette réserve énergétique (environ 2500 kcal pour 600 g) est faible au regard des réserves lipidiques (11kg, 100 000 kcal) : son énergie est utilisée pendant le jeûne de la nuit (glycogène du foie), mais également pendant les premiers temps d'un exercice physique (foie + muscle) en attendant que les réserves sous forme de graisse soient mobilisées, ce qui se produit après 20 à 45 mn d'effort selon l'état d'entraînement et le stock de glycogène des individus.

### **4. Du glucose à l'ATP**

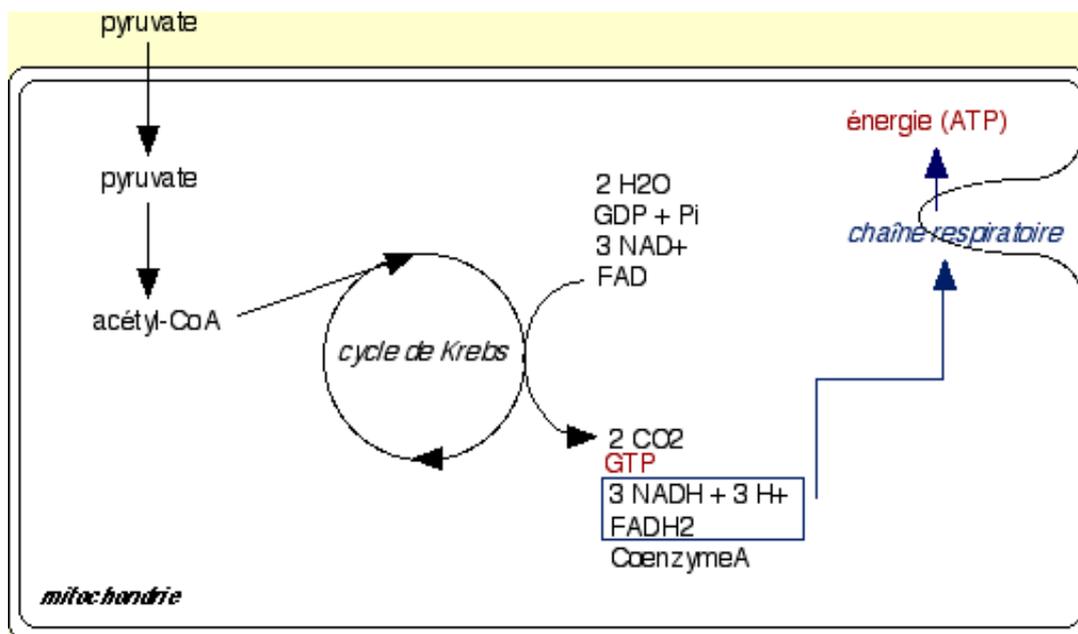
Toutes les cellules du corps humain sont capables d'utiliser le glucose pour produire un intermédiaire énergétique : la molécule d'ATP (adénosine triphosphate). Cette molécule est utilisée dans de nombreux processus cellulaires. Certaines cellules ont un besoin impératif de glucose comme source d'énergie : c'est le cas en particulier des cellules nerveuses. Le transfert de l'énergie chimique du glucose en énergie chimique sous forme d'ATP se réalise en plusieurs étapes : la glycolyse, puis le cycle de Krebs et la chaîne respiratoire au sein des mitochondries.

De manière très schématique, la glycolyse permet la dégradation de glucose en pyruvate. Cette dégradation permet la production de deux ATP et de deux NADH, H<sup>+</sup>, (Figure n°01).



**Figure n°01 - La voie de la glycolyse**

Dans le cas le plus général les pyruvates formés sont ensuite dégradés lors du cycle de Krebs, au sein des mitochondries (dans certains cas les pyruvates permettent la réalisation d'une fermentation, qui régénère les  $\text{NAD}^+$  indispensables au fonctionnement de la glycolyse). Ceci s'accompagne de la formation, transitoire, de molécules d'acétyl-coenzyme A (acétyl-CoA). La dégradation complète du pyruvate permet donc, grâce à la chaîne respiratoire, la formation d'ATP, (Figure n°02).



**Figure n°02 - Les réactions mitochondriales**

En conclusion, la glycolyse, le cycle de Krebs et la chaîne respiratoire permettent le transfert de l'énergie chimique contenue dans le glucose en énergie chimique contenue dans l'ATP.

## **Macromolécules (les lipides)**

Les lipides sont définis comme étant des molécules insolubles dans l'eau. Il y a plusieurs familles de lipides, mais toutes partagent les propriétés issues du fait qu'une partie importante de la molécule est en réalité un hydrocarbure. Les lipides ont eux aussi plusieurs fonctions : participation à la structure de la membrane cellulaire, éléments de stockage et de transport d'énergie, couche de protection, marqueur de l'identité et activité biologique comme hormones ou vitamines.

Les lipides doivent représenter 35 à 40% de l'apport énergétique total et se trouvent sous forme de graisses comestibles de l'alimentation humaine, qu'elles soient solides à température ambiante comme le beurre ou liquides comme les huiles d'arachide ou de graines de coton.

La quantité de lipides de l'organisme est très variable d'un individu à l'autre, contrairement aux protéines et aux glucides qui ont des valeurs comparables. Les plus faibles taux de lipides se retrouvent chez les sportifs d'endurance, et notamment les marathoniens dont la masse grasse peuvent descendre en dessous de 5% du poids du corps, alors qu'elle est de 12 à 25% chez un individu de corpulence normale.

Les graisses de l'organisme se répartissent en deux groupes : les graisses structurelles et les graisses de réserve. Ces dernières constituent, comme leur nom l'indique, une réserve d'énergie alors que les lipides de structure font partie intégrante des membranes cellulaires, des mitochondries et de certains organites intracellulaires.

### **1. Classification des lipides**

Les nombreux acides gras de l'alimentation humaine se répartissent en deux groupes : saturés et insaturés. Ces derniers peuvent être poly ou mono-insaturés.

Les acides gras sont des composés chimiques linéaires, ayant la particularité de comporter soit aucune double liaison (acide gras saturé, ou AGS), soit une double liaison (acide gras mono-insaturé, ou AGMI), soit plusieurs double liaisons (acide gras poly-insaturé, ou AGPI).

**1.1. Acides gras saturés :** ils sont synthétisés par l'organisme humain, et sont présents dans l'alimentation principalement d'origine animale. Les AGS n'ont pas tous la même valeur nutritionnelle.

Certains ont un rôle dans la constitution des phospholipides et les triglycérides de réserve, ou dans la structure de certaines membranes nerveuses, comme la myéline, d'autres s'ils sont présents en excès ont un rôle hypercholestérolémiant, et sont donc un facteur important du risque de maladies cardiovasculaires, enfin l'acide butyrique, produit par l'organisme par dégradation des fibres, est un inhibiteur de la prolifération tumorale.

**1.2. Acides gras mono-insaturés :** ils représentent la part la plus importante d'acides gras ingérés, et l'AGMI quantitativement le plus présent est l'acide oléique, que l'on retrouve dans l'huile d'olive essentiellement, mais également dans certaines graisses animales (oie, homme). Ils sont utilisés comme source d'énergie, et on les retrouve dans les triglycérides de dépôt qu'ils maintiennent fluides à la température corporelle.

**1.3. Acides gras poly-insaturés:** ce sont les plus importants qualitativement de notre alimentation, car certains, non synthétisables par l'organisme sont dits essentiels: ce sont l'acide linoléique (C18:2, n-6) et l'acide alpha-linolénique (C18:3, n-3). Les 2 fonctions principales des AGPI sont la constitution des membranes et leur fluidité, et la synthèse de médiateurs spécifiques.

► **Les rôles physiologiques spécifiques aux AGPI de la famille des oméga 6 (n-6):** Fonction de reproduction, intégrité de l'épiderme, fonction plaquettaire (coagulation sanguine), régulation de la lipémie (cholestérol), système immunitaire et inflammatoire.

► **Les rôles physiologiques spécifiques aux AGPI de la famille des omégas 3 (n-3) :** Fonction sur la vision, sur le système nerveux, régulation du taux de triglycérides circulants.

Les AGPI n-6 peuvent entrer en compétition avec les AGPI n-3 ; il est donc important de respecter un rapport de 5 à 1 entre ces 2 familles.

Les AGPI se trouvent dans les huiles végétales principalement, et aussi dans les graisses animales :

- Famille n-6 : huiles d'arachide, de noix, de soja, de tournesol, de maïs, de pépin de raisin.
- Famille n-3 : huile de colza, huile de noix, huile de soja, poissons (notamment des mers froides).

## **2. Apports nutritionnels conseillés en lipides**

Les lipides sont indispensables pour donner un goût agréable aux aliments. Ils apportent aussi 9 kcal/g, soit près du double des calories apportées par les glucides et les protéines (environ 4 kcal/g) ; ils permettent donc de réduire le volume des aliments. Un régime alimentaire équilibré doit comporter une quantité de lipides comprise entre 30 et 35% de l'apport énergétique total (AET) : en dessous de 30%, l'équilibre en acides gras n'est plus assuré, au-dessus de 35% le risque de stockage sous forme de graisse dans l'organisme est important.

La répartition recommandée est de :

- Acides gras saturés : 8% de l'AET
- Acides gras mono-insaturés : 20% de l'AET
- Acides gras poly-insaturés: 5% de l'AET, avec un rapport de 1/5 entre acide alpha-linolénique (n-3) et acide linoléique (n-6)

Une personne qui accomplit un travail très dur surtout en climat froid, peut avoir besoin de 4 000 kcal par jour. Dans ce cas, il est indispensable qu'une large proportion de la ration provienne des lipides pour éviter un volume excessif.

Il est donc souhaitable d'augmenter dans des limites raisonnables le contenu engraisse ou en huile de leur alimentation afin d'augmenter la densité énergétique d'une alimentation à base de glucides volumineux.

La transformation agro-industriel des aliments modifie parfois la structure chimique des AG insaturés, pour les amener sur une forme trans. Cette forme augmente la teneur en LDL-cholestérol, et a donc un effet d'augmentation du risque cardiovasculaire.

## **3. Lipides dans l'alimentation et leurs impacts sur la santé**

Les lipides, graisses ou acides gras sont des macro-nutriments souvent diabolisés mais pourtant indispensables au fonctionnement de nos cellules et de nos hormones.

Les parois des cellules sont en partie constituées de graisses, tout comme le cerveau, qui en est composé pour moitié. Les acides gras jouent aussi un rôle dans la lubrification des articulations et dans le stockage et la fourniture d'énergie. En effet, les lipides stockés dans les tissus adipeux représentent la plus grande réserve d'énergie du corps. Toutes les calories absorbées et non utilisées par le corps y sont stockées (hypertrophie adipocytaire), en attendant d'être utilisées.

Les graisses servent aussi à améliorer la digestion. En réduisant la vitesse d'assimilation, elles permettent d'étaler la digestion et le passage des nutriments dans le flux sanguin.

De plus la synthèse des hormones est basée sur les lipides, tout comme le stockage de certaines vitamines (dites liposolubles). Les hormones sexuelles femelles (œstrogènes, progestérones) et les hormones sexuelles mâles comme la testostérone sont produites à partir des lipides.

Les lipides ont deux origines distinctes, qui déterminent leur caractéristique :

- Graisses d'origine végétale :

Contiennent des acides gras insaturés (les "bonnes graisses"). Elles sont contenues notamment dans les poissons gras (omega-3), les huiles végétales (olive, colza, ...), l'avocat et toutes les sortes d'oléagineux (noix, noisettes, ...).

- Graisses d'origine animale :

Contiennent des acides gras saturés, dont la consommation doit être tempérée (deviennent de "mauvaises graisses" si non-biologique) pour éviter de faire monter le taux de cholestérol sanguin à basse densité (LDL). On les trouve généralement dans tous les produits animaux : viandes, produits laitiers (fromage, yaourt, beurre), charcuteries et bien sûr dans pratiquement tous les plats cuisinés.

#### ✓ **Bonnes et mauvaises graisses**

La notion simpliste de « bonnes » et de « mauvaises » graisses a le mérite de distinguer celles que notre alimentation apportent généralement en trop fortes quantités (saturées et insaturées trans) et en trop faibles quantités (insaturées de type omega-3).

On distingue globalement deux catégories de lipides :

- les Acides Gras Saturés, présents dans les graisses animales et dans la graisse de noix de coco ;
- les Acides Gras Insaturés, présents principalement dans les graisses végétales (omega-6/9) et les huiles de poisson (omega-3);

Ces derniers sont souvent qualifiés de « bonnes graisses » car ils permettent de réduire le taux de triglycérides et cholestérol sanguin adhérent aux parois artérielles (LDL) tout en augmentant le cholestérol sanguin « santé » participant aux modulations hormonales (HDL). Le gras de saumon, de thon, de foie de morue font partie des omega-3, en consommer peut être très utile pour augmenter son apport en bonnes graisses.

Cette classification est primordiale en matière de santé car la consommation excessive de graisses saturées est l'un des facteurs de l'athérome et des maladies coronariennes. Les acides gras poly-insaturés (AGPI), auraient au contraire un rôle protecteur. Les AGPI comprennent deux acides gras appelés essentiels car nécessaires à une bonne santé : les acides alpha-linoléique et linoléique.

Ils jouent un rôle majeur dans la synthèse de structures cellulaires et de nombreux composés biologiques importants. L'acide arachidonique et l'acide docosahexaénoïque seraient essentiels à la croissance et au développement des jeunes enfants. Des expériences réalisées sur des animaux et des études effectuées chez l'homme ont mis en évidence des altérations de la peau, de la croissance et du fonctionnement vasculaire et neurologique en l'absence de ces acides ; de plus, ils sont sans aucun doute essentiels à la nutrition des cellules et tissus de l'organisme, ils servent aussi de véhicule au transport des vitamines liposolubles.

Rappelons que les graisses sont une zone de stockage pour tous les déchets et toxines que peut absorber l'animal au cours de sa vie : métaux lourds, restes de médicament, ...

Pour cela on distingue deux classes des lipides qui représentent un rôle négatif pour la santé :

- lipides saturés non biologique : des déchets médicamenteux et hormonaux se retrouvent en concentration dans les graisses de pièces de viande non biologique et ont un impact négatif sur la santé humaine. On en retrouve dans la plupart des pièces de viande proposés en «premiers prix».
- lipides insaturés de type trans : ce sont des graisses artificielles, utilisées dans de nombreuses huiles de friture, qui existent peu à l'état naturel (les produits laitiers en contiennent un peu).

La consommation de ces produits entraîne une hausse de cholestérol adhérent (LDL) tout en diminuant le cholestérol santé (HDL), qui se traduit en problèmes cardiovasculaires. Dans la mesure du possible, il est conseillé de bannir les graisses insaturés-trans et de privilégier vos acides gras issus de l'agriculture biologique où de producteurs respectant l'alimentation et l'hygiène de vie de ses élevages.

#### 4. Des lipides à l'ATP

La dégradation des acides gras, contenus dans certains lipides, permet aussi aux cellules de produire de l'ATP. Cette dégradation se réalise dans la mitochondrie, selon un ensemble de réactions regroupées sous le terme d'hélice de Lypen (ou  $\beta$ -oxydation des acides gras, Figure n°03).

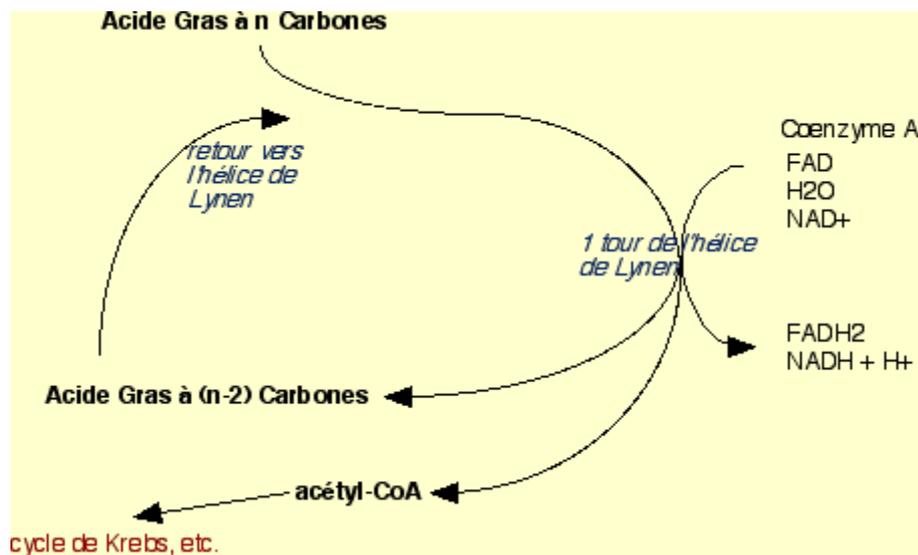


Figure n°03 - Hélice de Lypen

À chaque « tour » de l'hélice de Lypen, l'acide gras « perd » deux carbones, sous la forme d'une molécule d'acétyl-CoA. Cette molécule d'acétyl-CoA entre alors dans le cycle de Krebs, ce qui permet la production d'ATP.

## **Macromolécules (les protéines)**

Tout comme les glucides et les lipides, les protéines contiennent du carbone, de l'hydrogène et de l'oxygène, mais aussi de l'azote et souvent du soufre. L'azote est un élément primordial nécessaire à la croissance et à la cicatrisation. Les protéines sont les principaux constituants structurels des cellules et des tissus et constituent, avec l'eau, la majeure partie des muscles et des organes. Elles varient d'un tissu à l'autre selon qu'elles sont dans le foie, le sang ou des hormones.

La quantité de protéines présente dans l'organisme varie en fonction de nombreux facteurs (âge, sexe, exercice physique...). Chez un adulte de 70 kg, en bonne santé, la quantité de protéines est d'environ 11 kg.

Elles sont nécessaires pour :

- la croissance et le développement du corps ;
- l'entretien, la cicatrisation et le remplacement de tissus usés ou endommagés ;
- la production d'enzymes métaboliques et digestives ;
- la constitution des hormones comme la thyroxine et l'insuline.

Bien que les protéines puissent aussi fournir de l'énergie, elles sont surtout des constituants essentiels des cellules. Toutes les cellules doivent être remplacées à un moment ou un autre et ce remplacement nécessite des protéines.

### **1. Acides aminés**

Les protéines sont des grosses molécules faites de chaînes d'acides aminés reliés par des liaisons peptidiques. Les acides aminés sont des structures simples, ils sont composés d'azote, carbone, hydrogène et oxygène. Certains contiennent également du soufre et du phosphore. Les différentes protéines correspondent à des acides aminés différents liés d'une manière différente. La protéine est donc une structure complexe résultant du chaînage de multiples structures simples.

Lors de la digestion, sous l'action des enzymes protéolytiques gastriques et intestinales, les protéines sont scindées en peptides et en acides aminés de la même façon que les amidons sont scindés en monosaccharides et les lipides en acides gras.

Parmi les nombreux acides aminés, 20 sont communs aux plantes et aux animaux. Parmi eux, huit sont considérés comme indispensables à l'homme et sont appelés essentiels : la phénylalanine, le tryptophane, la méthionine, la lysine, la leucine, l'isoleucine, la valine et la thréonine. Un neuvième acide aminé, l'histidine, est indispensable à la croissance et est donc essentiel pour les enfants ; il pourrait aussi être nécessaire à la cicatrisation. Les autres acides aminés sont : la glycine, l'alanine, la sérine, la cystéine, la tyrosine, l'acide aspartique, l'acide glutamique, la proline, glutamine, l'asparagine et l'arginine. Chaque protéine comporte un mélange spécifique d'acides aminés qui contiennent ou pas les huit acides aminés essentiels.

## 2. Origine des protéines

Il existe deux types de protéines : (Tableau n°06)

- Les protéines animales : (viandes, poissons, œufs, lait et produits laitiers).
- Les protéines végétales : (féculents, céréales et légumes secs).

Les protéines d'origine animale ont des teneurs élevées en acides aminés indispensables aux besoins de l'homme, contrairement aux protéines d'origine végétale. Lors d'un régime végétarien, il est important de compléter les différentes sources de protéines végétales (céréales, légumineuse, etc.) pour garantir l'apport de tous les acides aminés essentiels.

**Tableau n°06 : Différentes types de protéines dans l'alimentation**

Dans l'alimentation, les protéines se trouvent dans les produits d'origine animale :

| Pour une portion adulte |                       |       |
|-------------------------|-----------------------|-------|
| Viande, poissons :      | 20% de protéines      | 30 g  |
| Œuf :                   | 12%                   | 12 g  |
| Lait :                  | 3,2% (1/2 écrémé UHT) | 6,5 g |
| Camembert :             | 21%                   | 6,3 g |
| Yaourt :                | 4%                    | 5 g   |

Mais aussi dans les produits d'origine végétale :

|                    |       |        |
|--------------------|-------|--------|
| Tofu (soja) :      | 11,5% | 11,5 g |
| Pois chiche :      | 9%    | 9 g    |
| Haricot sec cuit : | 7%    | 14 g   |
| Petit pois :       | 6%    | 12 g   |
| Fève :             | 5%    | 10 g   |
| Maïs :             | 3%    | 3 g    |
| Pâtes :            | 4,5%  | 9 g    |
| Baguette :         | 8%    | 12 g   |

### **3. Qualité et quantité des protéines**

Pour évaluer la valeur protéique d'un aliment, il faut savoir combien de protéines totales il contient et quels acides aminés, notamment essentiels, et dans quelles proportions. On connaît bien à présent la valeur protéique de la plupart des aliments. Certaines protéines ont un mélange d'acides aminés plus intéressant que les autres ; on dit qu'elles ont une valeur biologique élevée. L'albumine de l'œuf et la caséine du lait, par exemple, contiennent les huit acides aminés essentiels dans de bonnes proportions et sont supérieures à la zéine du maïs, qui contient peu de tryptophane et de lysine, ou à la protéine du blé, qui contient très peu de lysine. Il ne faut pas pour autant considérer que les protéines du blé et du maïs sont sans valeur : elles contiennent une certaine quantité des acides aminés essentiels et d'autres acides aminés. Leurs insuffisances peuvent être compensées si on les consomme avec d'autres protéines qui contiennent une plus grande quantité des acides aminés déficients. Deux aliments qui ont une valeur protéique basse peuvent ainsi aboutir à un mélange d'excellente qualité s'ils sont consommés ensemble.

La qualité d'une protéine dépend dans une large mesure de sa composition en acides aminés et de sa digestibilité. Si un ou plusieurs acides aminés essentiels manquent, sa qualité diminue. L'acide aminé essentiel le plus déficient est appelé "acide aminé limitant". C'est lui qui détermine le rendement de l'ensemble de la protéine.

Les nutritionnistes s'intéressent à la qualité de l'ensemble du repas et non à celle d'un aliment isolé. Si l'alimentation habituelle est déficiente en un acide aminé essentiel, cette carence limite l'utilisation des autres acides aminés pour construire de nouvelles protéines.

L'homme, et surtout l'enfant, qui consomme une nourriture carencée en protéines animales a besoin d'un ensemble varié d'aliments d'origine végétale et pas seulement d'un aliment de base. Dans de nombreux plats traditionnels, des légumineuses (arachides, haricots, pois chiches, etc.), bien que pauvres en acides aminés soufrés, complètent parfaitement les céréales, pauvres en lysine. Un mélange de protéines végétales, surtout si elles sont consommées lors du même repas, peut donc remplacer les protéines animales.

#### **4. Apports nutritionnels conseillés en protéines**

Les besoins des enfants sont supérieurs à ceux des adultes à cause de la croissance.

Lors des premiers mois, les nourrissons ont besoin de 2,5 g par kg de poids et par jour. Entre 9 et 12 mois, le besoin diminue à 1,5 g. Cependant, les protéines ne sont utilisées pour la croissance que si l'apport énergétique global est satisfaisant.

Une femme enceinte a besoin d'un supplément de protéines pour le développement du fœtus. De même, une femme qui allaite a besoin de plus de protéines pour compenser celles excrétées dans le lait.

Dans certains pays, les mères peuvent allaiter jusqu'à deux ans ; il leur faut donc des protéines supplémentaires pendant neuf mois plus deux ans pour chaque enfant.

Les besoins en protéines et les doses recommandées ont fait l'objet de recherches, de débats et de nombreux désaccords au cours des 50 dernières années. La FAO et l'OMS rassemblent régulièrement des experts pour faire le point des connaissances et publier des directives. Selon les recommandations les plus récentes émanant d'une réunion entre experts de la FAO, de l'OMS et de l'Université des Nations Unies, la dose journalière de sécurité a été fixée à 1,5 g par kg pour un enfant de 1 an, puis à 1 g pour un enfant de 6 ans. Les apports recommandés par les Américains sont un peu plus élevés : 1,75 g à un an et 1,2 g à 6 ans. Chez les adultes, les recommandations FAO/OMS/UNU sont de 0,8 g/kg pour les femmes et 0,85 g/kg pour les hommes de poids corporel et par jour (soit 50 g de protéines/jour pour un adulte de 60 kg), être présentent 10 à 15% de l'apport énergétique total.

Ces valeurs recommandées sont fournies pour deux types d'alimentation :

un régime riche en fibres composé principalement de céréales, de racines et de légumineuses avec peu d'aliments d'origine animale, et, d'autre part, une alimentation plus variée avec moins de fibres et plus de protéines complètes. Par exemple, une femme non enceinte pesant 55 kg a besoin de 49 g de protéines dans le premier régime et de 41 g dans le second. En effet, les fibres réduisent l'utilisation des protéines.

Un apport protéique insuffisant compromet la croissance et la cicatrisation. Il est particulièrement préjudiciable à l'enfant, non seulement parce qu'il grandit mais aussi parce que le risque infectieux est spécialement élevé dans l'enfance. De même, un apport insuffisant d'énergie compromet la croissance, car une partie de l'apport protéique sera détournée en fourniture d'énergie et indisponible pour la croissance.

L'excès de protéines absorbées est excrété par les reins, qui sont alors fortement sollicités. Cet excès peut également amener une pathologie appelée goutte, souvent précurseur de l'arthrite. En revanche une insuffisance en protéines entraîne des pathologies souvent associées aux nutriments qui les accompagnent : carence en fer, en calcium par exemple.

Cependant, si l'apport calorique des glucides et lipides de la ration est insuffisant, une partie des protéines sera transformée en énergie et donc indisponible pour la croissance, le renouvellement cellulaire et les autres besoins métaboliques. Cela est particulièrement important pour les enfants qui ont besoin de plus de protéines pour grandir.

### **5. Digestion et absorption des protéines**

Les protéines de l'alimentation subissent une série de modifications chimiques dans le tube digestif. La physiologie de cette digestion est complexe : les protéines sont hydrolysées en acides aminés sous l'action de la pepsine et de la rénine gastriques, de la trypsine pancréatique et de l'érepsine intestinale. La majorité des acides aminés est absorbée dans l'intestin grêle et passe dans le courant sanguin pour gagner le foie et les autres organes.

Tout excédent d'acides aminés est scindé en deux parties : le groupement amine ( $\text{NH}_2$ ) sera excrété dans l'urine sous forme d'urée et le reste transformé en glucose. On a maintenant des preuves qu'une petite fraction des protéines gagne certaines cellules de la paroi intestinale. Certaines pourraient jouer un rôle dans la transmission de l'immunité de la mère à son nouveau-né.

Une faible partie des protéines et acides aminés libérés dans l'intestin n'est pas absorbée. Elle forme l'azote fécal avec les cellules desquamées des villosités intestinales remaniées par les bactéries et les différents microorganismes intestinaux.

La majorité des protéines humaines se trouve dans les muscles. Il n'existe pas de véritable système de stockage des protéines comme il en existe un pour les graisses et le glycogène. Mais on est certain à présent qu'un individu bien nourri a suffisamment de protéines dans son organisme pour rester en bonne santé même si son apport alimentaire de protéines est interrompu quelques jours.

## Les minéraux (Macroéléments)

Les éléments minéraux sont classés en 2 catégories : les minéraux majeurs ou macro-éléments (apports quotidiens de l'ordre du gramme) et les oligo-éléments ou éléments trace (apports inférieurs à une centaine de microgrammes).

- Macroéléments : le sodium (Na), le potassium (K), le chlore (Cl), le calcium (Ca), le phosphore (P) et le magnésium (Mg).
- Oligoéléments : le fer (Fe), le zinc (Zn), le cuivre (Cu), le manganèse (Mn), l'iode (I), le sélénium (Se), le chrome (Cr), le fluor (F), puis le molybdène, le cobalt, le silicium, le vanadium, le nickel, le bore et l'arsenic.

Leur présence dans l'organisme varie de plus de 1kg pour le Calcium, à moins de 1g pour certains oligoéléments comme le cobalt ou le chrome, (Tableau n°07).

La plupart des minéraux, en dehors de leurs fonctions spécifiques, interviennent à faible concentration dans des phénomènes vitaux, comme activateurs d'enzymes, régulateurs, ou transporteurs...

En revanche, une alimentation équilibrée et donc diversifiée apporte suffisamment de micronutriments lorsque les apports énergétiques sont supérieurs à 1 500 kcal/j. Les besoins sont facilement couverts par la consommation de certains aliments courants avec une fréquence adéquate.

**Tableau n°07 : Besoins en minéraux selon les différentes tranches d'âge**

|              | Ca<br>mg | P<br>mg | Mg<br>mg | Fe<br>mg | Zn<br>mg | Cu<br>mg | F<br>mg | I<br>µg | Se<br>µg | Cr<br>µg |
|--------------|----------|---------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|----------|----------|
| 1-3 ans      | 500      | 350     | 80       | 7        | 6        | 0,8      | 0,5     | 80      | 20       | 25       |
| 4-6 ans      | 700      | 450     | 130      | 7        | 7        | 1        | 0,8     | 90      | 30       | 35       |
| 7-9 ans      | 900      | 600     | 200      | 8        | 9        | 1,2      | 1,2     | 120     | 40       | 40       |
| 10-12 ans    | 1200     | 830     | 280      | 10       | 12       | 1,5      | 1,5     | 150     | 45       | 45       |
| 13-15 ans ♂  | 1200     | 830     | 410      | 13       | 13       | 1,5      | 2       | 150     | 50       | 50       |
| 13-15 ans ♀  | 1200     | 800     | 370      | 16       | 10       | 1,5      | 2       | 150     | 50       | 50       |
| 16-19 ans ♂  | 1200     | 800     | 410      | 13       | 13       | 1,5      | 2       | 150     | 50       | 50       |
| 16-19 ans ♀  | 1200     | 800     | 370      | 16       | 10       | 1,5      | 2       | 150     | 50       | 50       |
| ♂ adulte     | 900      | 750     | 420      | 9        | 12       | 2        | 2,5     | 150     | 60       | 65       |
| ♀ adulte     | 900      | 750     | 360      | 16       | 10       | 1,5      | 2       | 150     | 50       | 55       |
| ♂ > 65ans    | 1200     | 750     | 420      | 9        | 11       | 1,5      | 2,5     | 150     | 70       | 70       |
| ♀ > 65 ans   | 1200     | 800     | 360      | 9        | 11       | 1,5      | 2       | 150     | 60       | 60       |
| ♀ enceinte   | 1000     | 800     | 400      | 30       | 14       | 2        | 2       | 200     | 60       | 60       |
| ♀ allaitante | 1000     | 850     | 390      | 10       | 19       | 2        | 2       | 200     | 60       | 55       |
| p. > 75ans   | 1200     | 850     | 400      | 10       | 12       | 1,5      | 2       | 150     | 80       | -        |

## 1. Classification des minéraux de point de vue fonctionnel

### 1.1. Les électrolytes

Les trois électrolytes principaux sont le **sodium**, le **potassium** et le **chlore**. Ils sont responsables de l'osmolalité des fluides de l'organisme, et leur répartition dans l'organisme décide du volume intra- et extracellulaire, tableau n°08.

**Tableau n°08 : Répartition ionique entre le milieu intra- et extracellulaire**

|                  | Intracel. (mM) | Extracel.(mM) |
|------------------|----------------|---------------|
| Na <sup>+</sup>  | 5 - 15         | 145           |
| K <sup>+</sup>   | 140            | 5             |
| Mg <sup>2+</sup> | 0,5            | 1 -2          |
| Ca <sup>2+</sup> | 0,0001         | 1 - 2         |
| Cl <sup>-</sup>  | 5 -15          | 110           |

Le **sodium** est spécifiquement un cation extracellulaire, dont le rôle est de maintenir le volume de liquide extracellulaire et la pression osmotique de ce liquide et de maintenir l'équilibre acide-base. Il participe en outre à la transmission des impulsions dans les nerfs et les muscles et entre ces derniers, et aux phénomènes de transport des métabolites à l'intérieur des cellules.

Contrairement au sodium, le **potassium** est un cation spécifiquement intracellulaire, avec le **magnésium**, les **phosphates** organiques et les anions protidiques, où il joue un rôle complémentaire au sodium, pour des fonctions qui sont essentiellement les mêmes que celles du sodium.

Le **chlore** est la contrepartie électrochimique du sodium et du potassium.

En situation de crise, en revanche, on a souvent affaire à des sujets (dénutris ou pas) qui exigent des sels de réhydratation dont la composition est différente selon qu'il y a ou non malnutrition sévère.

Les apports en sodium dépassent largement les besoins physiologiques (< 4 g/j de chlorure de sodium). La pression artérielle est susceptible d'augmenter chez les gros consommateurs de sel, mais ce problème ne concerne que certains sujets hypertendus (répondeurs aux variations des apports de sel). Les besoins de potassium et de phosphore sont couverts par une alimentation normale. Il en va de même pour le magnésium, mais il peut néanmoins exister des carences d'apports (< 2/3 des ANC) lorsque les apports énergétiques sont insuffisants.

On notera que la déshydratation peut avoir deux origines :

- un déficit en eau qui se traduit par une concentration plasmatique accrue de chlore et de sodium ; c'est ce qui se produit quand on ne boit pas assez d'eau. Le traitement consiste simplement à faire boire de l'eau, ou, en dernier recours uniquement, à administrer en intraveineuse une solution de dextrose à 2,5 – 5% (Tableau n°09), (l'eau pure provoquerait une hémolyse) ;

**Tableau n°09 : Caractéristique de la solution de dextrose injectable à 5%**

|                                | DIN      | Format | Composition (g/L)      |                       | pH        | Teneur calorique (ca/L) |
|--------------------------------|----------|--------|------------------------|-----------------------|-----------|-------------------------|
|                                |          |        | Dextrose hydraté*, USP | Osmolarité (mOsmol/L) |           |                         |
| Dextrose injectable à 5 %, USP | 00060348 | 250 mL | 50                     | 252                   | 3,2 – 6,5 | 170                     |

\* Le dextrose est une forme purifiée du maïs et peut donc contenir du fructose.

- un déficit combiné de chlore, sodium et eau, qui est la forme de loin la plus fréquente de déshydratation et dont les causes les plus communes, et donc les plus connues, sont surtout la diarrhée, les vomissements et une transpiration abondante ; le traitement de choix de la diarrhée consiste à administrer par voie orale des sels de réhydratation à dissoudre dans l'eau et qui existent en sachets selon deux formules standard (Tableau n°10) :

**Tableau n°10 : Les formules standard des sels de réhydratation**

|                                  |                                  |
|----------------------------------|----------------------------------|
| – 3,5 g de chlorure de sodium    | – 3,5 g de chlorure de sodium    |
| – 2,5 g de bicarbonate de sodium | – 2,9 g de citrate trisodique    |
| – 1,5 g de chlorure de potassium | – 1,5 g de chlorure de potassium |
| – 20 g de glucose                | – 20 g de glucose                |

Ces formules sont à dissoudre dans 1 litre d'eau potable. La posologie est de 1 litre / 24 heures pour les nourrissons, 1 litre / 8 à 24 heures selon l'âge pour les enfants, et consommation à volonté pour les adultes. L'idée est tout d'abord de réhydrater, puis de compenser les pertes à mesure qu'elles se produisent.

Par ailleurs, les excès d'électrolytes sont essentiellement dus à un apport excessif en sel ou à des problèmes physiologiques. On a longtemps pensé que l'apport excessif de sodium par le sel jouait un rôle important dans l'hypertension artérielle, dont un apport en sel supérieur à 8 g / jour induit bien une augmentation de la tension artérielle. Les recommandations actuelles sont donc de ne pas dépasser cet apport, qui doit tenir compte du contenu en sel des aliments. Par ailleurs, un excès d'apport en sel déplace le calcium des os et pourrait contribuer à l'ostéoporose.

## **1.2. Les minéraux des os**

Les trois minéraux prédominants des os sont le calcium, lié dans les os au phosphore (sous une forme cristalline qui est l'hydroxyapatite), et le magnésium.

### **➤ Le calcium**

Le corps d'un adulte de taille moyenne contient environ 1 250 g de calcium dont 99 pour cent se trouvent dans les os et les dents, combinés au phosphore sous forme de phosphate de calcium, substance dure qui confère au corps sa rigidité. Le calcium se trouve également en faible quantité (10 mg par 100 mL de sérum) dans le sang où il joue un rôle important ainsi que dans les liquides intracellulaires et les tissus mous (environ 10g).

#### **• Propriétés et fonctions**

Chez l'homme et les autres mammifères, le calcium et le phosphore ont un rôle majeur dans la constitution du squelette et les dents, mais aussi dans diverses fonctions métaboliques comme l'activité musculaire, les stimuli nerveux, les activités enzymatiques et hormonales, coagulation sanguine et division cellulaire.

L'être humain constitue son capital osseux pendant les premières phases de la vie : enfance, adolescence et début de vie adulte. Après 20-25 ans, il n'y a plus d'augmentation de la quantité de calcium. C'est donc pendant l'enfance, et plus particulièrement entre 10 et 14 ans que l'apport alimentaire en calcium est primordial.

Après 50 ans pour les femmes, et un peu plus tard pour les hommes, la masse minérale osseuse diminue et doit être compensée par un apport alimentaire de calcium important, afin d'éviter les risques de fractures ostéoporotiques (vertèbres, col du fémur, poignet).

Un système complexe maintient des taux de calcium et de phosphore adéquats, sous le contrôle des hormones parathyroïdiennes comme la calcitonine et la forme active de la vitamine D (1,25 dihydroxy-cholécalciférol).

Le calcium se trouve également dans les liquides extracellulaires, notamment le plasma sanguin et diverses cellules.

Dans le sérum, le calcium est soit ionisé soit lié à des protéines. Les laboratoires ne mesurent généralement que le calcium total, qui est de 8,5 à 10,5 mg/dl (2,1 à 2,6 mmol/litre). Une chute en dessous de 2,1 mg est appelée hypocalcémie et induit divers symptômes. La tétanie (à ne pas confondre avec le tétanos dû au bacille tétanique), qui se traduit par des spasmes et parfois des convulsions, résulte d'une chute du calcium ionisé dans le sang.

- **Sources alimentaires**

Tout le calcium de l'organisme, sauf celui hérité de la mère, vient de l'alimentation et de l'eau consommée. Les meilleures sources de calcium sont, par ordre d'importance, les fromages à pâte dure (750 mg / 100 g), les oléagineux avec en particulier les amandes, les noix et les noisettes (175 mg / 100 g), les fromages à pâte molle et le lait (130 mg / 100 g), enfin les fruits séchés et les légumineuses (100 mg / 100g).

L'apport de calcium est particulièrement crucial pendant la croissance, phase de développement des os. Les besoins nutritionnels du fœtus sont généralement satisfaits ; en effet, sur le plan nutritionnel, le fœtus se comporte comme un parasite. Si l'alimentation maternelle est pauvre en calcium, celui-ci sera fourni par les réserves osseuses. Un nourrisson exclusivement allaité aura assez de calcium tant que le volume de lait maternel sera suffisant. Une femme qui allaite et fournit un litre de lait à son enfant perd donc 300 mg de calcium par jour. En revanche, on connaît les besoins supplémentaires liés à l'allaitement et qui doivent être fournis par l'alimentation, sous peine de décalcification des os de la mère.

- **Absorption et excrétion**

L'absorption du calcium se fait par deux mécanismes, l'un, actif et régulé par la vitamine D, principalement dans le duodénum, et l'autre, passif, tout au long de l'intestin mais principalement dans l'iléon. L'absorption du calcium dépend aussi largement des autres nutriments dans l'alimentation, du statut hormonal et d'états physiologiques comme la grossesse et l'allaitement. L'absorption est également réduite par la présence dans l'alimentation de phytates, d'oxalates et de phosphates.

L'absorption du calcium n'est que de l'ordre de 25 à 50 % du calcium ingéré, le reste étant excrété dans les selles. Le calcium en excédent est excrété dans l'urine et la sueur.

Cependant, en cas de besoin, l'organisme peut retenir beaucoup plus de calcium, ce qui explique que la carence par déficit dans l'alimentation soit rare.

- **Apports nutritionnels conseillés**

Les besoins humains sont difficiles à définir avec précision car l'absorption du calcium dépend de plusieurs facteurs, et les pertes varient considérablement d'un individu à l'autre.

Les besoins augmentent pendant la grossesse, l'allaitement et la croissance ainsi qu'en cas de régime hyper-protéiné.

Voici les apports journaliers recommandés :

- adulte : 400 à 500 mg ;
- enfant : 400 à 700 mg ;
- femme enceinte ou allaitante : 800 à 1000 mg.

- **Carence**

Les maladies liées à une carence d'apport en calcium sont rares. Il n'est pas vraiment prouvé que les régimes de beaucoup d'adultes des pays en développement limités à 250 ou 300 mg de calcium aient une influence néfaste sur leur état de santé. On présume que les adultes parviennent à maintenir l'équilibre quand leurs apports sont bas. Les femmes qui subissent une série de grossesses et de périodes d'allaitement prolongées et perdent beaucoup de calcium ont un risque d'ostéomalacie. Mais il s'agit souvent plus d'une carence en vitamine D qu'en calcium.

Le rachitisme des enfants résulte d'une carence en vitamine D et non en calcium, bien que les besoins de l'enfant soient plus importants. On n'a pas démontré d'effet négatif sur la croissance d'une carence calcique chez l'enfant.

L'ostéoporose est une maladie fréquente du vieillissement, surtout chez la femme (Le squelette se déminéralise, ce qui aboutit à une fragilité osseuse et souvent à des fractures du col fémoral ou des vertèbres, surtout à un âge avancé. Un apport élevé de calcium est généralement recommandé mais n'a pas fait ses preuves comme moyen de prévention ou de traitement de l'ostéoporose. L'exercice physique semble réduire les pertes de calcium et cela explique pourquoi l'ostéoporose est moins fréquente dans les pays en développement où les femmes font davantage d'efforts physiques. On sait aussi maintenant que l'apport d'œstrogènes après la ménopause réduit la perte osseuse et l'ostéoporose.

### ➤ **Le phosphore**

#### • **Propriétés et fonctions**

Le phosphore est majoritairement lié au calcium dans le squelette et les dents, sous forme de phosphate de calcium. L'organisme en contient environ 700 g.

Le phosphore a de multiples fonctions essentielles dans l'organisme. Il est lié au calcium pour former la structure osseuse ; il sert d'outil de construction dans la formation des grands assemblages moléculaires du monde vivant. On le retrouve également comme constituant des cellules et des membranes biologiques (phospholipides), comme activateur d'enzyme, et comme acteur du métabolisme énergétique (ATP).

#### • **Sources alimentaires**

Le phosphore est très abondant dans les produits animaux (viandes, poissons et œufs), les oléagineux, les légumineuses et les céréales, ce qui rend sa carence par déficit alimentaire improbable.

#### • **Absorption et excrétion**

L'être humain absorbe de 60 à 70 % du phosphore qu'il consomme, l'absorption du phosphore provenant de sources animales étant plus efficace que celle du phosphore de provenance végétale. Le taux plasmatique de phosphore est principalement réglé par le rein qui réabsorbe ou excrète plus ou moins le phosphore en fonction de l'apport alimentaire. Cependant, l'intestin joue aussi un rôle en augmentant son efficacité d'absorption en cas d'apport faible. La vitamine D favorise aussi l'absorption du phosphore.

Le phosphore, comme le calcium, est essentiellement stocké dans les os (85% du phosphore de l'organisme), alors que 14 % se trouvent dans le muscle. L'excrétion de phosphore se produit en premier lieu par le rein, la réabsorption étant réglée par l'hormone parathyroïdienne, en fonction de l'apport alimentaire.

- **Carence et excès**

La carence en phosphore due à un apport alimentaire insuffisant est rare, mais, chez les personnes très âgées, l'absorption du phosphore diminue alors que son excrétion urinaire augmente, ce qui peut provoquer une carence dont les symptômes sont l'anorexie, la faiblesse musculaire, la débilité d'esprit et des douleurs osseuses.

Un excès d'apport de phosphore par rapport au calcium peut entraîner une hypocalcémie et une tétanie chez les nourrissons alimentés avec des formules dont le rapport phosphore calcium est plus grand que 2. Il faut donc se conformer aux apports recommandés et s'assurer que le rapport phosphore – calcium soit inférieur à 2.

- **Le magnésium**

- **Propriétés et fonctions**

Le magnésium est un élément absolument vital et joue de nombreux rôles. La moitié du magnésium se situe dans les os, en partie mobilisable, mais les quantités n'ont rien de comparables avec le Ca et le P. L'organisme contient 25 g de magnésium.

Son rôle principal est celui d'activateur de nombreuses enzymes. On connaît actuellement plus de 300 réactions dans l'organisme qui dépendent du magnésium. Il est en particulier essentiel pour la minéralisation et le développement du squelette, la synthèse des lipides et des protéines, les mécanismes de phosphorylation et de déphosphorylation, les voies métaboliques de production d'énergie et l'entretien des potentiels électriques transmembranaires dans les nerfs et le muscle.

- **Sources alimentaire**

Tous les aliments contiennent du magnésium, mais avec des variations importantes de l'un à l'autre. Le lait, les céréales complètes, les légumineuses, la pomme de terre et les fruits à coque sont particulièrement riches en magnésium.

- **Absorption et excrétion**

Comme pour d'autres minéraux, l'absorption du magnésium se fait par un mécanisme actif pour des apports faibles, mécanisme qui se sature au fur et à mesure que l'apport augmente, puis le magnésium est absorbé passivement. Le taux d'absorption varie de 20 à 70 % de l'apport.

Les deux tiers environ du magnésium se trouvent dans les os, un quart dans le muscle, et pratiquement tout le reste dans d'autres cellules, moins de 1 % se trouvant dans le liquide extracellulaire. L'absorption intestinale et l'excrétion urinaire ; le mécanisme hormonal de régulation est encore mal compris. L'excrétion urinaire est aussi adaptable que l'est l'absorption intestinale.

- **Carence et excès**

La carence peut survenir suite à des problèmes de malabsorption et aussi durant le rattrapage de la malnutrition sévère. Il est donc fondamental d'assurer un apport adéquat en magnésium durant le rattrapage nutritionnel.

Comme la carence en magnésium par déficit alimentaire est improbable, on ne peut pas calibrer précisément le besoin en magnésium et l'on s'en tient à une gamme d'apport acceptable (150 à 500 mg / jour). Cependant, durant le rattrapage nutritionnel suite à la malnutrition sévère, le besoin en magnésium est précis.

Vu la souplesse d'adaptation de l'excrétion de magnésium par le rein, des apports élevés par voie orale ne sont pas toxiques, mais peuvent entraîner des diarrhées passagères. En revanche des administrations intraveineuses excessives peuvent entraîner la mort par dépression du système nerveux central et paralysie musculaire.

## Les minéraux (Oligoéléments)

### 1. Le fer

- **Propriétés et fonctions**

Dans l'organisme, le fer est présent à hauteur de 4 grammes. On le trouve dans les globules rouges, pour transporter l'oxygène, et dans les muscles. Il participe également au fonctionnement de nombreuses enzymes comme les peroxydases, les catalases et les cytochromes.

La majorité du fer se trouve sous forme d'hémoglobine dans les globules rouges ; presque tout le reste se trouve dans la myoglobine (en majorité musculaire) ou sous forme de réserves (ferritine) dans le foie, la rate et la moelle osseuse.

La carence en fer a une influence néfaste sur la santé dans le monde entier. Un organisme adulte ne contient que 3 à 4 g de fer, mais cette petite quantité est vitale.

L'organisme est très économe et conservateur en ce qui concerne le fer. Le fer des vieux globules rouges est récupéré lors de leur destruction et indéfiniment réutilisé pour la fabrication de nouveaux globules rouges. Dans des circonstances normales, seulement 1 mg de fer est perdu quotidiennement dans l'intestin, l'urine, la sueur ou les cheveux et les cellules épithéliales.

Grâce à cette économie, les besoins nutritionnels d'hommes adultes en bonne santé ou de femmes ménopausées sont très faibles. Par contre, les femmes en âge de procréer doivent remplacer le fer perdu lors des menstruations et des accouchements et faire face aux besoins supplémentaires de la grossesse et de l'allaitement.

Les enfants ont également des besoins élevés, non seulement pour la croissance du corps mais aussi pour l'accroissement du volume sanguin.

On distingue deux types de fer : le fer héminique, présent dans les viandes rouges, les charcuteries (boudin noir surtout), les abats, les poissons et les œufs, mieux absorbe que le fer non héminique, que l'on trouve dans les légumes et féculents. Le fer de la viande ou du foie est par exemple 5 à 8 fois mieux assimilé que celui des lentilles. Cependant, c'est la structure du repas qui définit l'absorption du fer consommé : le fer végétal est mieux absorbé s'il est associé au cours du repas à de la viande, du poisson ou de la vitamine C.

- **Sources alimentaires**

Le fer est présent dans de nombreux aliments d'origine animale ou végétale. Les aliments les plus riches sont la viande (surtout le foie), le poisson, les œufs, les légumineuses (haricots secs, pois secs, etc.) et les légumes à feuilles vertes. Le lait, malgré sa réputation d'aliment parfait, est pauvre en fer: 2 mg par litre pour le lait humain et la moitié pour le lait de vache.

Les sources alimentaires de fer sont, par ordre d'importance :

- le persil (> 10 mg / 100 g) ; bien que ce soit excellent, il n'est pas courant de manger le persil en légume, ce qui fait que l'apport de fer par le persil est en général peu important ;
- le foie, les légumes secs (légumineuses) et le jaune d'œuf, qui en contiennent de 5 à 10 mg / 100 g ; le jaune d'œuf a malheureusement un effet inhibiteur sur l'absorption du fer (non seulement celui qu'il contient, mais aussi le fer apporté par d'autres aliments) ;
- la viande, les oléagineux, la farine complète, le cresson et les épinards, qui en contiennent de 2 à 4 mg / 100 g ;
- la plupart des fruits et légumes frais, ainsi que les fromages et les farines blanches, qui en contiennent de 1 à 0,5 mg / 100 g ; ce sont donc des sources pauvres en fer, de même que les boissons fermentées, le lait et des fruits comme les pommes, les poires et les cerises, qui sont encore plus pauvres, avec moins de 0,4 mg / 100 g.
- le fer contenu dans l'eau de boisson, de même que celui des marmites de cuisson peuvent représenter une source de fer non négligeable, mais il est difficile d'en tenir compte.

- **Absorption et utilisation**

L'absorption du fer se fait de deux manières, selon qu'il est ou non lié au groupe hème de l'hémoglobine ou de la myoglobine. Quand il n'est pas lié au groupe hème, le fer est solubilisé par les sucs gastriques, réduit en fer II, et lié à d'autres molécules, comme l'acide ascorbique, les sucres et les acides aminés, elles favorisent l'absorption du fer. Certains facteurs alimentaires réduisent cependant son absorption. Ce sont les tannins, les phytates, les phosphates, que l'on trouve dans les céréales complètes et les oléagineux, le jaune d'œuf, le thé et le café ; les protéines du lait et du soja ont, elles aussi, un effet inhibiteur sur l'absorption du fer.

L'absorption proprement dite se fait dans l'intestin grêle, particulièrement au niveau du duodénum. La majorité du fer passe directement dans le sang et non par le système lymphatique. Son passage est facilité par la présence d'acides organiques, des sels biliaires et des sous-produits peptidiques de la digestion des protéines.

Une personne en bonne santé absorbe environ 5 à 10 % du fer contenu dans ses aliments alors qu'un sujet carencé peut en absorber jusqu'au double. Si l'alimentation contient 15 mg de fer, le sujet normal va en absorber 0,75 à 1,5 mg, alors qu'un sujet déficient en absorbera jusqu'à 3 mg. L'absorption est généralement plus élevée pendant la croissance et la grossesse, après une hémorragie ou dans d'autres circonstances où les besoins en fer s'élèvent.

L'absorption du fer héminique des aliments d'origine animale (viande, poisson, volaille) est habituellement très élevée, alors que celle du fer non héminique des aliments d'origine végétale (céréales, légumes, racines, fruits) est faible.

Cependant, un repas est généralement constitué de plusieurs types d'aliments, et la présence d'une petite quantité de fer héminique favorisera l'absorption de tout le fer non héminique. L'adjonction d'un peu de viande ou de poisson à une grosse ration de riz ou de maïs permettra une meilleure absorption du fer contenu dans l'aliment de base. Si le repas comporte aussi des fruits ou des légumes, la présence de vitamine C va elle aussi favoriser l'absorption du fer.

Par contre, si ce repas s'accompagne de thé, les tanins du thé vont réduire l'absorption du fer. À noter, cependant, que le calcium inhibe l'absorption du fer, aussi bien héminique que non héminique ; un verre de lait contenant environ 160 mg de calcium inhibe l'absorption du fer par plus de 50 %. En revanche, le jaune d'œuf, malgré sa richesse en fer, inhibe l'absorption non seulement de son propre fer mais du fer des autres aliments.

- **Besoins**

Les besoins alimentaires correspondent approximativement à 10 fois les besoins physiologiques. Si un homme ou une femme ménopausée a besoin de 1 mg par jour en raison de ses pertes de fer, il devra trouver 10 mg dans son alimentation.

Cette recommandation comporte une marge de sécurité puisque l'absorption augmente avec les besoins.

Les pertes menstruelles équivalent à presque 1 mg par jour toute l'année.

L'apport alimentaire d'une femme en âge de procréer doit donc être d'environ 18 mg par jour. Pendant la grossesse, le développement du fœtus et des tissus annexes ainsi que l'augmentation de volume du sang maternel requièrent 1,5 mg par jour, surtout pendant les deuxième et troisième trimestres.

Lors de l'allaitement, une femme perd environ 2 mg de fer par litre de lait. Cette perte est partiellement compensée, au moins pendant les 6 à 15 premiers mois d'allaitement, par l'absence de règles.

Les nouveau-nés naissent avec un nombre élevé de globules rouges (polycythémie) et une hémoglobine élevée qui constituent une réserve de fer. Cette réserve plus le fer contenu dans le lait maternel est habituellement suffisante pendant les quatre à six premiers mois, après quoi une autre source alimentaire devient nécessaire.

Un apport excessif et prolongé de fer peut aboutir à une maladie appelée sidérose ou hémochromatose. Cette affection touche surtout les grands consommateurs de boissons alcoolisées brassées dans des cuves de fer, qui provoque des dépôts de fer au niveau du foie peut s'associer à une cirrhose.

- **Carences**

Si l'on considère les besoins en fer et le contenu moyen des aliments courants, on peut imaginer que les carences sont rares, mais ce n'est pas vrai. La raison principale est que l'absorption du fer alimentaire est médiocre. Comme le fer est peu éliminé dans les selles ou l'urine, les carences sont généralement associées à un accroissement des besoins, lié à une grossesse, une hémorragie ou un accroissement du volume sanguin pendant la croissance. La carence en fer aboutit à une anémie qui affecte essentiellement les enfants, les femmes en âge de procréer et les personnes souffrant de pertes de sang chroniques.

Les ankylostomiasés (ver parasite), très fréquentes dans de nombreux pays, entraînent une perte chronique de sang qui aboutit fréquemment à une anémie. Dans certains pays tropicaux, la schistosomiase est également responsable de pertes chroniques de sang et d'anémie.

## **2. Le zinc**

- **Propriétés et fonctions**

Le zinc est un élément essentiel en nutrition humaine et il a fait récemment l'objet d'une attention soutenue. L'organisme adulte en contient 2 à 3 g et a besoin d'un apport de 15 mg par jour. La majorité du zinc se trouve dans le squelette, mais il y en a aussi dans d'autres organes, notamment la peau, les cheveux et la prostate.

Le zinc joue une multitude de rôles essentiels dans l'organisme, il se présente dans beaucoup d'enzymes essentielles au métabolisme, il est un composant des membranes cellulaires, et il contribue à la stabilisation des acides ribonucléique et désoxyribonucléique et des ribosomes. Le zinc fait l'objet de nombreuses recherches, et il ne serait pas surprenant qu'on lui découvre de nouvelles fonctions.

- **Sources alimentaires**

On trouve le zinc dans la plupart des aliments, avec des concentrations très variables.

Les sources les plus importantes sont les produits animaux comme la viande, les fruits de mer et les œufs (3 – 5 mg / 100 g) et les céréales et les légumineuses (2 – 3 mg / 100 g). Dans les pays où la consommation des produits animaux est élevée, l'alimentation est suffisamment riche en zinc. En revanche, dans les pays où l'on ne consomme que très peu d'aliments d'origine animale, ce sont les céréales et les légumineuses qui fournissent la majorité du zinc, ce qui peut se révéler insuffisant si les céréales sont trop raffinées, car le zinc se trouve principalement dans les couches périphériques du grain, qui sont perdues proportionnellement au raffinage. Par exemple, la farine de blé complète contient environ 5,5 mg de zinc / 100 g, alors que la farine blanche n'en contient plus que 1,7 mg / 100 g, soit une perte de 70 %.

- **Absorption**

L'absorption du zinc est assez semblable à celle du fer, le zinc est absorbé au niveau de l'intestin grêle. Le degré d'absorption est fonction de la présence de molécules qui la favorisent ou l'inhibent, dans ce dernier cas les phytates, les tannins et les oxalates. En revanche, le zinc a un effet inhibiteur sur l'absorption du cuivre.

Cependant, on a vu que l'absorption continue d'augmenter en fonction de l'apport, même si c'est de plus en plus faiblement ; il faut donc être capable de se débarrasser de l'excès, car le zinc peut devenir toxique. Cela se fait par l'excrétion fécale, qui augmente en cas d'apport trop important.

En fin de grossesse, l'absorption du zinc augmente. Elle diminue avec l'âge, mais les pertes aussi, ce qui permet de garder l'équilibre. Il n'y a pas de stockage du zinc en tant que tel, et un apport insuffisant est rapidement suivi par des signes de carence.

- **Carence**

Les indicateurs de carence comprennent la notion d'un apport alimentaire faible, un taux sérique bas et une concentration faible dans les cheveux.

Cependant, les plus récentes recherches semblent montrer que le déficit en zinc est responsable notamment d'un ralentissement de la croissance et d'une diminution de l'appétit.

La carence en zinc pourrait ainsi contribuer à la malnutrition protéino-énergétique (MPE).

La carence en zinc est également responsable d'une affection congénitale rare appelée acrodermatite entéropathique qui répond à l'apport de zinc. Cette carence aiguë est liée à une erreur innée du métabolisme du zinc, à une alimentation parentérale déficiente en zinc, à différents problèmes de malabsorption, à l'alcoolisme et à des troubles rénaux et métaboliques.

Au Proche-Orient, on observe un nanisme des jeunes adolescents et un retard de maturation sexuelle due à la carence en zinc. La carence modérée en zinc pourrait être plus répandue qu'on ne le croyait jusqu'à récemment, et elle induit un retard de croissance. La carence en zinc évolue avec la gravité de la malnutrition sévère, et tout rattrapage de cette condition implique l'administration de zinc à des doses thérapeutiques, car le zinc conditionne le rattrapage nutritionnel au même titre que les autres nutriments de type II.

- **Toxicité**

L'excès de zinc peut occasionner des problèmes chroniques ou aigus. Les intoxications aiguës provoquent des douleurs gastriques, des nausées et vomissements et de la diarrhée. Ces intoxications peuvent se produire lorsque sont consommées des boissons contaminées par le zinc relâché par des récipients galvanisés.

Des doses au-dessus de 200 mg provoquent toujours des vomissements. Supérieures, elles peuvent entraîner la mort. Les intoxications chroniques commencent avec des suppléments de zinc pas plus importants que 25 mg / jour, qui induisent une carence secondaire en cuivre par compétition entre les deux éléments par rapport à leur absorption intestinale.

Des suppléments de zinc de l'ordre de 150 mg / jour induisent une concentration plasmatique faible des lipoprotéines de haute densité (le risque de maladies cardio-vasculaires est inversement proportionnel à cette concentration), une érosion gastrique et une dépression du système immunitaire.

### **3. Le fluor**

- **Propriétés et fonctions**

Le fluor se trouve surtout dans les dents et le squelette. Sa présence à l'état de traces dans les dents contribue à les protéger des caries. Le fluor consommé durant l'enfance devient partie intégrante de l'émail dentaire et le rend plus résistant aux acides organiques d'origine alimentaire qui adhèrent aux dents ou se logent entre elles. Cette stratégie réduit considérablement les risques de carie. Des études ont même suggéré que le fluor pourrait également consolider l'os et empêcher le développement de l'ostéoporose à un âge avancé.

- **Sources alimentaires**

La source principale de fluor est l'eau de boisson. Un apport d'une particule par million (ppm) suffit à protéger les dents. Mais, la plupart du temps, la concentration dans l'eau est bien inférieure. Comme le fluor se trouve dans les os, la consommation de petits poissons entiers en apporte, ainsi que celle de thé. Peu d'autres aliments contiennent du fluor.

- **Carence**

Si la concentration dans l'eau de boisson est inférieure à 0,5 ppm, la prévalence des caries a des chances d'augmenter. Le taux recommandé est de 0,8 à 1,2 ppm. Dans certains pays où le taux de fluor est initialement inférieur à 1 ppm, il est devenu courant d'ajouter du fluor dans le réseau d'eau potable. Cette pratique, très recommandable, n'est pas réalisable dans la majorité des pays en développement où peu de gens ont accès à l'eau courante.

L'adjonction de fluor aux dentifrices contribue également à prévenir les caries. Le fluor n'évite pas totalement les caries, mais il peut en réduire l'incidence de 60 à 70 %.

- **Excès**

Un apport excessif de fluor provoque une fluorose dentaire qui tache les dents. Cela est généralement lié à la consommation d'une eau excessivement fluorée. Dans certaines régions d'Afrique et d'Asie, les eaux de source contiennent 4 ppm de fluor. La fluorose entraîne également une sclérose osseuse, des calcifications des insertions musculaires et des exostoses.

#### **4. Le cuivre**

- **Fonctions**

Le cuivre est impliqué dans toute une série de réactions d'oxydoréduction, comme élément d'enzymes. Ces enzymes sont essentiels dans la chaîne respiratoire, la synthèse des protéines du collagène, dans la synthèse et la maintenance de la myéline, dans la synthèse des neurotransmetteurs, dans le métabolisme du fer, et dans la protection contre les risques d'oxydation. Comme pour le zinc, on pense que le cuivre pourrait avoir encore d'autres rôles qui font actuellement l'objet de recherches.

- **Sources alimentaires**

La plupart des aliments contiennent du cuivre, mais les sources les plus riches (0,3 – 2 mg / 100 g) sont les coquillages, les oléagineux (y compris la poudre de cacao), les légumineuses et les céréales complètes.

- **Absorption et excrétion**

L'absorption du cuivre, comme celle d'autres métaux, augmente en fonction de l'apport mais en proportion de plus en plus faible. Le zinc inhibe l'absorption du cuivre.

Après absorption, le cuivre est transporté jusqu'au foie où il se lie à une protéine, la céruloplasmine, qui le transporte aux tissus de l'organisme. Il se pourrait que le cuivre puisse être stocké dans le foie, mais en très petite quantité. On ne sait pas par quel mécanisme le

cuivre est excrété, si ce n'est dans l'intestin par les sels biliaires. L'excrétion est inversement proportionnelle à l'apport et à la carence.

- **Carence**

La carence en cuivre peut affecter les prématurés, ainsi qu'elle affecte les nourrissons nourris au lait de vache non modifié et les enfants qui récupèrent de la malnutrition sévère. La carence se manifeste par la leucopénie, la neutropénie, des anomalies du squelette et une susceptibilité accrue aux infections. Chez l'adulte, il se pourrait que des apports insuffisants provoquent des maladies cardio-vasculaires.

- **Toxicité**

Le cuivre est toxique et les intoxications sont accidentelles. Elles sont liées à la consommation de boissons acides ayant été stockées dans des récipients en cuivre. Les symptômes sont des douleurs gastriques, des nausées, des vomissements et de la diarrhée. Les intoxications aiguës provoquent le coma, une nécrose hépatique, un effondrement vasculaire et la mort.

## **5. L'iode**

- **Propriétés et fonctions**

L'organisme d'un adulte contient en moyenne 20 à 50 mg d'iode, en majeure partie dans la glande thyroïde. L'iode est indispensable à la synthèse des hormones thyroïdiennes. Ces hormones, notamment la thyroxine ou T4, ont un rôle crucial dans la régulation du métabolisme. Chez l'enfant, elles contribuent à la croissance physique et au développement des capacités mentales.

L'iode est absorbé dans l'intestin sous forme d'iodure, et tout excès est éliminé dans l'urine. Lorsque l'apport d'iode est suffisant, une thyroïde adulte capte environ 60 µg d'iode par jour pour fabriquer les quantités d'hormones requises. Si l'apport d'iode est insuffisant, la thyroïde va travailler plus pour tenter d'en capter davantage. Elle augmente alors de volume, c'est ce qu'on appelle un goitre, et son contenu en iode diminue considérablement.

La TSH, l'hormone hypophysaire qui régule la sécrétion de thyroxine et la capture d'iode, augmente tandis que la thyroxine diminue.

- **Sources alimentaires**

L'iode est largement présent dans les rochers et la terre. Sa concentration dans les plantes dépend du sol sur lequel elles ont été cultivées. Cela n'a donc pas de sens de fournir la concentration en iode des aliments puisqu'elle varie considérablement.

L'iode tend à être chassé des sols et, au fil des siècles, se retrouve surtout dans lamer. C'est pourquoi les poissons de mer, les algues et les plantes cultivées près de lamer sont de bonnes sources d'iode. L'eau de boisson en fournit, mais rarement en quantité suffisante pour les besoins humains.

Dans de nombreux pays où le goitre est fréquent, les autorités ont entrepris l'iodation du sel, stratégie qui a permis de réduire les troubles liés au déficit en iode. Cet iode est ajouté au sel sous forme d'iodate de potassium, (à concurrence de 30 à 50 mg d'iode / kg de sel), et non d'iodure de potassium qui est trop instable à l'humidité et à la chaleur. Le sel iodé constitue alors la principale source d'iode alimentaire.

- **Carences**

La carence en iode entraîne plusieurs troubles, dont le goitre, très fréquent dans de nombreux pays. Bien qu'un goitre puisse avoir plusieurs causes, le déficit en iode est de loin la plus courante. Une carence pendant la grossesse peut provoquer un crétinisme, c'est-à-dire un ensemble d'anomalies, notamment un retard mental chez l'enfant.

## **6. Le sélénium**

- **Fonctions**

La fonction principale du sélénium est d'être un antioxydant. Il en a probablement d'autres, qui font l'objet de recherches, comme celle de protéger l'immunité cellulaire.

- **Sources alimentaires**

Les sources les plus importantes de sélénium sont les produits de la mer, les abats, la viande, les céréales et les légumineuses.

- **Absorption et excrétion**

Le sélénium ingéré est la plupart du temps lié à la méthionine et à la cystéine, et il est bien absorbé dont l'excrétion est essentiellement urinaire.

- **Carence**

La carence en sélénium provoque la maladie de Keshan, une cardiomyopathie, mais il semble que d'autres facteurs doivent être impliqués pour que la maladie se développe.

- **Toxicité**

Une surdose de sélénium peut être causée par l'alimentation dans certaines régions dont les sols sont riches en sélénium ou par la consommation de comprimés. À haute dose, le sélénium est toxique et provoque des nausées, des diarrhées, de l'irritabilité, de la fatigue, une neuropathie périphérique, une perte de cheveux et une modification des ongles.

## Les vitamines (Hydrosolubles)

Les vitamines sont des substances indispensables à l'organisme, qui ne peut pas les fabriquer. Elles doivent donc être fournies par l'alimentation.

Leur fonction qui est vitale à de nombreux processus physiologiques, en particulier la catalyse enzymatique, indispensable à pratiquement toutes les réactions chimiques de la cellule.

En quantités insuffisantes, elles risquent de provoquer des carences. Les vitamines sont plus ou moins sensibles aux agents physiques (chaleur, lumière, humidité) et chimiques (acides, bases, oxydants, réducteurs).

### 1. Classification et nomenclature

On distingue volontiers les vitamines en fonction de leur solubilité dans l'eau ou dans les lipides (vitamines hydrosolubles ou liposolubles), (Tableau n°11). Cette distinction présente un intérêt du point de vue nutritionnel : l'organisme peut stocker les vitamines liposolubles, mais pas, ou peu, les vitamines hydrosolubles (Tableau n°12).

Dans les vitamines hydrosolubles, on distingue encore les vitamines du groupe B de la vitamine C. Le groupe B regroupe les vitamines comportant plusieurs molécules dont les caractéristiques communes sont d'être des coenzymes, de contenir des atomes d'azote et d'être liées au métabolisme intermédiaire.

Du point de vue de la nomenclature, la désignation officielle aujourd'hui se fait par le nom chimique de la substance – bien que la désignation alphabétique.

**Tableau n°11 : Classification des vitamines, leurs rôles et les principales sources alimentaires**

|  | <b>Rôle</b>   | <b>Sources alimentaires principales</b>   |
|--|---|---|
| <b>Vitamine C</b><br><i>Acide ascorbique</i>   | Antioxydant, résistance aux infections<br>Absorption du fer                   | Tous les végétaux (persil, estragon, poivron...),<br>cassis, agrumes (kiwi, orange, citron)           |
| <b>Vitamine B 1</b><br><i>Thiamine</i>         | Métabolisme des glucides, fonctionnement<br>du système nerveux et des muscles | Céréales, levure de bière, légumes secs,<br>pomme de terre, viande, oeufs                             |
| <b>Vitamine B 2</b><br><i>Riboflavine</i>      | Métabolisme des lipides, glucides<br>et protéines, croissance des tissus      | Levure, foie, rognons, lait, yaourts,<br>fromages   |
| <b>Vitamine B 3</b><br><i>ou PP Niacine</i>    | Rôle dans nombreuses réactions<br>métaboliques                                | Viande, poisson, champignons, levure,<br>céréales   |
| <b>Vitamine B 5</b><br><i>Pantothénique</i>    | Bonne santé de la peau, des cheveux,<br>cicatrisation des plaies              | Foie, rognons, lait, jaune d'œuf,<br>poissons,...   |
| <b>Vitamine B 6</b><br><i>Pyridoxine</i>       | Métabolisme des protéines,<br>synthèse de l'hémoglobine                       | Viande, foie, lait, jaune d'œuf, poisson,<br>levure, pain complet, germe de blé                       |
| <b>Vitamine B 8</b><br><i>ou H Biotine</i>     | Métabolisme des lipides, glucides<br>et protéines.                            | Viande (foie, rognons...), jaune d'œuf,<br>produits laitiers, champignons                             |
| <b>Vitamine B 9</b><br><i>Acide folique</i>    | Renouvellement des cellules du sang,<br>synthèse des acides nucléiques.       | En abondance dans la majorité des légumes verts,<br>fruits, levure, foie, oeufs ; fromages fermentés. |
| <b>Vitamine B 12</b><br><i>Cyanocobalamine</i> | Synthèse des acides nucléiques, formation<br>des globules rouges, croissance  | Viande (foie, rognons...), jaune d'œuf, fromage,<br>lait, poisson                                     |

|   | <b>Rôle</b>   | <b>Sources alimentaires principales</b>  |
|---|---|--|
| <b>Vitamine A</b><br><i>Rétinol</i>       | Vision, croissance, reproduction,<br>cicatrisation des plaies                   | Beurre, lait entier, foie animal, huiles de foie<br>de poisson, jaune d'œuf      |
| <b>Vitamine D</b><br><i>Calciférol</i>    | Formation des os, croissance osseuse,<br>prévention du rachitisme, reproduction | Huiles de foie de poisson, poissons gras, jaune<br>d'œuf, beurre                 |
| <b>Vitamine E</b><br><i>Tocophérol</i>    | Antioxydant, stimulant de l'immunité,<br>durée de vie des globules rouges       | Huiles végétales, germes de blé, oeufs,<br>margarine au tournesol, légumes verts |
| <b>Vitamine K</b><br><i>Phylloquinone</i> | Coagulation du sang   | Végétaux verts, foie, céréales, produits laitiers,<br>viandes, fruits            |

**Tableau n°12 : Besoins en vitamines dans une population donnée pour différentes catégories d'âge**

|              | A<br>µg | D<br>µg | E<br>mg | K<br>µg | B1<br>mg | B2<br>mg | PP<br>mg | B5<br>mg | B6<br>mg | B8<br>µg | B9<br>µg | B12<br>µg | C<br>µg |
|--------------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|---------|
| nourissons   | 350     | 20-25   | 4       | 5-10    | 0,2      | 0,4      | 3        | 2        | 0,3      | 6        | 70       | 0,5       | 50      |
| 1-3 ans      | 400     | 10      | 6       | 15      | 0,4      | 0,8      | 6        | 2,5      | 0,6      | 12       | 100      | 0,8       | 60      |
| 4-6 ans      | 450     | 5       | 7,5     | 20      | 0,6      | 1        | 8        | 3        | 0,8      | 20       | 150      | 1,1       | 75      |
| 7-9 ans      | 500     | 5       | 9       | 30      | 0,8      | 1,3      | 9        | 3,5      | 1        | 25       | 200      | 1,4       | 90      |
| 10-12 ans    | 550     | 5       | 11      | 40      | 1        | 1,4-1,3  | 10       | 4        | 1,3      | 35       | 250      | 1,9       | 100     |
| 13-15 ans ♂  | 700     | 5       | 12      | 45      | 1,3      | 1,6      | 13       | 4,5      | 1,6      | 45       | 300      | 2,3       | 110     |
| 13-15 ans ♀  | 600     | 5       | 12      | 45      | 1,1      | 1,4      | 11       | 4,5      | 1,5      | 45       | 300      | 2,3       | 110     |
| 16-19 ans ♂  | 800     | 5       | 12      | 65      | 1,3      | 1,6      | 14       | 5        | 1,8      | 50       | 330      | 2,4       | 110     |
| 16-19 ans ♀  | 600     | 5       | 12      | 65      | 1,1      | 1,5      | 11       | 5        | 1,5      | 50       | 300      | 2,4       | 110     |
| ♂ adulte     | 800     | 5       | 12      | 45      | 1,3      | 1,6      | 14       | 5        | 1,8      | 50       | 330      | 2,4       | 110     |
| ♀ adulte     | 600     | 5       | 12      | 45      | 1,1      | 1,5      | 11       | 5        | 1,5      | 50       | 300      | 2,4       | 110     |
| ♂ > 75ans    | 700     | 10-15   | 20-50   | 70      | 1,2      | 1,6      | 14       | 5        | 1,6      | 60       | 330-400  | 3         | 120     |
| ♀ > 75 ans   | 600     | 10-15   | 20-50   | 70      | 1,2      | 1,6      | 11       | 5        | 1,6      | 60       | 330-400  | 3         | 120     |
| ♀ enceinte   | 700     | 10      | 12      | 45      | 1,8      | 1,6      | 16       | 5        | 1,6      | 50       | 400      | 2,6       | 120     |
| ♀ allaitante | 950     | 10      | 12      | 45      | 1,8      | 1,8      | 15       | 7        | 1,8      | 55       | 400      | 2,8       | 130     |

➤ **Les vitamines hydrosolubles**

**1. Vitamine C ou acide ascorbique**

• **Source**

La vitamine C est synthétisée par presque tous les organismes vivants, mis à part les primates, le cochon d'Inde, une espèce de chauve-souris et quelques oiseaux. On la trouve par conséquent dans la plupart des tissus animaux et végétaux. Les baies, les agrumes et les poivrons sont les sources les plus riches, suivies des légumes verts et des légumes de la famille du chou.

• **Absorption**

L'absorption intestinale de la vitamine C est saturable, ce qui signifie qu'il est inutile d'en absorber plus de 150 mg à la fois. Les très grandes quantités parfois ingérées par certains adeptes de la vitamine C sont en majeure partie excrétées et peuvent entraîner des diarrhées et des malaises intestinaux.

- **Métabolisme, stockage et excrétion**

La demi-vie moyenne de l'acide ascorbique dans le corps humain est de 16 à 20 jours. Ce temps est inversement proportionnel à l'apport et, par conséquent, la vitesse de catabolisme lui est proportionnelle. Mais le catabolisme ne s'arrête pas avec l'apport. On observe des pertes obligatoires de plusieurs milligrammes par jour par une dégradation irréversible de l'acide ascorbique, d'où la nécessité de compenser ces pertes puisqu'il n'y a pas de système de stockage spécifique de la vitamine C. Cependant, avec un apport adéquat en vitamine C, les cellules de l'organisme en contiennent suffisamment pour que, si l'apport chute brusquement, les signes cliniques de carence n'apparaissent pas avant deux ou trois mois.

- **Fonction**

La fonction de la vitamine C est principalement liée à son rôle réversible de réducteur chimique. Elle permet la réduction des ions métalliques requis dans certaines réactions et joue un rôle très important d'antioxydant et dans l'élimination des radicaux libres (rôle dans l'immunité et protection contre le cancer). Elle est impliquée dans la formation du collagène (tissu conjonctif de support), ainsi que dans la synthèse de la carnitine (transporteur d'acide gras) et de neurotransmetteurs. Elle participe aussi au métabolisme d'hormones, de médicaments et de drogues, et à la dégradation du cholestérol (prévention contre les maladies cardiovasculaires).

La vitamine favorise l'absorption du fer et diminue l'effet des agents chélateurs comme les phytates et les tannins qui forment des complexes insolubles avec le fer, empêchant ainsi son absorption. La propriété réductrice de l'acide ascorbique pourrait améliorer la stabilité de l'acide folique et de la vitamine E.

- **Carence**

Une carence en vitamine C amène une série de symptômes qui caractérisent le scorbut. Le scorbut est mortel s'il n'est pas traité rapidement avec de la vitamine C

- **Besoin et apport**

Chez l'adulte, une dose journalière de 10 mg d'acide ascorbique soigne le scorbut, sans pour autant permettre de constituer des réserves de vitamine. On estime le coût de la grossesse à 3 à 4 mg / jour, alors que l'allaitement coûte de 15 à 45 mg / jour sur la base d'une production lactée journalière moyenne de 750 ml. Le besoin d'un nourrisson alimenté avec un lait artificiel est satisfait avec 7 mg d'acide ascorbique par jour. Dès l'âge de 6 mois, les besoins se rapprochent petit à petit de ceux de l'adulte, (Tableau n°13).

**Tableau n°13 : Besoin moyen et apport de référence en vitamine C**

**ACIDE ASCORBIQUE (C)**

| Adultes                                 | mg/jour |
|---|---------|
| Besoin Moyen                            | 30      |
| Apport de Référence pour une Population | 45      |
| Seuil d'Apport Minimum                  | 12      |
| Grossesse (ARP)                         | 55      |
| Allaitement (ARP)                       | 70      |

**Apports de Référence pour une Population pour d'autres groupes**

| Groupes d'âge | ARP (mg/jour) |
|---------------|---------------|
| 6 – 11 mois   | 20            |
| 1 – 3 ans     | 25            |
| 4 – 6 ans     | 25            |
| 7 – 10 ans    | 30            |
| 11 – 14 ans   | 35            |
| 15 – 17 ans   | 40            |

- **Apports pharmacologiques**

Des doses de 100 à 200 mg sont recommandées lorsqu'il faut combattre une carence en fer dans des situations de besoins élevés comme la grossesse, l'allaitement ou un traitement antibiotique. En cas de blessure, de brûlures ou d'intervention chirurgicale, le besoin en vitamine C pourrait se situer entre 1 000 et 2 000 mg pour favoriser la réparation et la guérison.

## **2. Thiamine ou vitamine B1**

- **Source**

La thiamine se trouve dans tous les tissus animaux et végétaux, ce qui signifie qu'on la trouve dans tous les aliments naturels. Les sources de thiamine les plus abondantes sont les germes des céréales, des oléagineux et des légumineuses, ainsi que la levure de bière et la viande.

Les aliments frais (légumes verts, fruits, tubercules, viande, lait et dérivés sauf le beurre) contiennent des quantités de thiamine qui protègent contre la carence s'ils sont consommés en quantité suffisante et régulièrement.

- **Absorption**

La thiamine est absorbée activement lorsqu'elle est en concentration inférieure à 2 micromoles ( $\mu\text{mol}$ ) par litre, et passivement lorsque sa concentration est supérieure à 2  $\mu\text{mol}$  /L.

- **Métabolisme, stockage et excrétion**

La thiamine a un temps de demi-vie de 9 à 18 jours dans l'organisme. Si elle est en excès dans l'organisme, elle n'est pas catabolisée, mais simplement excrétée comme telle. Avec une quantité totale d'environ 30 mg chez l'adulte de référence, on se rend compte que la thiamine est pauvrement stockée dans l'organisme et qu'un apport régulier est donc indispensable.

- **Fonction**

La thiamine est un coenzyme indispensable au métabolisme énergétique, en particulier à la jonction entre la fermentation et la respiration au cours de l'oxydation des glucides, et au métabolisme des acides aminés dont le squelette carboné contient un branchement. Elle joue aussi un rôle dans la transmission nerveuse, au niveau du transport du sodium et du potassium.

- **Carence**

La carence en thiamine amène une série de symptômes typiques du béribéri qui est mortel s'il n'est pas soigné rapidement avec de la thiamine.

- **Besoin et apport**

Le besoin en thiamine est principalement lié au métabolisme énergétique, c'est-à-dire à la dépense énergétique ; c'est pourquoi on l'exprime en mg / 1 000 kcal (4 180 kJ). L'apport minimum est de l'ordre de 0,25 mg / 1 000 kcal (4 180 kJ).

- Besoin Moyen : 0,3 mg / 1 000 kcal
- Apport de Référence pour une Population : 0,4 mg / 1 000 kcal
- Seuil d'Apport Minimum : 0,2 mg / 1 000 kcal.

### **3. Riboflavine ou vitamine B2**

- **Source**

On trouve la riboflavine dans la plupart des aliments. La levure de bière, le foie, les œufs, le lait, les fromages et la viande en sont les meilleures sources, suivis des légumes verts, puis des fruits et des légumes secs et, enfin, des céréales.

- **Absorption**

La riboflavine est absorbée par un système actif saturable. L'absorption est facilitée par la présence de sels biliaires. L'administration de riboflavine sous forme médicamenteuse par voie orale doit se faire au moment des repas, car la nourriture la maintient plus longtemps sur les sites d'absorption.

- **Métabolisme, stockage et excrétion**

Dans les tissus, on trouve la riboflavine principalement sous forme de flavine adénine dinucléotide (FAD), la majeure partie étant libre et le reste étant lié comme coenzyme à des enzymes. Le foie est le principal organe de stockage et contient environ un tiers de toute la riboflavine de l'organisme. Sous la forme liée, la FAD est très stable et son renouvellement est directement lié au renouvellement des protéines auxquelles elle est liée. Lorsque les protéines sont saturées, la forme libre est dégradée en riboflavine libre qui est principalement excrétée dans les urines. L'excrétion est de l'ordre de 200 µg par 24 heures chez l'adulte de référence.

- **Fonction**

La riboflavine est un coenzyme qui participe aux étapes d'oxydoréduction de nombreuses voies métaboliques, en particulier pour la production d'énergie (ATP) dans la chaîne respiratoire.

- **Carence**

Une carence modérée en riboflavine se rencontre assez fréquemment, associée d'ailleurs à d'autres carences plus ou moins graves, typiques des alimentations pauvres au niveau nutritionnel. Lorsqu'on parle des signes cliniques usuels, on fait souvent référence au syndrome oro-oculo-génital, avec la stomatite angulaire (lésion des commissures des lèvres), la glossite (inflammation de la langue), la chéilite (gerçure des lèvres), la coloration magenta de la langue, la photophobie et la dermatite séborrhéique, en particulier du scrotum et de la vulve.

Parmi tous ces signes, seule la coloration magenta de la langue est un signe absolu de carence en riboflavine. Tous les autres signes cliniques de la carence en riboflavine peuvent aussi bien provenir d'autres carences en vitamines du groupe B.

La prescription pour combattre la carence est une dose de 5 mg par voie orale trois fois par jour.

- **Besoin et apport**

L'estimation du besoin minimum en riboflavine est exprimé en mg / 1 000 kcal (4 180 kJ) comme pour la thiamine, bien que contrairement à cette dernière, le besoin n'augmente pas significativement avec la dépense énergétique.

On arrive à des apports minima de 0,5 mg / 1 000 kcal (4 180 kJ) / jour pour l'adulte, et 0,6 mg / 1 000 kcal (4 180 kJ) / jour pour le jeune enfant. Les besoins additionnels pour la grossesse et l'allaitement sont de 0,3 mg / jour et 0,5 mg / jour respectivement, (Tableau n°14).

**Tableau n°14 : Besoin moyen et apport de référence en vitamine B2**

| <b>Adultes</b>                          | <b>Hommes</b> | <b>Femmes</b> |
|---|---------------|---------------|
| Besoin Moyen                            | 1,3           | 1,1           |
| Apport de Référence pour une Population | 1,6           | 1,3           |
| Seuil d'Apport Minimum                  | 0,6           | 0,6           |

**Apports de Référence pour une Population pour d'autres groupes**

| <b>Enfants</b>     | <b>Groupes d'âge</b> | <b>ARP (mg/jour)</b> |
|--------------------|----------------------|----------------------|
|                    | 6 – 11 mois          | 0,4                  |
|                    | 1 – 3 ans            | 0,8                  |
|                    | 4 – 6 ans            | 1                    |
|                    | 7 – 10 ans           | 1,2                  |
| Garçons            | 11 – 14 ans          | 1,4                  |
|                    | 15 – 17 ans          | 1,6                  |
| Filles             | 11 – 14 ans          | 1,2                  |
|                    | 15 – 17 ans          | 1,3                  |
| <b>Allaitement</b> |                      | 1,7                  |
| <b>Grossesse</b>   |                      | 1,6                  |

**4. Acide nicotinique et nicotinamide ou niacine ou vitamine B3 ou PP**

L'acide nicotinique et son amide, la nicotinamide, ont une activité vitaminique identique. On leur donne à tous deux le nom générique de niacine.

• **Source**

La niacine est présente dans pratiquement tous les aliments, mais en quantité modérée.

Les quantités les plus importantes se trouvent dans la viande (spécialement les abats), le poisson, la levure de bière, certaines légumineuses et certaines céréales.

La niacine a un précurseur ou provitamine, à partir duquel elle peut être synthétisée. Ce précurseur est l'acide aminé essentiel appelé tryptophane. La synthèse de niacine à partir du tryptophane requiert de la riboflavine et de la vitamine B6.

Le tryptophane peut contribuer de façon substantielle à l'apport en niacine, il est en général admis que 60 mg de tryptophane dans l'alimentation fournissent 1 mg de niacine.

La niacine se trouve très peu sous forme libre dans la nature où elle est principalement présente sous forme de nicotinamide-adénine-dinucléotide (NAD) et de nicotinamide-adénine-dinucléotide-phosphate (NADP). La NAD et la NADP sont les deux coenzymes complets dont la nicotinamide est le groupe chimiquement actif.

- **Absorption et excrétion**

La NAD et la NADP sont hydrolysées par des enzymes de la muqueuse intestinale avec pour effet de libérer la nicotinamide du coenzyme. La flore intestinale convertit partiellement la nicotinamide en acide nicotinique, et tous deux sont ensuite absorbés. L'absorption est très efficace, même à des doses importantes (de l'ordre de 3 g), qu'il y ait ou non apport alimentaire concomitant. La niacine est ensuite rapidement extraite du plasma par les tissus. Il n'y a pas de stockage à proprement parler de la niacine dans l'organisme. Un excès d'apport passe rapidement dans les urines où la niacine est excrétée telle quelle.

- **Fonction**

La nicotinamide agit comme oxydant ou comme réducteur par échange d'un atome d'hydrogène avec son substrat. Il y a plus de 200 enzymes qui utilisent soit la NAD soit la NADP comme coenzyme. La NAD est plus souvent impliquée dans les réactions du catabolisme, comme celui des molécules de combustibles pour la production d'énergie, tandis que la NADP sert plus souvent dans les mécanismes de synthèse, comme la synthèse des stéroïdes et des acides gras.

De manière générale, la fonction d'oxydoréduction de la niacine la fait participer au métabolisme (synthèse et dégradation) des acides gras, des glucides et des acides aminés.

L'acide nicotinique a un effet préventif important sur les maladies cardio-vasculaires en diminuant le taux plasmatique de cholestérol, en diminuant aussi les lipoprotéines de faible densité, et en augmentant les lipoprotéines de haute densité.

- **Carence**

La carence en niacine amène une série de symptômes typiques de la pellagre qui est mortelle si elle n'est pas traitée rapidement et se manifestant par des lésions cutanées, des troubles digestifs, psychiques et neurologiques.

- **Besoin et apport**

La niacine est liée au métabolisme énergétique et les besoins s'expriment, comme pour la thiamine, en fonction du besoin en énergie, c'est-à-dire en mg / 1 000 kcal (4 180 kJ).

- Besoin Moyen : 5,4 mg / 1 000 kcal
- Apport de Référence pour une population : 6,7 mg / 1 000 kcal
- Seuil d'Apport Minimum : 4,2 mg / 1 000 kcal.

La grossesse n'augmente pas le besoin en niacine, mais l'allaitement l'augmente de 2 mg / jour, ce qui correspond à la quantité de vitamine sécrétée dans le lait.

Un apport pharmacologique de niacine (3 g / jour) est prescrit pour le traitement de la schizophrénie et celui de taux élevés de cholestérol dans le plasma.

## **5. Acide pantothénique ou vitamine B5**

- **Source**

L'acide pantothénique est universellement répandu dans tous les aliments naturels. On le trouve en grande quantité dans la levure de bière, le jaune d'œuf, les abats (spécialement le foie) et en quantité plus modérée dans les céréales et les légumineuses. Il est un des constituants du coenzyme A, auquel il est généralement intégré.

- **Absorption**

L'absorption de l'acide pantothénique semble être passive, principalement au niveau de l'intestin grêle, mais peut-être déjà dans l'estomac. La forme intégrée au coenzyme A doit tout d'abord en être libérée par action enzymatique. L'absorption de la vitamine est de l'ordre de 70 %, le reste passant dans les selles.

- **Métabolisme, stockage et excrétion**

Le coenzyme A est synthétisé dans la cellule à partir de l'acide pantothénique. Suite à des réactions d'hydrolyse, ce dernier est ensuite relâché sous forme libre et excrété dans les urines tel quel, ce qui signifie que l'acide pantothénique ne subit pas de transformation dans l'organisme. Il n'y a pas de stockage d'acide pantothénique, tout excès étant immédiatement rejeté dans les urines.

- **Fonction**

Le coenzyme A est indispensable comme transporteur d'unités formées de deux carbones, aussi bien dans le sens de la dégradation de certains acides aminés, des sucres et des acides gras que dans le sens de la synthèse. Le coenzyme A est aussi essentiel à la modification des protéines cellulaires en termes de structure, d'activité et de localisation.

- **Carence**

La carence en acide pantothénique est quasiment inexistante chez l'homme, encore que des formes modérées puissent se développer lorsque l'alimentation consiste principalement en produits transformés issus de l'industrie alimentaire. Le syndrome des « pieds qui brûlent » (burning feet syndrome) ne se développe que dans des conditions de carence expérimentale ou dans les formes graves de marasme.

Il faut noter que ce syndrome apparaît presque toujours avec les signes de carence en d'autres vitamines du groupe B. On traite le syndrome des pieds qui brûlent avec une dose intramusculaire de 10 mg /jour et à 100 mg / jour par voie orale.

- **Besoin et apport**

La carence d'acide pantothénique étant pratiquement inexistante avec un apport alimentaire normal, il n'y a pas de recommandation spécifique. On admet qu'un apport de 5 à 7 mg / jour est adéquat pour tous les groupes.

## **6. Pyridoxine ou vitamine B6**

- **Source**

La pyridoxine est présente dans la plupart des aliments naturels d'origine animale et végétale. Comme pour la plupart des vitamines du groupe B, on la trouve en grande quantité dans la levure de boulanger, le foie et les germes de céréales. L'avocat, la banane, la pomme de terre ainsi que certaines noix et légumineuses en sont aussi des sources importantes.

- **Absorption**

La pyridoxine est absorbée au cours d'un processus passif et non saturable au niveau de l'intestin grêle.

- **Métabolisme, stockage et excrétion**

Les formes actives de pyridoxine (pyridoxal-5-phosphate) se trouvent dans le muscle strié (80 – 90 % de la quantité totale de pyridoxine dans l'organisme). Il n'y a pas de stockage spécifique de la vitamine, et son renouvellement demande une trentaine de jours environ. Le pyridoxal-5-phosphate est une molécule très réactive, aussi tout excès est-il transformé de manière irréversible en acide 4-pyridoxique, puis excrété dans les urines.

- **Fonction**

La pyridoxine est premièrement associée à pratiquement toutes les réactions du métabolisme des acides aminés. Elle joue aussi un rôle dans la gluconéogenèse, dans la formation de niacine à partir du tryptophane, dans la synthèse de neurotransmetteurs, dans la régulation de l'action des hormones stéroïdiennes et dans l'affinité entre l'oxygène et l'hémoglobine.

- **Carence**

La carence en pyridoxine est rare chez l'être humain, car la vitamine est suffisamment présente dans toutes les grandes catégories d'aliments. On la trouve en revanche associée à la malnutrition sévère ou subséquente à l'administration de médicaments antagonistes de la vitamine comme l'isoniazide, la pénicillamine et les œstrogènes.

Les signes cliniques chez le jeune enfant sont des crises convulsives et des anomalies de l'élec-troencéphalogramme, réversibles par administration de pyridoxine. Chez l'adulte, on retrouve les signes associés à la carence en riboflavine : stomatite, chéilite, glossite (coloration moins typique de la langue), ainsi que de l'irritabilité, de la dépression et de la confusion mentale. Le traitement consiste en une dose de 10 mg / jour, par voie orale.

- **Besoin et apport**

La pyridoxine est associée à pratiquement toutes les réactions chimiques du métabolisme des acides aminés. Mais son rôle ne se limite pas à cela car elle a une grande polyvalence, ce qui ne facilite pas la définition du besoin. Faute de mieux, on calibre le besoin en pyridoxine sur l'apport alimentaire de protéines :

- Besoin Moyen : 13 µg / g de protéine ingérée
- Apport de Référence pour une Population : 15 µg / g de protéine ingérée.

## **7. Biotine ou vitamine B8 ou H ou H1**

- **Source**

Les sources alimentaires les plus riches de la biotine sont la levure de bière, le foie, le soja et le jaune d'œuf. Il faut noter que la flore intestinale humaine produit de la biotine, mais il n'est pas clair dans quelle mesure cette production est à même de couvrir les besoins et d'éviter la dépendance vis-à-vis d'une source alimentaire.

- **Absorption**

Il est probable que l'absorption de la biotine requiert un transporteur spécifique.

- **Fonction**

La biotine joue un rôle-clé dans le métabolisme intermédiaire énergétique, présidant aussi bien à la synthèse du combustible (glucides / lipides) qu'à son utilisation pour produire l'ATP.

- **Carence**

La carence en biotine est rare chez l'être humain. Si on la trouve, elle est en général liée à un problème métabolique inné, à une consommation énorme de blanc d'œuf cru ou à l'expérimentation scientifique de la carence.

La carence se manifeste alors principalement par une dermatite séborrhéique. En tous les cas, la carence en biotine ne représente jamais un problème de santé publique.

## **8. Acide folique (acide ptéroylglutamique) ou vitamine B9**

- **Source**

On trouve l'acide folique dans pratiquement tous les aliments naturels ; les extraits concentrés de viande et la levure de boulanger concentrée en sont d'excellentes sources, tandis que les abats, les épinards, les brocolis, les asperges, les betteraves potagères, les choux, les cacahuètes et les avocats en sont de bonnes sources. Le pain complet, les œufs, le riz, les bananes et les oranges en sont des sources modérées ; la viande en général, le raisin, les pommes, les pommes de terre et le lait en sont des sources pauvres.

- **Absorption**

L'absorption, principalement dans le duodénum et le jéjunum, se fait après hydrolyse en monoglutamate. Elle est active, stimulée par le glucose et saturable. Toutefois, à haute concentration, il semblerait qu'elle soit passive, ce qui suggère l'existence d'un deuxième système de transport.

- **Métabolisme, stockage et excrétion**

La vitamine B 9 est présente partout dans l'organisme, avec une quantité totale de 5 – 10 mg dont la moitié se trouve dans le foie. Le métabolisme de l'acide folique est contrôlé par des enzymes qui règlent l'équilibre entre la forme monoglutamate (forme usuelle de transport) et la forme polyglutamate (forme active et de réserve intracellulaire).

Suite à une prise élevée d'acide folique, on en retrouve la plus grande partie intacte dans les urines, avec de l'acide 5-méthyl-folique et de l'acide 10-formyl-folique. En outre, quelque 100 µg d'acide folique actif sont excrétés journalièrement dans la bile, dont une grande partie est réabsorbée au niveau de l'intestin, le reste finissant dans les selles.

- **Fonction**

L'acide folique sert de coenzyme accepteur et donneur d'une unité carbone dans le métabolisme des acides aminés et des nucléotides, et ce dans un ensemble de réactions interdépendantes où la vitamine a un métabolisme cyclique, dépendant de la vitamine B12.

- **Carence**

L'anémie mégalo-blastique est la manifestation la plus connue de la carence, qui est commune dans les populations pauvres des tropiques et spécialement chez la femme enceinte, dont les besoins en acide folique sont très accrus. La carence peut être due à des modes de cuisson dévastateurs de la vitamine, à une absorption réduite en présence de maladies gastro-intestinales et à la consommation d'alcool. Cependant, elle peut aussi être liée à la carence en vitamine C, en niacine et en vitamine B12.

- **Besoin**

Lorsqu'il s'agit de l'acide folique de l'alimentation. Il faut environ 100 µg chez l'adulte pour maintenir un niveau normal d'acide folique sérique. Chez la femme enceinte les besoins se situent vers 675 µg /jour et entre 200 et 300 µg pour la femme qui allaite. Chez le jeune enfant, le besoin est d'environ 10 µg /kg.

## **9. Cobalamines ou vitamine B12**

- **Source**

La vitamine B12 se trouve sous différentes formes de cobalamines dans la nourriture. On trouve les plus grandes concentrations de vitamine dans les abats (rognons, foie et cervelle), puis dans le jaune d'œuf, les huîtres, le crabe et le saumon. Les autres tissus animaux et les autres poissons en contiennent de moindres concentrations. Il faut aussi noter que la flore intestinale des animaux produit la vitamine, seule manière possible pour les herbivores de se la procurer.

Chez l'être humain, la production intestinale de cobalamines est insuffisante, c'est pourquoi il faut la compléter par un apport venant de la nourriture.

- **Absorption**

Les cobalamines sont absorbées au niveau de l'iléon, en premier lieu par un mécanisme actif impliquant la liaison des cobalamines au facteur intrinsèque, qui est une molécule de glycoprotéine synthétisée par les cellules pariétales de la muqueuse gastrique. Il y a aussi un mécanisme de diffusion n'impliquant pas le facteur intrinsèque lorsque la vitamine est

administrée oralement, comme médicament, à des doses supérieures à celles que l'on trouve dans l'alimentation.

- **Métabolisme, stockage et excrétion**

Les cobalamines ne sont pas dégradées par l'organisme car on les retrouve intactes dans les selles et les urines. L'excès d'apport est stocké dans le foie, à raison de plus de 50 % des 2 à 5 mg de vitamine que contient normalement l'organisme. Ceci correspond à un stock très élevé comparativement aux autres vitamines, car l'excrétion est très faible : un peu plus de 1 µg /jour perdu par les urines, tandis que la vitamine rejoignant le tube digestif par la bile est réabsorbée à 70 % environ ; il en résulte une excrétion journalière estimée entre 2 et 5 µg /jour, ce qui confère une autonomie de presque trois ans, sans tenir compte de la synthèse par la flore intestinale.

- **Fonction**

La vitamine B12 est essentielle à la régénération de l'acide 5-méthyl-folique en acide folique, qui est couplée à la formation de l'acide aminé méthionine. Sans cette régénération, l'acide 5-méthyl-folique est sur une voie métabolique sans autre issue que l'excrétion dans les urines. Cela amène à une insuffisance d'un autre intermédiaire du cycle métabolique de l'acide folique. Cette trappe métabolique de l'acide folique, lors de carence en vitamine B12, explique pourquoi l'anémie liée à cette carence est indiscernable de l'anémie liée à la carence en acide folique.

Elle joue un rôle crucial dans la synthèse de la myéline. Elle intervient en outre dans le métabolisme des glucides, des lipides et des protéines et comme agent réducteur.

- **Carence**

La carence en cobalamines entraîne l'anémie pernicieuse, mortelle si elle n'est pas traitée, et présentant les atteintes typiques de l'anémie nutritionnelle, ainsi qu'une neuropathie (le plus souvent, d'abord au niveau des nerfs périphériques, puis au niveau de la moelle épinière et du cerveau). Les signes cliniques de l'atteinte nerveuse sont les fourmillements et la sensation de froid et d'engourdissement des extrémités, puis la faiblesse musculaire et l'incoordination des mouvements au fur et à mesure que la moelle épinière est touchée ; il peut y avoir également des symptômes mentaux : lenteur intellectuelle, difficulté de mémorisation, confusion, dépression et psychoses paranoïdes.

Le traitement de l'anémie pernicieuse amène une rémission totale, pour autant qu'il n'y ait pas déjà de dommage nerveux irréversible ; il consiste en une injection sous-cutanée ou intramusculaire de 100 µg de vitamine B12, une fois par mois, à vie.

Le traitement d'une carence par insuffisance d'apport consiste à introduire dans l'alimentation des aliments d'origine animale ou à donner des préparations vitaminées apportant par voie orale 1 µg de vitamine B12 par jour. Une autre solution consiste à pratiquer le traitement de l'anémie pernicieuse.

- **Besoin**

On observe qu'une dose journalière de 1 µg suffit pour contenir complètement l'anémie et la neuropathie chez les patients adultes souffrant d'anémie liée à une carence en vitamine B12 dans l'alimentation. Le besoin est proportionnellement plus élevé chez l'enfant en croissance, en particulier chez le nourrisson, (Tableau n°15).

**Tableau n°15 : Besoin moyen et apport de référence en vitamine B12**

**COBALAMINES (B<sub>12</sub>)**

| Adultes                                 | µg/jour              |
|---|----------------------|
| Besoin Moyen                            | 1                    |
| Apport de Référence pour une Population | 1,4                  |
| Seuil d'Apport Minimum                  | 0,6                  |
| Grossesse                               | 0,2 en plus de l'ARP |
| Allaitement                             | 0,5 en plus de l'ARP |

**Apports de Référence pour une Population pour d'autres groupes**

| Groupes d'âge | ARP (µg/jour) |
|---------------|---------------|
| 6 – 11 mois   | 0,5           |
| 1 – 3 ans     | 0,7           |
| 4 – 6 ans     | 0,9           |
| 7 – 10 ans    | 1             |
| 11 – 14 ans   | 1,3           |
| 15 – 17 ans   | 1,4           |

## Les vitamines (Liposolubles)

### 1. Rétinol, axérophthol ou vitamine A

- **Source**

La vitamine A se trouve dans la nourriture, principalement liée à des acides gras, le plus courant d'entre eux étant l'acide palmitique. Par ordre de concentration décroissante, on la trouve dans les huiles de foie de poissons marins et de mammifères marins (en très grandes quantités) ; dans le foie des animaux de boucherie et des volailles, dans le beurre, les fromages, les germes de blé, les œufs et les poissons gras, enfin, dans les abats autres que le foie, dans le lait, les poissons maigres, les viandes rouge et blanche. Le rétinol a quelques précurseurs ou provitamines, dont essentiellement le  $\beta$ -carotène, représentant principal de la grande famille des caroténoïdes.

Le  $\beta$ -carotène se trouve dans les légumes et fruits pigmentés, entre autres : épinard, persil, feuilles de manioc, d'amarante et de laitue, carotte, navet, chou, tomate, mandarine, melon, orange, datte, papaye, mangue ; dans le beurre, l'huile de palme (la source la plus riche), les germes et la farine de blé, le maïs jaune, les lentilles et la patate douce jaune. Sur la base des quantités ingérées, les différentes provitamines ont une activité biologique inférieure à celle que l'on observe avec le rétinol, car les caroténoïdes alimentaires sont moins bien digérés et absorbés que la vitamine A ; en outre, les caroténoïdes ne sont pas entièrement convertis en rétinol. On les ramène alors à des équivalents rétinol (ER) : 1 ER = 1  $\mu$ g de rétinol ou 6  $\mu$ g de  $\beta$ -carotène ou 12  $\mu$ g d'autres caroténoïdes servant de provitamine.

- **Absorption**

Dans l'estomac, la vitamine A et ses provitamines forment avec les autres lipides des globules qui passent dans l'intestin grêle. La vitamine A est transportée à travers la paroi intestinale par un système spécifique lorsqu'elle est en concentration faible et par diffusion passive lorsqu'elle est en concentration élevée, alors que les provitamines diffusent passivement. L'absorption de la vitamine A et de ses précurseurs est favorisée par la présence des protéines et des lipides du bol alimentaire. Le bon état de la muqueuse intestinale est un facteur critique. Les sels biliaires sont indispensables à l'absorption des caroténoïdes, alors que la vitamine A n'en est pas dépendante (pour autant qu'elle soit correctement solubilisée).

Le rétinol du bol alimentaire est absorbé à 80 % environ, efficacité qui ne diminue qu'à très hautes doses de rétinol, alors que les provitamines ne sont absorbées qu'à 50 %, efficacité qui diminue rapidement à hautes doses.

- **Métabolisme, stockage et excrétion**

Après absorption, le rétinol est transporté sous forme de palmitate de rétinol jusqu'au foie par les chylomicrons. Les caroténoïdes sont en grande partie scindés en deux molécules de rétinaldéhyde par clivage central, au niveau de la muqueuse intestinale, puis transportés jusqu'au foie, via les chylomicrons.

Le rétinol est soit stocké dans le foie sous forme de palmitate de rétinol, soit transporté vers d'autres tissus au moyen de la « Retinol Binding Protein (RBP) ». À l'intérieur des tissus, le rétinol est aussi accroché à des « Cellular Retinol Binding Proteins (CRBP) ».

De manière générale, la vitamine A ingérée a le destin suivant : quelque 20 % sont directement excrétés dans les selles sur les deux jours qui suivent, 20 % à 50 % des 80 % absorbés seront excrétés dans les selles et les urines au cours de la semaine qui suit l'ingestion, et le reste est stocké.

Les réserves de vitamine A sont très importantes chez l'être humain adulte : avec un stock normal au départ, il a de quoi vivre un à trois ans sans apport.

La vitamine A stockée est métabolisée très lentement, selon deux voies : par dégradation de rétinol-RBP dans le rein et les tissus épithéliaux périphériques, ou par transformation du rétinol, dans le foie et les tissus périphériques, en formes conjuguées ou oxydées qui sont ensuite excrétées dans les selles ou les urines.

- **Fonction**

La vitamine A joue un rôle dans la vision, la différenciation cellulaire, la morphogénèse, ainsi que dans des processus physiologiques complexes comme la croissance, la reproduction et la réponse immunitaire.

- La vision: la vitamine A est une des molécules indispensables à la transmission de l'information au nerf optique de ce que perçoit l'œil.
- La différenciation cellulaire : on observe qu'une carence en vitamine A amène un remplacement des cellules produisant du mucus par des cellules produisant de la kératine.
- La morphogénèse : aussi bien un excès qu'un déficit de vitamine A ont un effet néfaste sur l'embryogénèse, mais le mécanisme n'est pas connu.
- La croissance : la vitamine A est un facteur de croissance, par l'intermédiaire de son dérivé, l'acide rétinoïque. Là encore, le mécanisme n'est pas connu. L'un des premiers signes est la perte d'appétit, mais n'est pas la cause réelle du problème de croissance lié à une carence en vitamine A.

– La reproduction : la spermatogenèse, de même que la croissance fœtale, sont déprimées lors d'une carence en rétinol, probablement en liaison avec le rôle de la vitamine A dans la différenciation cellulaire.

– La réponse immunitaire : la vitamine A a été aussi nommée « vitamine anti-infectieuse ». Les mécanismes de défense spécifiques et non spécifiques dépendent tous deux d'elle. La carence, couplée à une malnutrition protéino-énergétique a un impact désastreux sur la capacité de l'organisme à résister aux infections.

- **Carence**

Parmi toutes les conséquences possibles, la carence en vitamine A conduit à la cécité et à un risque de mortalité élevé par suite d'infections comme la rougeole. Il faut cependant noter que tout déséquilibre a en général une conséquence néfaste sur les fonctions de la vitamine A.

Le statut en fer est dépendant de la vitamine A, tandis que l'utilisation du rétinol est liée au statut en zinc. Le métabolisme de la vitamine A dépend, dans une certaine mesure, de la vitamine E. En outre, la vitamine A interagit avec la vitamine C, la vitamine K, la vitamine D, le calcium, le cuivre et l'iode.

Besoin : chez l'adulte de sexe masculin, on a déterminé expérimentalement que le besoin minimum de vitamine A se situe aux alentours de 400 µg / jour, (Tableau n°16).

**Tableau n°16 : Les besoins et l'apport de référence de la vitamine A**

| <b>Adultes</b>                          | <b>Hommes</b> | <b>Femmes</b> |
|---|---------------|---------------|
| Besoin moyen                            | 500 (1 660)   | 400 (1 330)   |
| Apport de Référence pour une Population | 700 (2 330)   | 600 (2 000)   |
| Seuil d'Apport Minimum                  | 300 (1 000)   | 250 (830)     |

**Apports de Référence pour une Population pour d'autres groupes**

| <b>Enfants</b>     | <b>Groupes d'âge</b> | <b>ARP</b>  |
|--------------------|----------------------|-------------|
|                    | 6 – 11 mois          | 350 (1 160) |
|                    | 1 – 3 ans            | 400 (1 330) |
|                    | 4 – 6 ans            | 400 (1 330) |
|                    | 7 – 10 ans           | 500 (1 660) |
| Garçons            | 11 – 14 ans          | 600 (2 000) |
|                    | 15 – 17 ans          | 700 (2 330) |
| Filles             | 11 – 14 ans          | 600 (2 000) |
|                    | 15 – 17 ans          | 600 (2 000) |
| <b>Allaitement</b> |                      | 950 (3 160) |
| <b>Grossesse</b>   |                      | 700 (2 330) |

## **2. Cholécalférol ou vitamine D3**

- **Source**

La vitamine D3 n'est pas véritablement une vitamine, car elle est synthétisée par l'être humain grâce aux rayons ultraviolets du soleil qui irradient sa peau. Les rayons ultraviolets transforment la provitamine D3, le 7-déhydrocholestérol, en provitamine D3, qui se transforme spontanément en vitamine D3 en un à deux jours sous le simple effet de la chaleur de l'organisme.

La principale source de vitamine D3 vient de la synthèse endogène. Néanmoins, la vitamine est en concentration très élevée dans l'huile de foie de morue, et on la trouve aussi dans les poissons de mer, le jaune d'œuf et les produits laitiers. Suite aux épidémies de rachitisme (carence en vitamine D3), l'enrichissement en vitamine D3 ou D2 est courant dans le lait, la margarine et les céréales (la denrée fortifiée varie selon les pays). Les vitamines D3 et D2 étant analogues, on utilise ci-dessous le terme simple de vitamine D. À noter que la vitamine D a deux types d'unités : les µg et les unités internationales (UI), 1 UI correspondant à 0,025 µg et 1 µg correspondant à 40 UI.

- **Absorption**

La vitamine D fournie par l'alimentation est absorbée à environ 80 % mais l'absorption est très sensible à l'état de la muqueuse intestinale et à sa capacité d'absorber les graisses. Elle est transportée par les chylomicrons jusqu'au foie. La vitamine endogène migre vers le réseau capillaire dermique avec l'aide d'une protéine spécifique de transport, puis est transportée jusqu'au foie.

- **Métabolisme, stockage et excrétion**

Le foie convertit la vitamine D en hydroxy-vitamine D, que les reins convertissent en dihydroxy-vitamine D, forme physiologiquement active de la vitamine.

Les sites de stockage sont le tissu adipeux pour la vitamine D, et le muscle pour l'hydroxy-vitamine D. Le sang a la concentration la plus élevée de vitamine D et, contrairement à ce qui se passe avec la vitamine A, le foie n'est pas un site de stockage. On ne connaît pas grand-chose de la vitesse de renouvellement et de l'excrétion de la vitamine D.

- **Fonction**

La vitamine D semble fonctionner comme une hormone stéroïdienne. Son rôle le plus marquant est de maintenir la concentration intra- et extracellulaire de calcium en modulant le métabolisme du calcium et du phosphore au niveau de l'intestin et des os. À part son action sur les minéraux, la vitamine D joue aussi un rôle dans la multiplication et la différenciation

cellulaire. Elle est utilisée efficacement dans le traitement du psoriasis, qui est un désordre hyper prolifératif de l'épiderme.

- **Carence**

La carence en vitamine D3 est un phénomène lié à la pauvreté, à l'habitat, à la pollution, à l'habillement et à une surprotection contre les rayons solaires par crainte du cancer de la peau. Elle se manifeste chez l'enfant par le rachitisme et chez l'adulte par l'ostéomalacie. La combinaison de rues étroites, de bâtiments élevés en encorbellement, ainsi que de fumée des habitations et des usines avait pour effet de réduire énormément le rayonnement ultraviolet du soleil. De plus, les classes pauvres n'avaient pas les moyens de s'offrir les seuls aliments qui contiennent de la vitamine D.

La carence en vitamine D produit une absorption insuffisante au niveau de l'intestin et une réabsorption insuffisante, au niveau du rein, du calcium et du phosphore. Le taux sérique de ces deux minéraux diminue, ce qui, par rapport au calcium, entraîne un hyperparathyroïdisme. L'hormone parathyroïdienne et le peu de vitamine D existant provoquent alors une déminéralisation et un affaiblissement des os. Ceci entraîne les déformations typiques du rachitisme : jambes torses, élargissement des épiphyses osseuses, particulièrement au niveau des genoux, déviation de la colonne vertébrale et déformation de la cage thoracique et du bassin.

L'ostéomalacie est la manifestation du rachitisme chez l'adulte. Elle affecte principalement les femmes en âge de procréation que des grossesses répétées appauvrissent en calcium. Les problèmes seront d'autant plus graves qu'elles auront souffert de rachitisme dans leur enfance. Les vieilles personnes sont aussi susceptibles de développer la carence à cause de leur alimentation souvent négligée, de leurs difficultés physiques et psychiques à sortir de chez elles, enfin, à cause d'une diminution d'absorption du calcium au niveau intestinal ; l'ostéomalacie est alors souvent couplée à l'ostéoporose. Les déformations liées à l'ostéomalacie sont quasiment irréversibles, si ce n'est par la chirurgie orthopédique.

Le traitement du rachitisme et de l'ostéomalacie consiste en doses journalières de 25 à 125 µg de vitamine D durant un mois, sans oublier l'adjonction de 1 à 2 g de lactate de calcium par jour, non seulement pour la reminéralisation des os, mais aussi pour éviter la tétanie hypocalcémique. Il faut ensuite prendre des mesures pour favoriser l'exposition au soleil et améliorer l'alimentation.

- **Besoin**

L'apport alimentaire minimum qui prévient le rachitisme aussi bien que l'ostéomalacie est de 100 UI, soit 2,5 µg /jour. Cela ne signifie pas grand-chose, car on ne connaît pas la part de la synthèse endogène. La variation d'exposition au soleil étant importante, de même que l'alimentation, un apport journalier par l'alimentation est actuellement recommandé. Il devrait être de 400 UI (10 µg) pour les enfants et 100 UI (2,5 µg) pour les adultes.

### **3. Tocophérols ou vitamine E**

La vitamine E est un nom générique qui recouvre huit molécules parentes (isomères) ayant des activités biologiques différentes ; les quatre plus courantes sont l' $\alpha$ -tocophérol, le  $\beta$ -tocophérol, le  $\gamma$ -tocophérol et le  $\delta$ -tocophérol.

- **Source**

L' $\alpha$ -tocophérol et le  $\gamma$ -tocophérol sont les formes les plus répandues dans la nature, essentiellement dans les huiles de germe de blé, de tournesol, de carthame, de colza, d'arachide, de maïs et d'olive.

À noter que certaines huiles, comme l'huile de soja, contiennent beaucoup plus de  $\gamma$ -tocophérol que de  $\alpha$ -tocophérol.

Parmi les différents isomères, c'est l' $\alpha$ -tocophérol qui contribue le plus à l'activité vitaminique.

- **Absorption, métabolisme et excrétion**

L'absorption de la vitamine E se fait essentiellement dans la partie médiane de l'intestin grêle. Lorsque l'apport par l'alimentation est normal, 50 % environ de la vitamine E est absorbé ; cette proportion est inversement proportionnelle à la quantité ingérée. La présence de lipides dans l'alimentation favorise l'absorption, laquelle, par ailleurs, dépend des sels biliaires et des enzymes pancréatiques. Actuellement, on ne dispose pas de connaissances supplémentaires solides sur l'absorption de la vitamine E.

La vitamine se concentre surtout dans les fractions cellulaires riches en membranes. Les organes les plus riches en vitamine E sont le tissu adipeux, le foie et le muscle, que l'on considère comme des organes de stockage. Le métabolisme de la vitamine E est très mal connu : il semble être très lent et la vitamine est excrétée telle quelle dans les selles.

- **Fonction**

Il est presque certain aujourd'hui que la vitamine E fonctionne comme antioxydant au niveau de la membrane cellulaire. Elle protégerait, en particulier, les acides gras polyinsaturés contre l'attaque des radicaux libres à laquelle ils sont très sensibles. Chez les animaux carencés en vitamine E, on a constaté que certains symptômes disparaissent complètement suite à l'administration d'antioxydants.

- **Carence**

La seule affirmation que l'on peut faire concernant la carence en vitamine E chez l'être humain est que les globules rouges du sang deviennent de plus en plus sensibles à l'hémolyse in vitro, et que leur durée de vie se raccourcit in vivo quand le taux plasmatique de vitamine E descend au-dessous de 0,5 mg / dl.

Chez les enfants prématurés, la carence comme étant à l'origine de pathologies spécifiques, telle que la rétinopathie du prématuré et l'anémie hémolytique.

Chez les patients souffrant de malabsorption, on n'a pas non plus mis en évidence de relation entre le taux plasmatique bas de vitamine E et des désordres spécifiques, comme la myopathie de Duchenne. En revanche, chez ces patients, le temps de vie des érythrocytes est diminué, ce qui est corrigé par l'administration journalière de 100 à 200 UI de vitamine E. Ceci confirme le rôle physiologique de la vitamine et sa place parmi les éléments nutritifs essentiels.

En cas de malabsorption, les doses journalières de traitement recommandées sont de 25 à 50 UI pour les nourrissons, de 50 à 100 UI pour les enfants de 1 à 10 ans, de 100 UI pour les adolescents de 10 à 18 ans, et de 200 UI pour ceux qui ont plus de 18 ans.

- **Besoin**

Il a été montré que chez l'adulte, le besoin minimal pour maintenir un taux plasmatique de tocophérol supérieur à 0,5 mg / dl est de 2 mg d' $\alpha$ -tocophérol ( $\approx 3$  UI).

#### **4. Phylloquinone ou vitamine K**

- **Source**

La vitamine K (nom générique pour toute une série de composés ayant la même activité vitaminique que la phylloquinone ou vitamine K1) est largement répandue dans le monde végétal, animal et bactérien. Cependant, seules les plantes et les bactéries peuvent synthétiser la partie essentielle de la molécule. Celle-ci se trouve en concentration élevée dans les légumes verts (épinards, choux, brocolis, laitue), dans les produits laitiers et carnés et dans les fruits et les céréales.

- **Absorption**

L'absorption de la vitamine K requiert la présence des sels biliaires et des sucs pancréatiques. La vitamine est incorporée dans les chylomicrons ; elle est absorbée au niveau de l'intestin grêle et réapparaît dans la lymphe. L'efficacité de l'absorption varie entre 40 et 80 %.

- **Métabolisme, stockage et excrétion**

La vitamine K a une vitesse de renouvellement extrêmement rapide, de l'ordre d'un jour, avec une quantité totale estimée à environ 100 µg, ce qui en fait la vitamine ayant la plus petite réserve dans l'organisme et dont le métabolisme est le plus rapide. La plus grande concentration de vitamine K se trouve dans le foie. Les études avec la vitamine radioactive ont montré qu'après utilisation comme cofacteur enzymatique, la vitamine K est rapidement dégradée en une série de produits incorrectement identifiés jusqu'à présent, produits que l'on retrouve dans les selles et les urines.

- **Fonction**

La vitamine K participe comme coenzyme à la formation de sept protéines impliquées dans la cascade de réactions menant à la coagulation sanguine.

- **Carence**

La carence en vitamine K se manifeste par des saignements et des hémorragies. Elle est quasiment inexistante chez l'adulte, à cause de la présence en quantité suffisante de la vitamine dans pratiquement tout type d'alimentation, mais aussi grâce au cycle de préservation de la vitamine K et à sa synthèse par la flore intestinale.

Cependant, les nouveau-nés, particulièrement les prématurés, sont susceptibles de développer l'hémorragie du nouveau-né, car leur capacité de coagulation est au départ très faible, leur alimentation est pauvre en vitamine K et leur tractus intestinal est stérile. L'amélioration de la capacité de coagulation se fait en général spontanément, en quelques jours. Néanmoins, il est recommandé d'administrer aux nouveau-nés une dose intra-musculaire de 1 mg de phylloquinone.

Quant aux personnes âgées, elles sont susceptibles de développer une carence, en particulier quand elles se nourrissent mal, car le besoin de vitamine K augmente avec l'âge, sans qu'on sache exactement pourquoi (absorption moins efficace, fonction hépatique diminuée, renouvellement plus rapide, besoin réellement accru).

Si la carence primaire en vitamine K est rare, la carence secondaire peut survenir pour plusieurs raisons : problème au niveau de l'absorption des lipides (obstruction des canaux biliaires et malabsorption), administration d'antibiotiques ayant un impact sur la flore intestinale, dosage trop élevé d'anticoagulants, ou encore, consommation de doses élevées de vitamines A et E.

- **Besoin**

Le fait que l'alimentation soit suffisamment riche en vitamine K et que la flore intestinale contribue à l'apport rend difficile l'évaluation des besoins minimaux en vitamine K. Plusieurs études ont néanmoins montré que le besoin est de l'ordre de 0,5 à 1,0  $\mu\text{g}$  de vitamine K par kg et par jour.



## Annexes

### Structure des unités fondamentales des macromolécules

#### 1. Les glucides

- Structure et groupements fonctionnels

##### Principales fonctions

##### ☐ Oses

- Fonction carbonyle

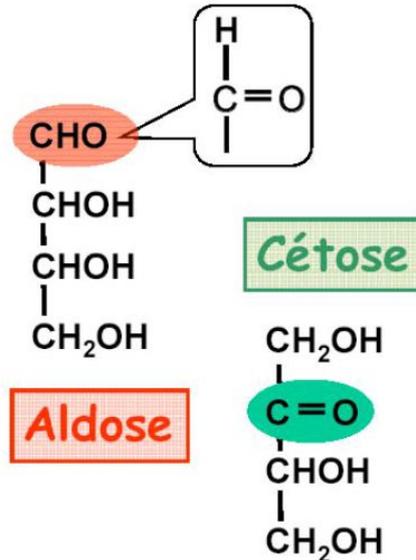


- aldéhyde (C1)
- cétone (C2)

- Fonction hydroxyle



- alcool primaire
- alcool secondaire



- Filiation des oses

#### Filiation des aldoses (Fischer)

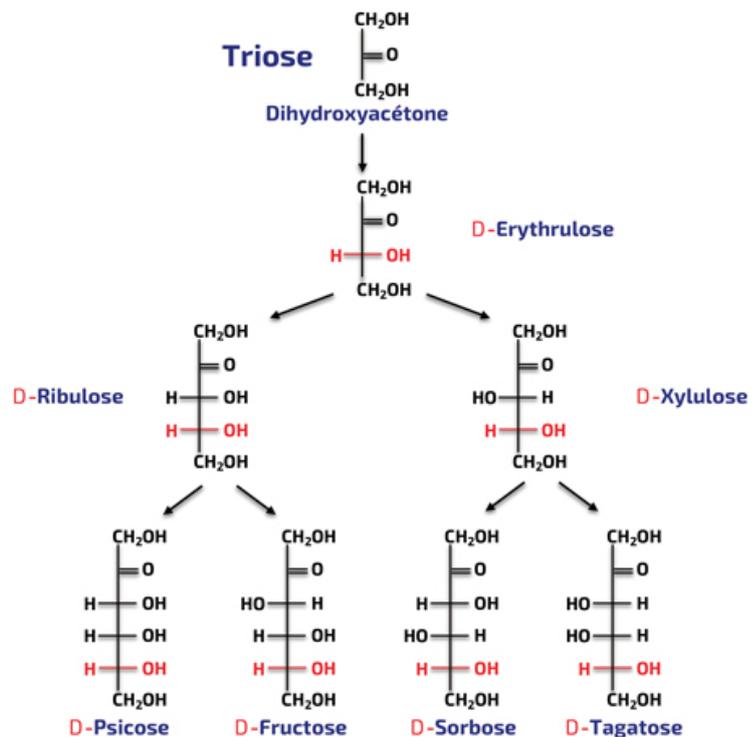


#### Filiation des cétones (Fischer)

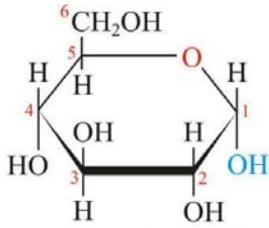
**Tétraoses**  
 $2^{4-3} = 2$  stéréoisomères  
 (1 série D + 1 série L)

**Pentoses**  
 $2^{5-3} = 4$  stéréoisomères  
 (2 série D + 2 série L)

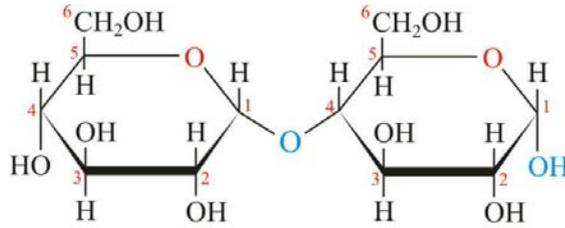
**Hexoses**  
 $2^{6-3} = 8$  stéréoisomères  
 (4 série D + 4 série L)



- Classification des glucides

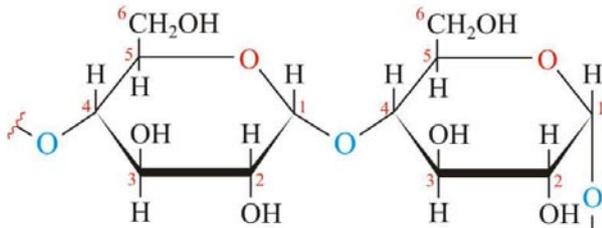


**monosaccharide  
(glucose)**

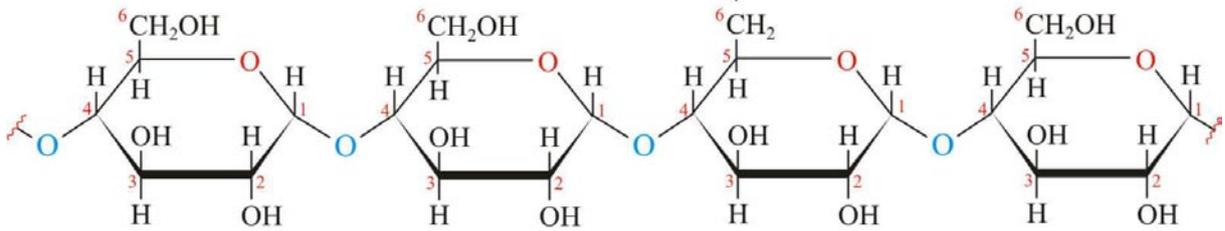


**disaccharide  
(maltose)**

**Hydrates de carbone**



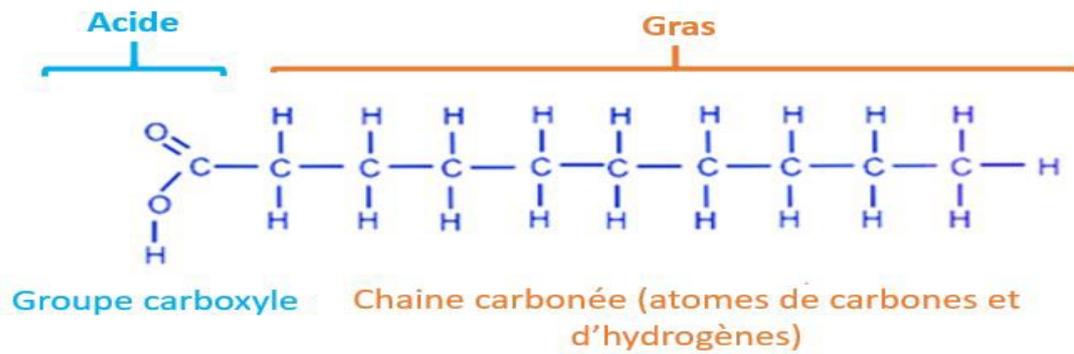
**polysaccharide  
(amidon)**



**gnu - [www.aquaportail.com](http://www.aquaportail.com)**

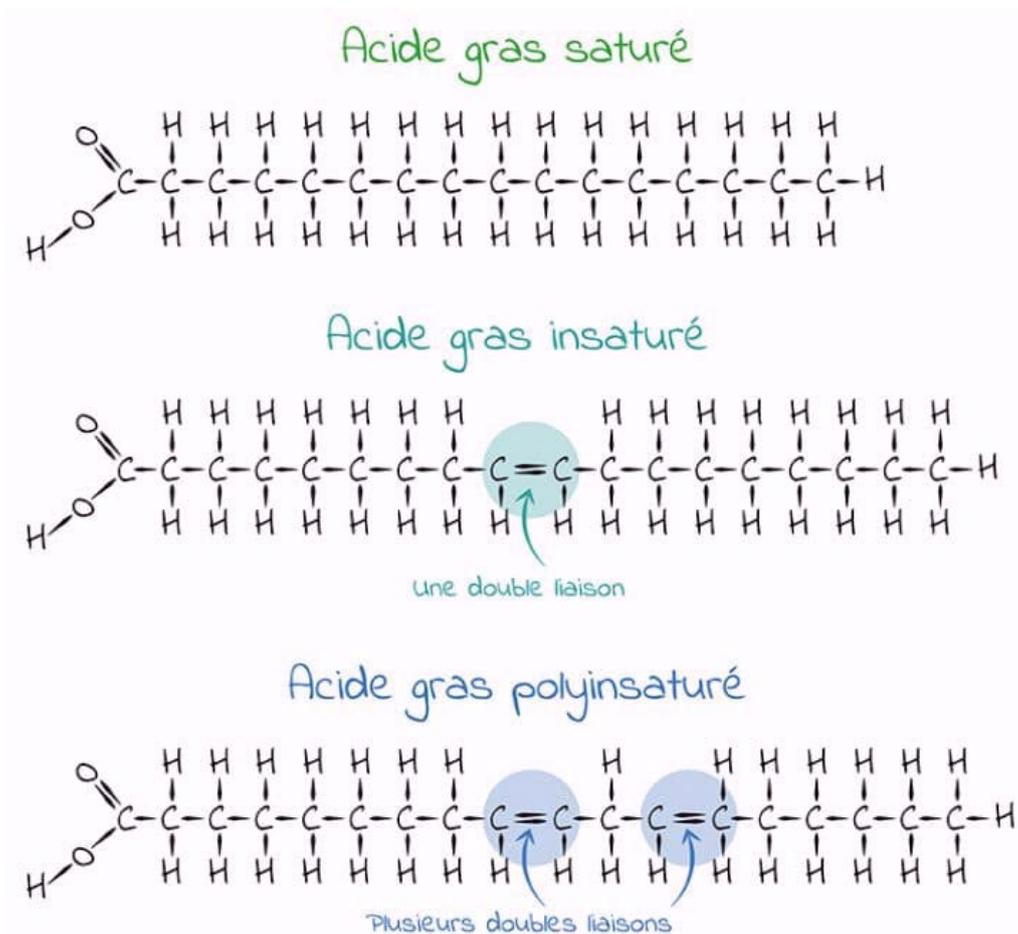
## 2. Les lipides

- Structure générale d'un acide gras

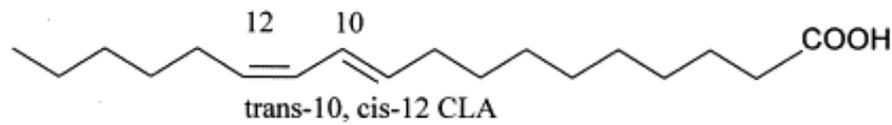
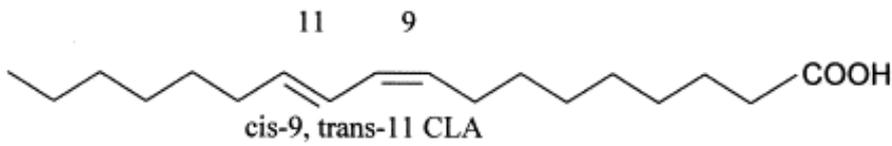
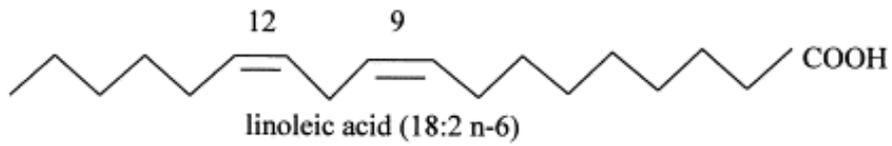


### Structure d'un acide gras (saturé)

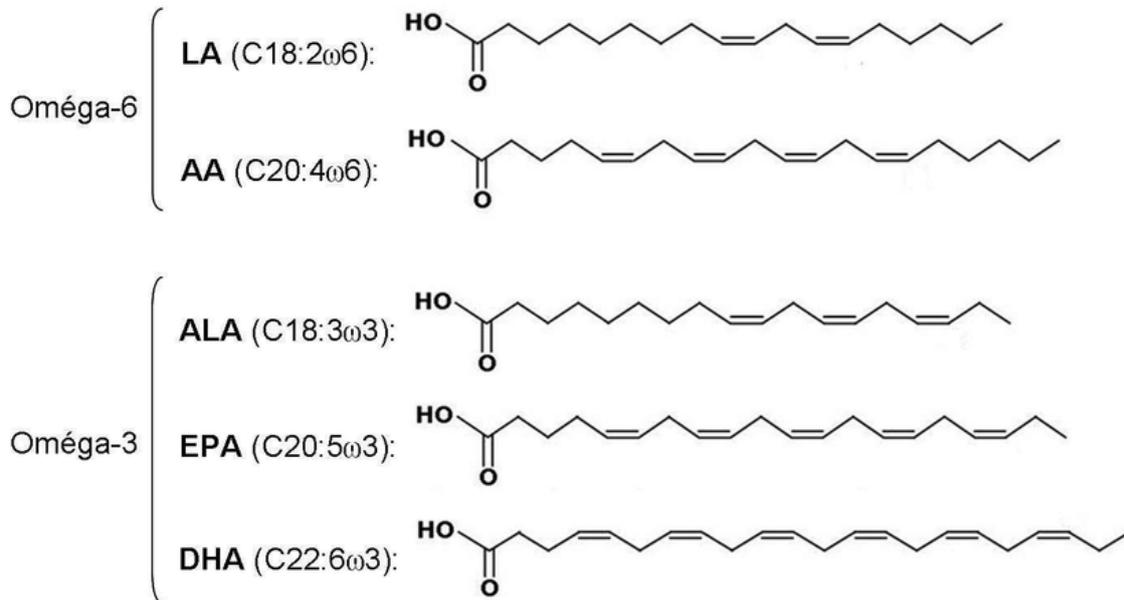
- Classification des acides gras



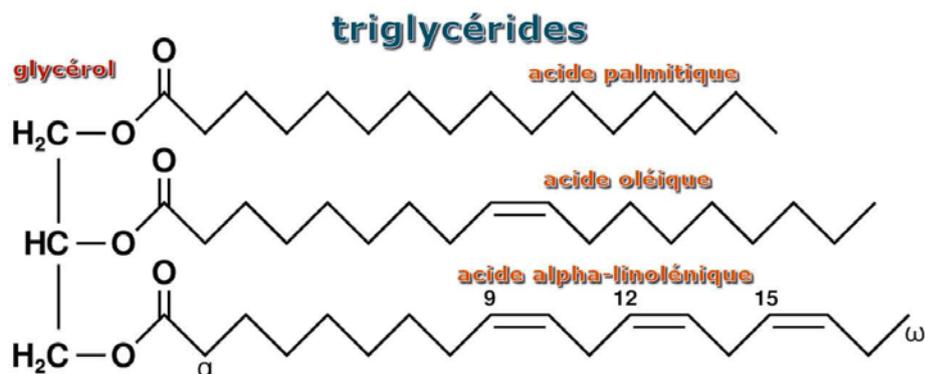
- Configuration cis et trans



- Oméga-6 et Oméga-3



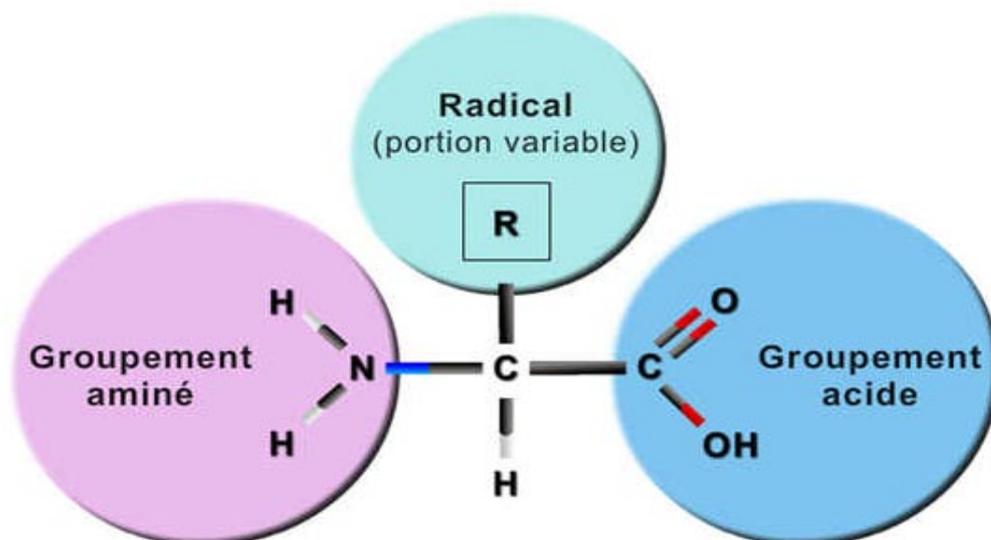
- Triglycérides



### 3. Les acides aminés

gnu - [www.aquaportail.com](http://www.aquaportail.com)

- Structure de base



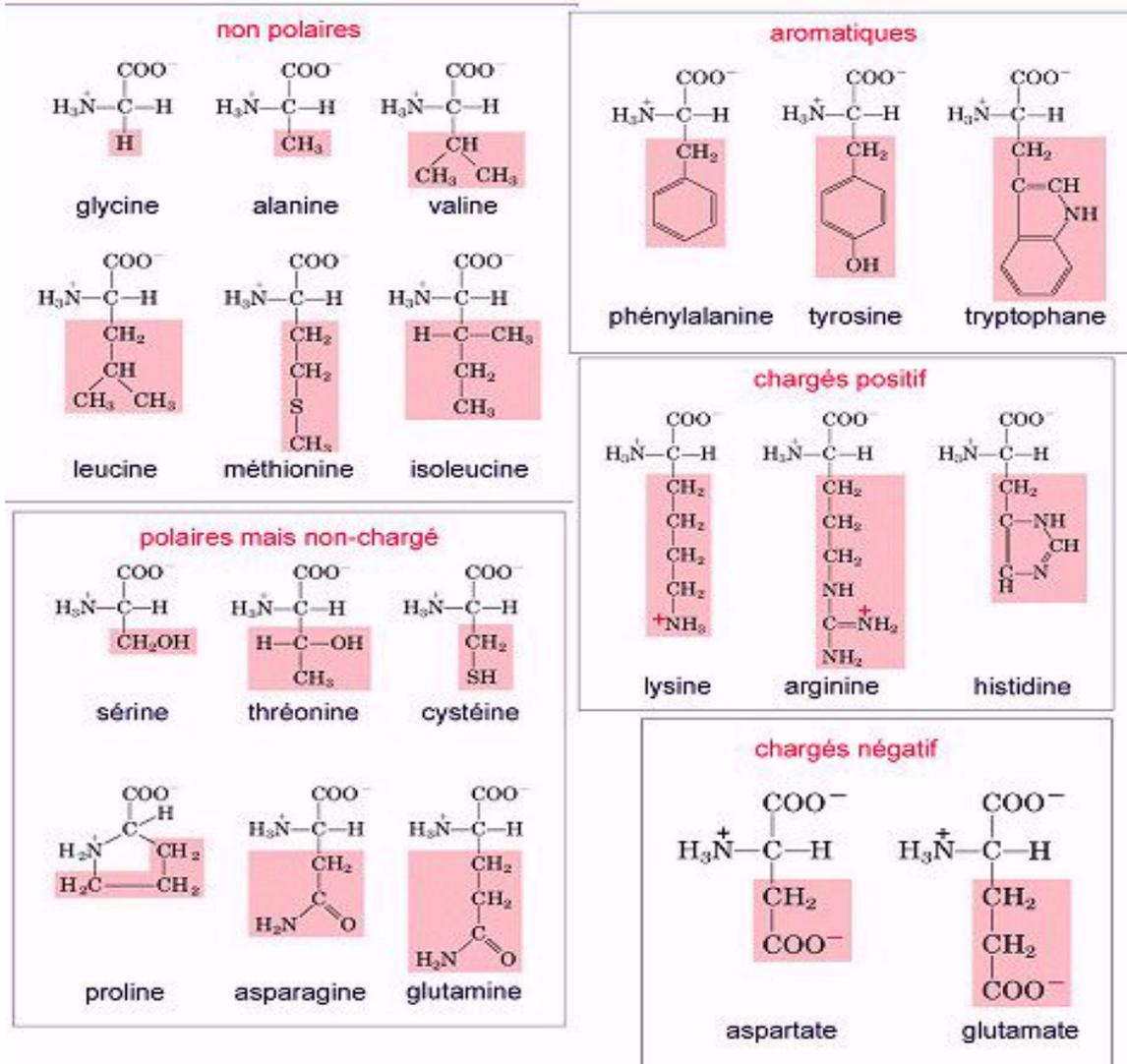
- Les types des acides aminés

### Les 20 acides aminés

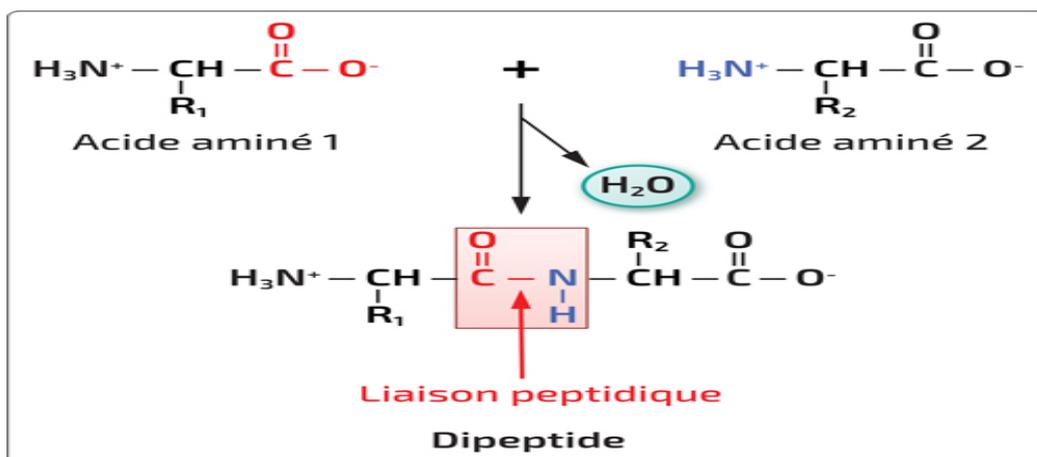
|                         |     |   |
|-------------------------|-----|---|
| <b>Acide glutamique</b> | Glu | E |
| <b>Acide aspartique</b> | Asp | D |
| <b>Alanine</b>          | Ala | A |
| <b>Arginine</b>         | Arg | R |
| <b>Asparagine</b>       | Asn | N |
| <b>Cystéine</b>         | Cys | C |
| <b>Glutamine</b>        | Gln | Q |
| <b>Glycine</b>          | Gly | G |
| <b>Histidine</b>        | His | H |
| <b>Isoleucine</b>       | Ile | I |

|                      |     |   |
|----------------------|-----|---|
| <b>Leucine</b>       | Leu | L |
| <b>Lysine</b>        | Lys | K |
| <b>Méthionine</b>    | Met | M |
| <b>Phénylalanine</b> | Phe | F |
| <b>Proline</b>       | Pro | P |
| <b>Sérine</b>        | Ser | S |
| <b>Thréonine</b>     | Thr | T |
| <b>Tryptophane</b>   | Trp | W |
| <b>Tyrosine</b>      | Tyr | Y |
| <b>Valine</b>        | Val | V |

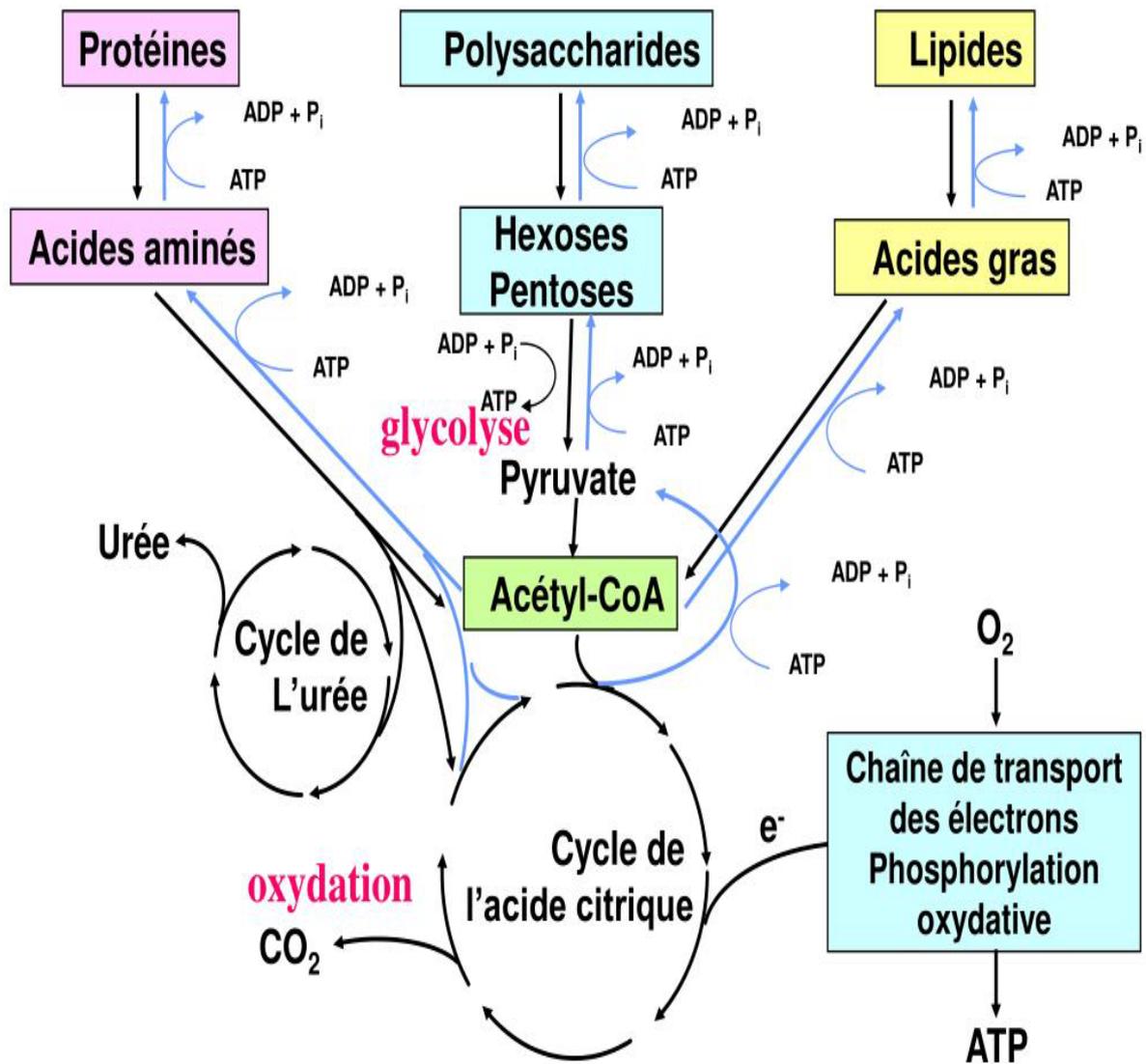
## les vingt acides aminés



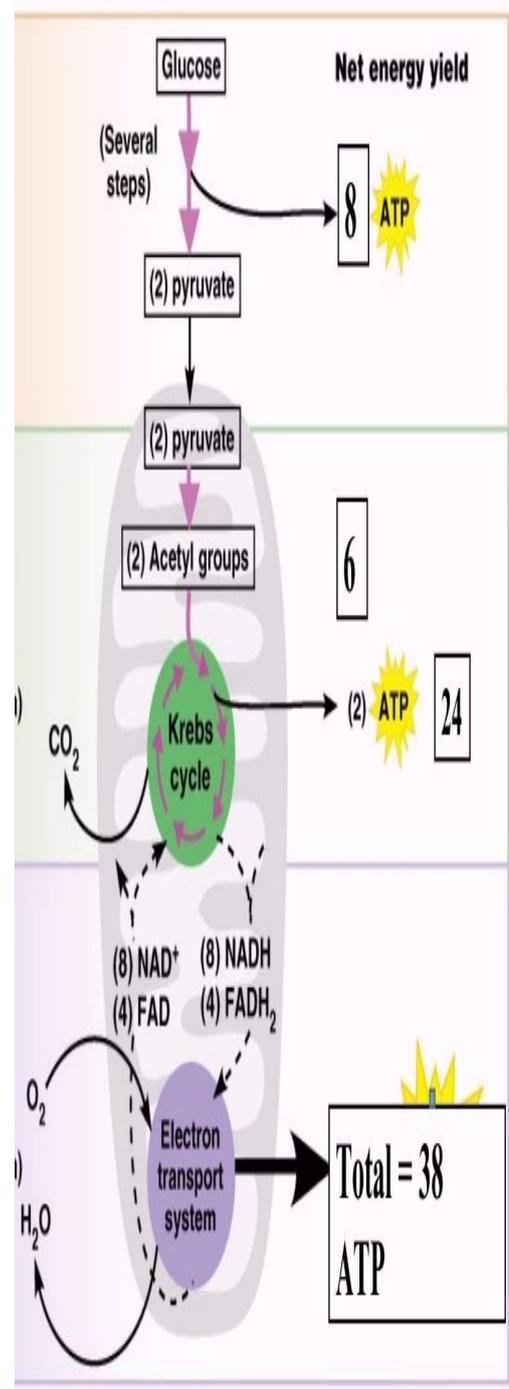
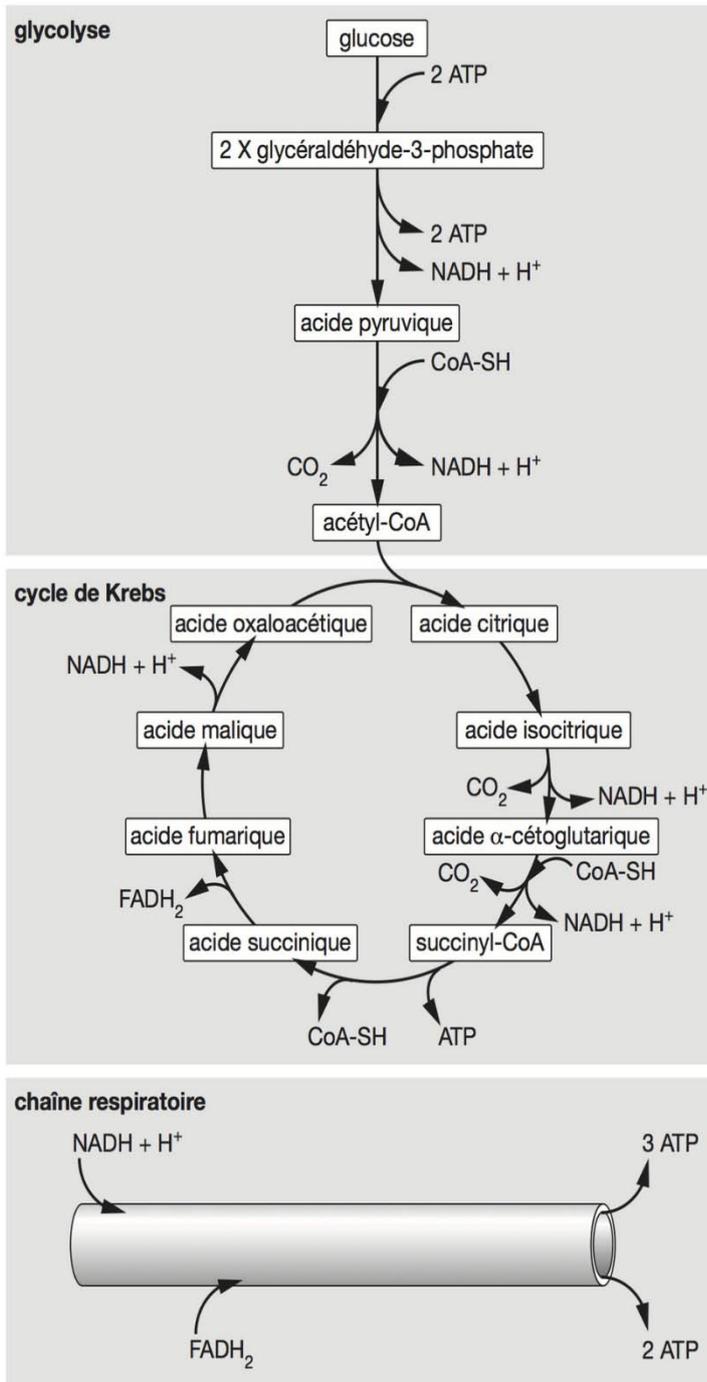
- **Liaison peptidique**



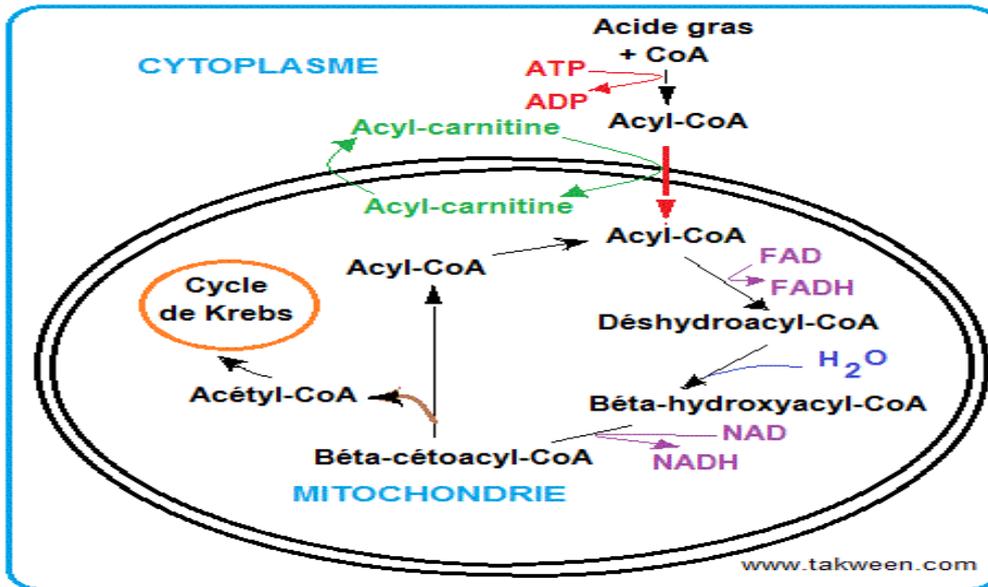
## Métabolisme des macromolécules



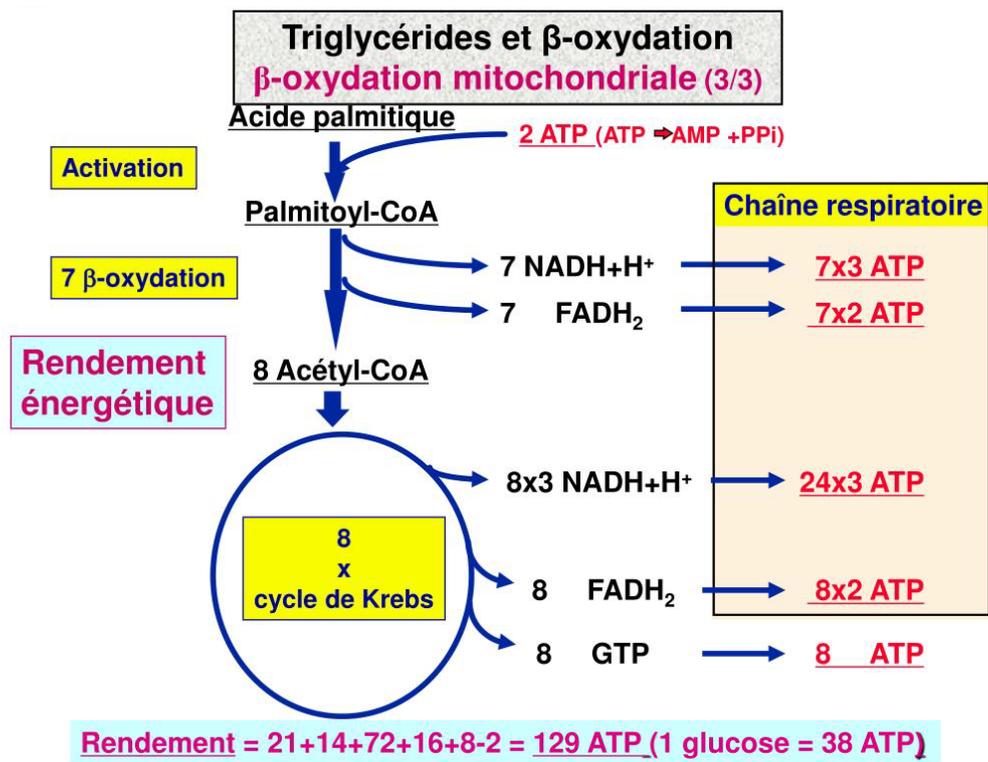
- Métabolisme des glucides et bilan énergétique



- Métabolisme des lipides et bilan énergétique

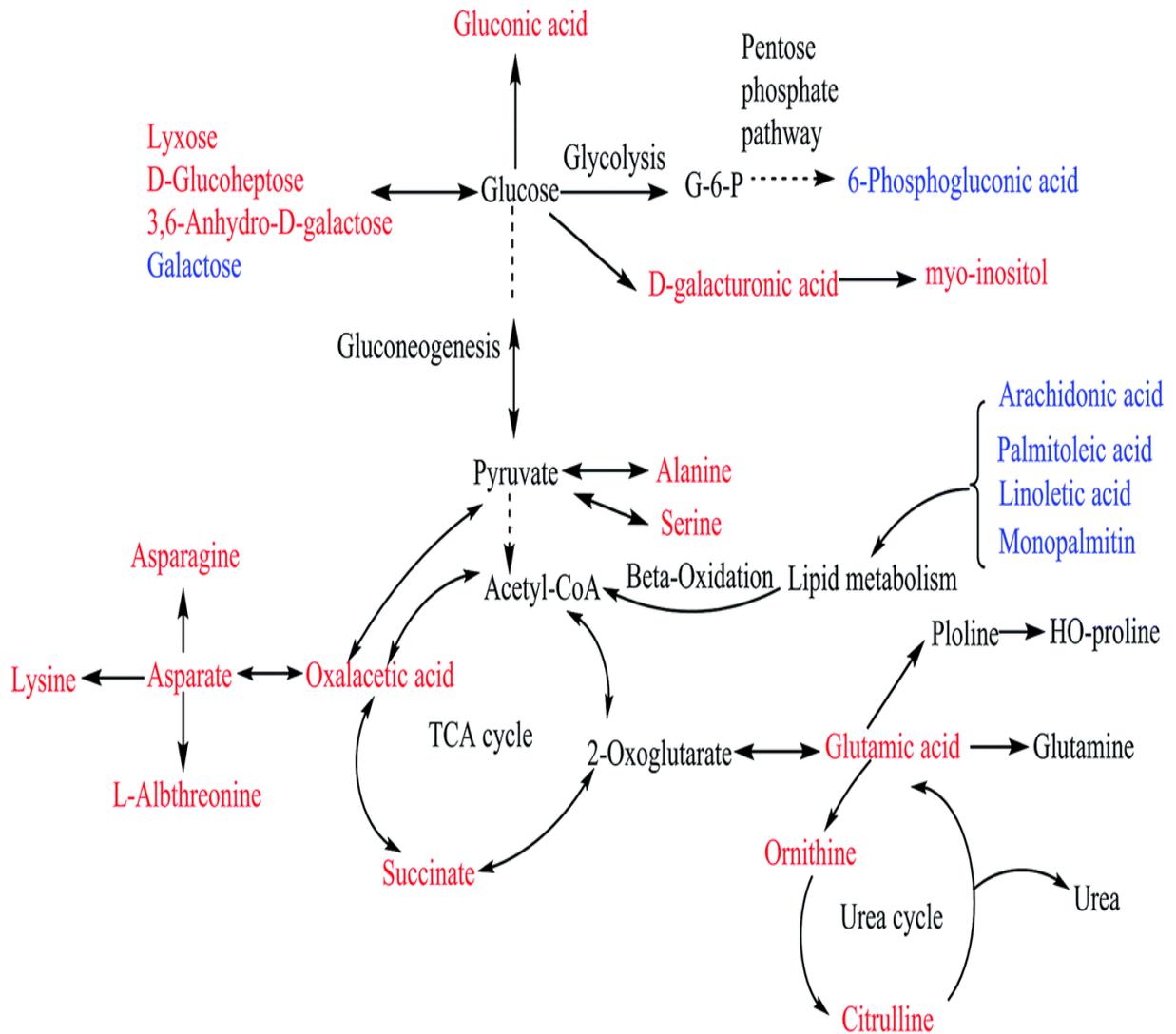


Acides gras. Bêta-oxydation

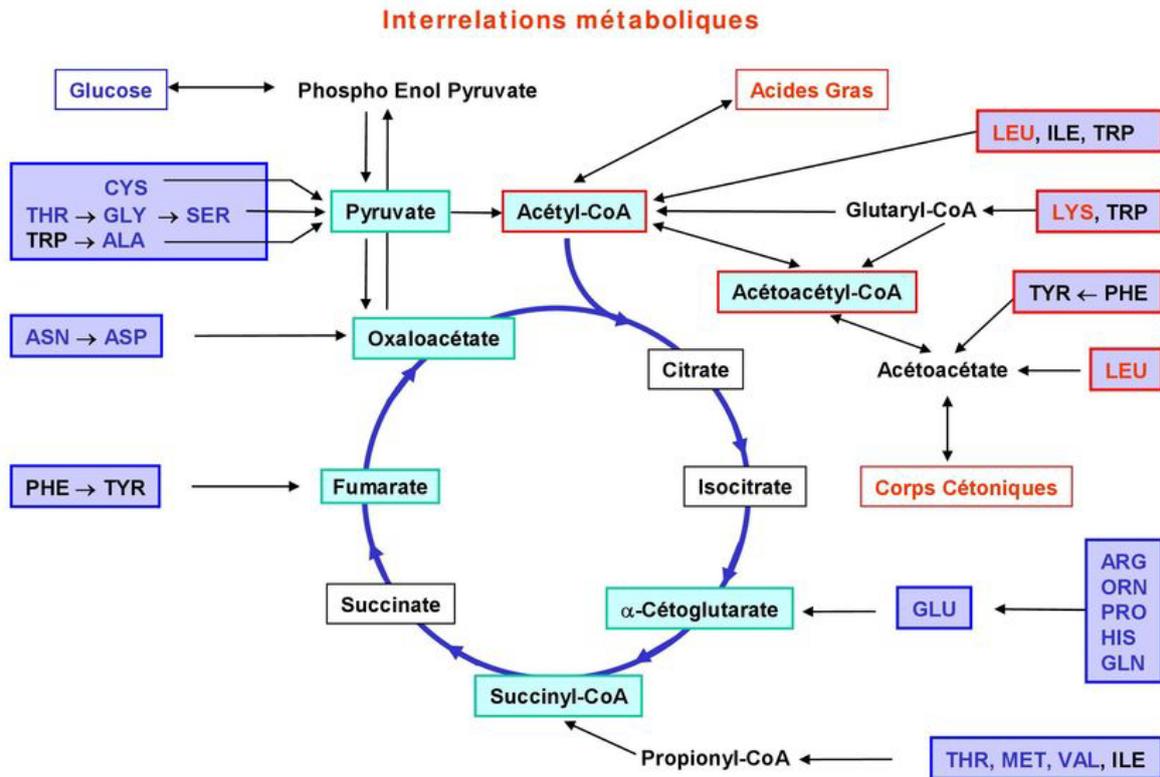


- **Métabolisme des acides aminés**

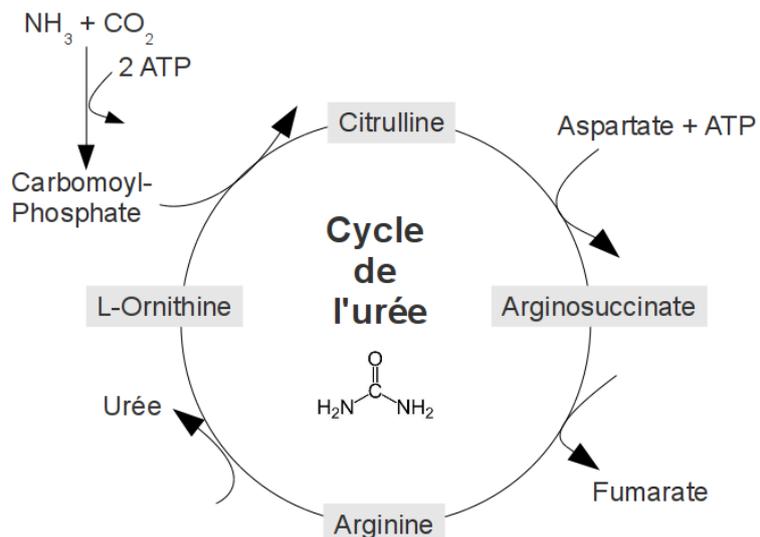
- **Vue sur l'ensemble**



**-TCA cycle (Cycle de Krebs)**

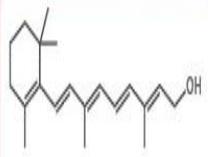
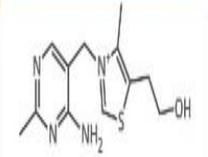
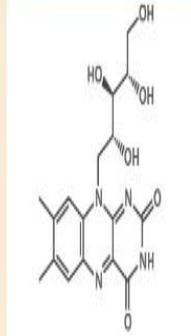
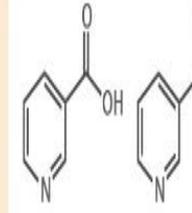
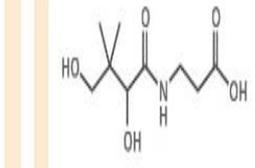
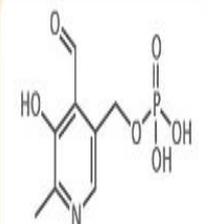
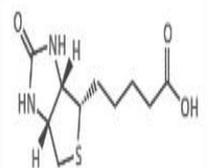
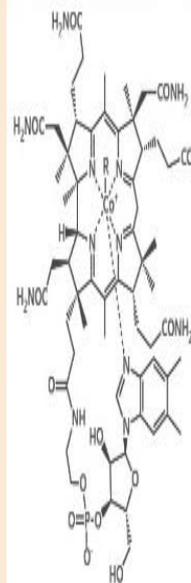
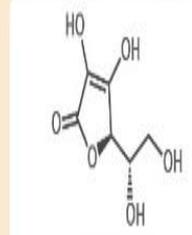
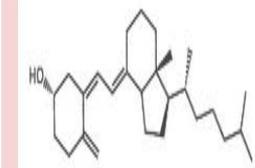
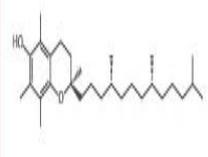
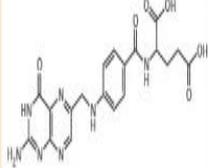
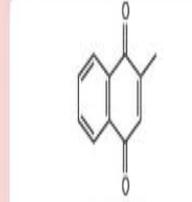


**- Urea cycle (Cycle de l'urée)**



## Vitamines et minéraux

- Structure chimique des vitamines**

|   |   |   |   |  |
|---|---|---|---|--|
| <p style="text-align: center;"><b>VITAMIN A</b></p>  <p style="text-align: center;"><b>RETINOL</b><br/><i>active form in mammalian tissues</i></p> <p>Important for eyesight. Also strengthens immune system and keeps skin and linings of parts of the body healthy.</p>  | <p style="text-align: center;"><b>VITAMIN B1</b></p>  <p style="text-align: center;"><b>THIAMIN</b><br/><i>can also occur in pyrophosphate ester form</i></p> <p>Used to keep nerves &amp; muscle tissue healthy. Also important for processing of carbohydrates and some proteins.</p>          | <p style="text-align: center;"><b>VITAMIN B2</b></p>  <p style="text-align: center;"><b>RIBOFLAVIN</b><br/><i>excess turns urine bright yellow</i></p> <p>Important for body growth, red blood cell production, and keeping the eyes healthy. Also helps processing of carbohydrates.</p>              | <p style="text-align: center;"><b>VITAMIN B3</b></p>  <p style="text-align: center;"><b>NICOTINIC ACID    NICOTINEAMIDE</b><br/><i>niacin is collective name for these compounds</i></p> <p>Helps with digestion and digestive system health. Also helps with the processing of carbohydrates.</p>  | <p style="text-align: center;"><b>VITAMIN B5</b></p>  <p style="text-align: center;"><b>PANTOTHENIC ACID</b><br/><i>can also occur in pyrophosphate ester</i></p> <p>Important for manufacturing red blood cells and maintaining a healthy digestive system. Also helps process carbohydrates.</p>      |
| <p style="text-align: center;"><b>VITAMIN B6</b></p>  <p style="text-align: center;"><b>PYRIDOXAL PHOSPHATE</b><br/><i>active form in mammalian tissues</i></p> <p>Helps make some brain chemicals; needed for normal brain function. Also helps make red blood cells and immune system cells.</p>             | <p style="text-align: center;"><b>VITAMIN B7</b></p>  <p style="text-align: center;"><b>BIOTIN</b><br/><i>produced by intestinal bacteria</i></p> <p>Needed for metabolism of various compounds. Often recommended for strengthening hair, but evidence is variable.</p>                       | <p style="text-align: center;"><b>VITAMIN B12</b></p>  <p style="text-align: center;"><b>COBALAMIN</b><br/><i>usually contains CN as the R group</i></p> <p>Important for the nervous system, for making red blood cells, and helps in the production of DNA and RNA.</p>                            | <p style="text-align: center;"><b>VITAMIN C</b></p>  <p style="text-align: center;"><b>ASCORBIC ACID</b><br/><i>deficiency can cause scurvy</i></p> <p>Important for a healthy immune system; helps produce collagen, used to make skin and other tissues. Also helps wound healing.</p>  | <p style="text-align: center;"><b>VITAMIN D</b></p>  <p style="text-align: center;"><b>CHOLECALCIFEROL</b><br/><i>natural form; different form used in supplements</i></p> <p>Important for bone health and maintaining the immune system function. May also have a preventative role in cancers.</p> |
| <p style="text-align: center;"><b>VITAMIN E</b></p>  <p style="text-align: center;"><b>ALPHA-TOCOPHEROL</b><br/><i>group includes tocopherols &amp; tocotrienols</i></p> <p>An antioxidant that helps prevent damage to cells and may have a preventative role in cancer. Also helps make red blood cells.</p> | <p style="text-align: center;"><b>VITAMIN B9</b></p>  <p style="text-align: center;"><b>FOLIC ACID</b><br/><i>found as tetrahydrofolate in food</i></p> <p>Important for brain function &amp; mental health. Aids production of DNA &amp; RNA. Important when tissues are growing quickly.</p> | <p style="text-align: center;"><b>VITAMIN K</b></p>  <p style="text-align: center;"><b>MENADIONE</b><br/><i>all K vitamins are menadione or derivatives</i></p> <p>Helps blood clot properly, &amp; plays a key role in bone health. Newborns receive vitamin K injections to prevent bleeding.</p> | <p style="text-align: center;"><i>Key</i></p> <p>Vitamins can be divided broadly into two classes.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: orange;">●</span> <b>WATER SOLUBLE VITAMINS</b><br/>These vitamins are not stored in the body. As such, generally, they are required more frequently than the fat soluble vitamins.</li> <li><span style="color: red;">●</span> <b>FAT SOLUBLE VITAMINS</b><br/>These vitamins are stored in the liver and fatty tissues until required. As such, they can be harmful if too much is taken in.</li> </ul> |  |

- Apport journalier recommandé en vitamines et minéraux

| <b>Vitamines</b>      | <b>AR</b> | <b>Minéraux</b> | <b>AR</b> |
|-----------------------|-----------|-----------------|-----------|
| Vitamine A            | 800 µg    | Calcium         | 800 mg    |
| Vitamine B1           | 1,1 mg    | Chrome          | 40 µg     |
| Vitamine B2           | 1,4 mg    | Cuivre          | 1 mg      |
| Vitamine B3 (niacine) | 16 mg     | Fer             | 14 mg     |
| Vitamine B5           | 6 mg      | Fluorure        | 3,5 mg    |
| Vitamine B6           | 1,4 mg    | Iode            | 150 µg    |
| Vitamine B8 (biotine) | 50 µg     | Magnésium       | 375 mg    |
| Vitamine B9 (folates) | 200 µg    | Manganèse       | 2 mg      |
| Vitamine B12          | 2,5 µg    | Molybdène       | 50 µg     |
| Vitamine C            | 80 mg     | Phosphore       | 700 mg    |
| Vitamine D            | 5 µg      | Potassium       | 2000 mg   |
| Vitamine E            | 12 mg     | Sélénium        | 55 µg     |
| Vitamine K            | 75 µg     | Zinc            | 10 mg     |

# TABLEAU NUTRITIF VÉGÉTAL

| VITAMINES   |   |   |   |  |  |   | PROTÉINES   | ACIDE GRAS ESSENTIELS   |
|---|---|---|---|--|--|---|---|---|
| A   | B   | B12   | C   | D  | E  | K   |   |   |
| ABONDANTE DANS LES VÉGÉTAUX<br>MEUX ASSORBÉE<br>DANS LES VÉGÉTAUX CROUS   | ABONDANTE DANS UNE<br>ALIMENTATION VARIÉE   | S'ASSURER<br>D'UN APPORT RÉGULIER<br>PAR UNE SOURCE FIABLE  | ALTÉRÉE PAR LA LUMIÈRE<br>ET LA CHALEUR<br>AIDE À L'ASSIMILATION DU FER   | FACILITE L'ASSIMILATION<br>DU CALCIUM<br>EXISTENT MOINS DE SOURCES VÉGÉTALES<br>QUE POUR LES ANIMAUX   | PAS DE CARENCE DANS UNE<br>ALIMENTATION VARIÉE   | PAS DE CARENCE DANS UNE<br>ALIMENTATION VARIÉE  | PAS DE CARENCE SI<br>L'ALIMENTATION EST VARIÉE ET<br>QUE L'ON MANGE À SA FAIM   | ACIDE ALPHA-LINOLÉIQUE (OMEGA-3)<br>ACIDE ARACHIDIQUE (OMEGA-6)<br>PAS DE CARENCE DANS UNE<br>ALIMENTATION VARIÉE   |
| <b>carottes</b><br><br><br><b>persil</b><br><br><b>légumes à feuilles vertes</b><br>épinard<br>fenouil<br>oseille<br>chou<br><br><b>fruits et légumes de couleur orange</b><br>tomate<br>potiron<br>abricot sec<br>melon | <b>légumes à feuilles vertes</b><br><br><b>céréales complètes</b><br><br><br><b>banane</b><br><br><b>avocat</b><br><br><b>cacahuètes</b><br><br><b>champignons</b><br><br><b>baies</b><br><br><b>légumes secs</b><br><br><b>levure de bière</b><br><br><b>germe de blé</b> | <b>produits enrichis</b><br>céréales du petit-déjeuner<br>jus de fruits<br>"Marmite"<br>yaourt au soja<br>lait de soja<br><br><br><b>ampoules buvables</b><br>disponible en pharmacie<br><br><b>comprimés de B12</b><br>d'origine végétale | <b>légumes à feuilles vertes</b><br><br>brocoli<br>oseille<br>cresson<br>chou<br>persil<br><br><b>cassis</b><br><br><b>kiwi</b><br><br><b>fraises</b><br><br><b>orange</b><br><br><b>citron</b><br><br>Tous les fruits et légumes en général | <br><br><b>lumière du soleil sur la peau</b><br><br><small>synthèse de la vitamine D même par temps nuageux<br/>les peaux foncées ont besoin de s'exposer davantage</small><br><br><b>certains aliments sont enrichis</b><br>vitamine D2 d'origine végétale<br><small>attention la vitamine D2 est d'origine animale (poissons)</small> | <b>huiles végétales</b><br>soja<br>arachide<br>olive<br><br><b>germe de blé</b><br><br><b>tahini</b><br><br><b>groupe des noix</b><br><br><br><b>graines</b><br><br><b>avocat</b><br><br><b>farine pain complet</b> | <b>légumes à feuilles vertes</b><br>épinards<br>cresson<br>brocoli<br><br><b>algues</b><br><br>nori<br>wakamé<br><br><b>huiles végétales</b> | <b>lait de soja et céréales du petit-déjeuner</b><br><br><br><b>tofu, steak de soja</b><br>le soja fait partie des légumes secs<br><br><b>légumes secs</b><br>lentilles vertes ou corail, haricots secs, pois chiches, pois cassés, soja<br><br><b>et céréales complètes</b><br>pain, pâtes, riz, maïs, sarrasin, seigle<br><small>HOMMES SUR DU PAIN, FALAFEL, COUSCOUS, TACOS</small><br><br><b>graines germées</b><br><br><b>fruits oléagineux</b><br>noix, noisette, amande, graines de tournesol, de sésame, de cajou, cacahuètes | <b>margarine 100% végétale</b><br><br><b>huiles végétales</b><br>huile d'olive, huile de noix, bien équilibrées<br>huile de colza, de soja, de lin, de tournesol<br><br><br><b>fruits oléagineux</b><br>noix, noisette, amande, graines de tournesol, de sésame, de cajou, cacahuètes<br><br><b>avocat</b> |

| MINÉRAUX  |  |  |   |  |  |   | GLUCIDES   | FIBRES                          |
|---|--|--|---|--|--|---|--|---------------------------------|
| FER   | CALCIUM  | ZINC   | IODE  | MAGNÉSIUM  | PHOSPHORE-SOUFRE POTASSIUM   | AUTRES MINÉRAUX : CUIVRE, COBALT, MANGANESE   |  |                                 |
| ASSORPTION FACILITÉE<br>PAR LA VITAMINE C   | POUR LA SOLIDITÉ DES OS<br>POUR UNE BONNE FIXATION DU CALCIUM<br>IL FAUT FAIRE DE L'EXERCICE PHYSIQUE  | PAS DE CARENCE DANS<br>UNE ALIMENTATION VARIÉE   | S'ASSURER<br>D'UN APPORT RÉGULIER<br>SANS EXCÈS   | ABONDANT DANS UNE<br>ALIMENTATION VARIÉE   | ABONDANTS DANS UNE<br>ALIMENTATION VARIÉE  | ABONDANTS DANS UNE<br>ALIMENTATION VARIÉE   | OU "HYDRATES DE CARBONE"<br>ABONDANTS DANS UNE<br>ALIMENTATION VARIÉE  | ABONDANTES DANS<br>LES VÉGÉTAUX |
| <b>légumes secs</b><br>lentilles vertes ou corail, haricots secs, pois chiches, pois cassés, soja<br><br><br><b>tofu</b><br><br><b>céréales complètes</b><br><br>chou, persil, cresson, épinards<br><br><b>fruits secs</b><br>abricots, dattes, pruneaux, figues, raisins, bananes<br><br><b>fruits oléagineux</b><br>cacao<br>mélasse | <b>fruits oléagineux</b><br>noix de cajou, de pécan, noisettes, noix fraîches<br><br><b>légumes à feuilles vertes</b><br>tofu<br>cassis<br><br>persil, cresson, épinards, brocoli<br><br>abricots secs, dattes, figues, raisins secs<br><br><b>orange</b><br><br><b>tahini</b><br><br><b>eau minérale</b> | <b>lentilles</b><br><br><b>céréales complètes</b><br>avoine<br><br><b>germe de blé</b><br><br><b>graines de courge</b><br><br><b>graines de sésame</b><br><br>amandes<br><br><b>cacao</b><br><br>noix de cajou, noisettes fraîches, noix fraîches | <b>légumes à feuilles vertes</b><br>leur teneur en iode dépend du sol<br><br><br><b>sel iodé</b><br><br><b>algues</b><br><br><b>noix de cajou</b><br><br><b>ananas</b> | <b>légumes à feuilles vertes</b><br>épinard, fenouil, oseille, petit pois, haricots verts, brocoli<br><br><b>fruits oléagineux</b><br><br><b>fruits secs</b><br>abricots, dattes, figues, raisins<br><br><b>avocat</b><br><br><br><b>banane</b> | <b>céréales complètes</b><br><br><br><b>germe de blé</b><br><br><b>graines de courge</b><br><br><b>pommes de terre</b><br><br>Tous les fruits et légumes en général<br><br><b>fruits oléagineux</b><br><br><b>fruits secs</b><br>noix de cajou, noix fraîches, noix de pécan, amandes,<br><br><b>avocat</b><br><br><b>cacao</b> | <b>levure de bière</b><br><br><b>légumes à feuilles vertes</b><br><br><b>pommes de terre</b><br><br><b>céréales complètes</b><br><br><b>légumes secs</b><br><br><b>fruits oléagineux</b><br><br>noix de cajou, noix fraîches, noix de pécan, amandes,<br><br><b>algues</b><br><br><b>abricots secs</b> | <b>céréales</b><br>pain<br>pâtes<br>riz<br><br><b>pommes de terre</b><br><br><br><b>légumes secs</b><br><br><b>légumes secs</b><br><br>Tous les fruits et légumes en général<br><br> |                                 |

