

## INTRODUCTION AU COURS D'ALIMENTATION HUMAINE

### 1. L'ALIMENTATION HUMAINE

Notre organisme a besoin, pour assurer son fonctionnement, d'**énergie** et de **nutriments**. L'énergie sert à la contraction musculaire (muscles moteurs, cœur, muscles respiratoires, ou encore de l'estomac, de l'intestin, etc). Cette énergie est fournie par la « combustion » fractionnée des nutriments trouvés dans les aliments ; cette combustion est de plus consommatrice de l'oxygène que nous respirons. Les aliments sont en outre nécessaires au renouvellement permanents des constituants de notre organisme (renouvellement et croissance cellulaires), au fonctionnement cellulaire lui-même, à la régulation et au contrôle de ce fonctionnement.

#### 1.1. Les nutriments

Les nutriments sont des substances simples ou complexes qui ont des rôles spécifiques dans le métabolisme du corps humain et dont les utilisations métaboliques sont interdépendantes. Les principaux nutriments sont l'eau, les protides, les lipides, et les glucides. Mais une place importante est à accorder aux minéraux, oligoéléments et vitamines.

##### ■ L'eau

La teneur en eau des tissus est variable (85% dans le sang, 70à75% dans les muscles, 40 à 60% dans les os, 15 à 35% dans les tissus adipeux...). Elle varie selon les tissus comme nous venons de le voir mais aussi en fonction de l'individu, de son âge et de son sexe.

L'eau est nécessaire à la vie :

- elle assure l'équilibre osmotique
- elle assure le transport des substances dissoutes et des déchets du métabolisme
- Elle fournit les ions  $H^+$  et  $OH^-$ , qui ont dans un rôle direct dans les réactions de synthèse et de dégradation (oxydoréduction) et dans l'équilibre du PH.

Le corps perd de l'eau dans ses matières fécales (très peu), sa transpiration, la perspiration par les muqueuses et la respiration, l'urine. Les besoins en eau sont variables selon l'âge, la teneur en sodium de l'alimentation et le niveau calorique de l'alimentation (1ml d'eau pour 1 calorie alimentaire).

L'eau du corps provient :

- de l'eau de constitution des aliments
- de la combustion des aliments dans le corps (eau métabolique ou endogène)
- de l'eau de boisson

##### ■ Les protides

Les protides sont la principale source d'azote en alimentation humaine. L'unité de base des protéines est l'**acide aminé**, composé d'un radical (acide, alcool, aliphatique, amine, aromatique, imine ou soufré) plus ou moins complexe se terminant par deux groupements, l'un acide (COOH), l'autre amine (NH<sub>2</sub>). Les protéines présentent un enchaînement plus ou moins complexe d'acides aminés (chaînes polypeptidiques).

Les protéines ont un rôle très important dans tous les domaines de la vie organique : les enzymes sont des protéines, elles participent aussi au squelette cellulaire (protéines de structure). Elles ont un rôle énergétique très secondaire et il n'y a pas de forme de réserve des protides, contrairement aux lipides et glucides. Les protéines interviennent dans toutes les activités métaboliques (enzymes, transporteurs d'ions et autres substrats...); certaines

assurent la défense immunitaire, d'autres ont un rôle contractile (actine et myosine des muscles)

L'absorption digestive des protides nécessite leur hydrolyse préalable (par des enzymes !) par des protéases car ce sont les acides aminés qui sont utilisés par le métabolisme.

Les protéines sont sans cesse dégradées et re-synthétisées dans l'organisme.

Certains acides aminés sont indispensables dans l'alimentation humaine : L'isoleucine, la leucine, la lysine, la méthionine, la phénylalanine, la thréonine, le tryptophane et la valine. En effet, parmi les vingt acides aminés utilisés par le corps humain, seuls 12 peuvent être synthétisés par l'organisme.

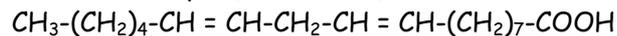
### ■ Les lipides

Les lipides représentent les nutriments qui ont plus fort rendement énergétique. Ils sont néanmoins aussi très importants comme lipides de constitution et précurseurs de métabolites fondamentaux. Ils véhiculent aussi les vitamines liposolubles.

Font partie des lipides : les acides gras, les glycérides, les phospholipides et les stérols.

- Les **acides gras** ont une forme linéaire de formule :  $\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_n-\text{COOH}$  (où  $n=2$  à  $20$ ) ; ils présentent ou non un certain nombre de doubles liaisons (dites insaturées). Ces acides gras insaturés ont des activités fonctionnelles prépondérantes. Dans les AG polyinsaturés, on distingue deux familles :

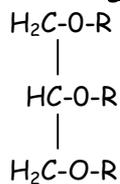
→ Famille des  $\omega 6$  avec l'acide linoléique (C18 - 2  $\omega 6$ ) :



→ Famille des  $\omega 3$  avec l'acide linoléique (C18 - 3  $\omega 3$ ) :



- Les **glycérides** sont des mélanges de triesters d'acides gras et du glycérol :



- Les **phospholipides** comportent du glycérol, de l'acide phosphorique et souvent une base azotée.

- Les **stérols** sont des composés tétracycliques : le cholestérol est caractéristique du règne animal. Les stérols végétaux sont appelés les phytostérols.

Les lipides alimentaires sont essentiellement des triglycérides ; dans l'intestin, ils sont hydrolysés en glycérol et acides gras.

### ■ Les glucides

Les glucides sont des hydrates de carbone. Leur rôle essentiel dans l'alimentation est la fourniture de **glucose** ( $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ ), source d'énergie majeure.

Les glucides existent sous forme de sucres simples (Glucose, Fructose, Galactose) ou plus ou moins polymérisée (saccharose=glucose-fructose, lactose=galactose-glucose, sorbitol, mannitol, maltodextrine, fructo-oligosaccharides, amylose (structure linéaire) et amylopectine (structure ramifiée) = polysaccharides amylicés, cellulose, hémicellulose, pectine=polysaccharides non amylicés ou fibre alimentaires).

**L'amidon** : L'amidon est un glucide complexe de réserve, pour les végétaux supérieurs. L'amidon est une des ressources caloriques principales pour l'espèce humaine, car il est le constituant principal des céréales (riz, maïs, blé, sorgho...) et de la pomme de terre.

Pour le végétal, l'amidon est une réserve d'énergie et de nutriment, nécessaire pour survivre à la mauvaise saison (sèche ou froide). Il permet de stocker des nutriments glucidiques dans les cellules, sans les dissoudre dans l'eau. En effet la présence de glucides simples augmente le potentiel osmotique interne des cellules ce qui nécessite une grande quantité d'eau. L'amidon est une forme de réserve de glucides qui permet d'économiser l'eau. Dans les cellules, il se présente sous forme de grains visibles au microscope : les amyloplastés. Chez les plantes de la famille des Astéracées (anciennement, les Composées) la molécule de réserve n'est pas l'amidon, mais l'inuline et chez les animaux, c'est le glycogène.

L'amidon est un polysaccharide (ou polyside) de formule chimique  $(C_6H_{10}O_5)_n$ . Il est composé de molécules de glucose liées par liaisons  $\alpha$  (1-4), en général caractéristique des polysides de réserve (exception: inuline). Il est composé de deux fractions polysaccharidiques :

- l'amylose (constitue environ 25% de l'amidon), molécule formée de 600 à 1000 molécules de glucose en chaînes linéaires. L'amylose est synthétisée par l'amidon synthase insoluble.
- l'amylopectine (constitue environ 75% de l'amidon), molécule ramifiée tous les 25 résidus glucoses environ (liaison  $\alpha$  1-6). La chaîne totale peut faire entre 10 000 et 100 000 résidus glucoses. L'amylopectine est synthétisée par l'amidon synthase soluble.

Le grain d'amidon se présente sous forme de granules semi-cristallins : l'amylopectine est organisée en feuillets, l'amylose forme une zone amorphe moins bien organisée entre les différents feuillets.

L'amylose s'organise en une hélice droite à six glucoses par tour. Il se dissocie en glucose assimilable sous l'action d'enzymes, les amylases, d'autant plus facilement s'il se trouve sous forme d'amylopectine. En effet, la formation hélicoïdale ne favorise pas l'accessibilité de l'amidon aux enzymes.

Dans son état naturel, l'amidon n'absorbe quasiment pas d'eau. La structure cristalline de l'amidon ne peut être détruite que sous l'action de la chaleur, permettant ainsi aux molécules d'absorber l'eau. Ce procédé porte le nom de **gélatinisation**.

L'amidon est insoluble dans l'eau froide. En le traitant par l'eau chaude, on obtient l'**empois**. Il est exploité dans l'industrie pour ses propriétés d'épaississant et de gélifiant.

Soumis à un chauffage en excès d'eau, la structure de l'amidon se modifie. Les grains d'amidons en s'hydratant progressivement gonflent et une fraction d'amylopectine passe en solution, puis ultérieurement si le chauffage se prolonge une fraction d'amylose passe elle aussi en solution.

Le résultat se traduit donc par une viscosité plus ou moins importante de la suspension. L'amidon, gélatinisé au sein du pain durant la cuisson, participe à sa structure finale. Le rassissement, au cours de la conversation est attribué depuis longtemps à la **rétrogradation** (ou **gélification**) de l'amylopectine.

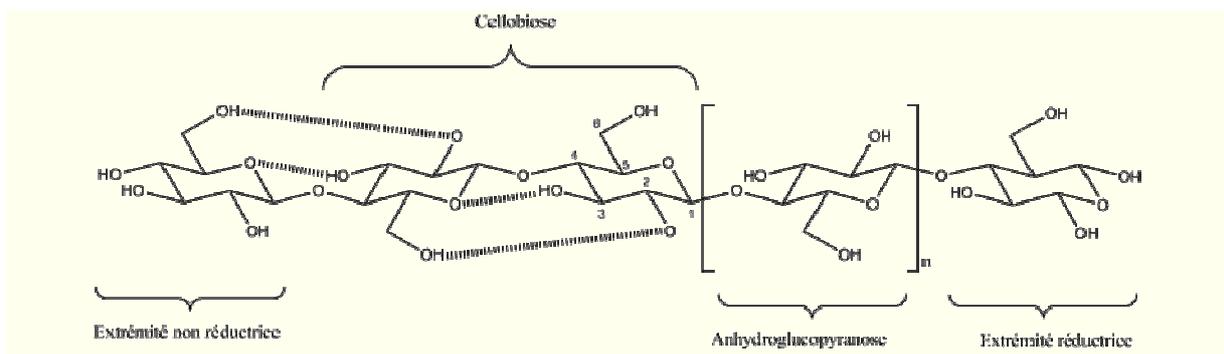
Plus la proportion d'amylose est faible, plus la gélatinisation est importante et inversement.

Le **rassissement** des produits de panification et de biscuiterie, qui ne doit pas être confondu avec le dessèchement, se traduit par leur raffermissement, leur tendance à l'émiettement et la disparition de leurs saveurs.

L'amidon et ses constituants (l'amylose et l'amylopectine) sont les molécules responsables du rassissement. À la suite de la cuisson, les grains d'amidon sont profondément transformés et

l'organisation cristalline initiale est largement dégradée. Ensuite au cours du refroidissement et de la conservation, le rassissement est produit par la recristallisation (gélification) de l'amylose et de l'amylopectine. Une étude effectuée au centre INRA de Nantes décrit les transformations subies par l'amidon au cours de la fabrication et de la conservation du pain de mie jusqu'à 180 jours. Dans ce cas où la présence de lipides inhibe la recristallisation de l'amylose, la rapide gélification de l'amylopectine au cours du ressuage est expliquée par la persistance après cuisson de petits cristallites résiduels, vestiges de la structure de l'amidon natif. Au cours de la conservation, le dessèchement, le raffermissement du pain et la rétrogradation de l'amidon sont concomitants et interviennent principalement dans les deux premiers mois suivant la cuisson. L'utilisation de lipides en tant qu'agents antirassissants et l'adjonction d'enzymes sous réserve d'acceptation par la législation pourraient limiter le rassissement des produits industriels de panification et de biscuiterie. Enfin la production par génie génétique de blés riches en amylopectine est une autre voie de recherche à considérer à plus long terme.

**La cellulose :** Les monomères de glucose sont liés entre eux par des liaisons bêta 1-4, conduisant à des polymères linéaires. Ces polymères s'associent entre eux par des liaisons intermoléculaires de type liaisons hydrogène, conférant ainsi une structure fibrillaire à la cellulose.



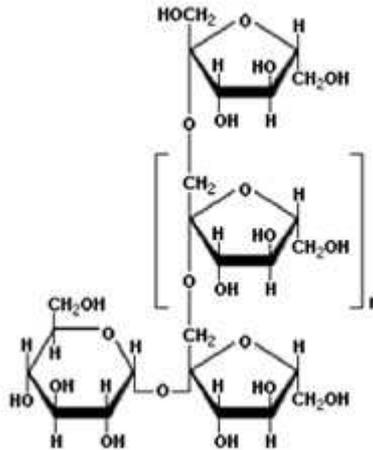
La structure de la cellulose a une grande influence sur le comportement chimique et les propriétés macroscopiques de celle-ci.

La cellulose est un homopolymère linéaire composé de très nombreuses unités de D-Anhydroglucopyranose (AGU) reliées entre elles par des liaisons glycosidiques  $\beta$ -1,4. Le motif de répétition est le dimère cellobiose. Les AGU se trouvent en conformation chaise et possèdent 3 fonctions hydroxyles : 2 alcools secondaires (en position 2 et 3) et un alcool primaire (en position 6). Ces fonctions hydroxyles, ainsi que les liaisons glycosidiques, se situent en position équatoriale par rapport au plan du cycle ce qui entraîne donc que les hydrogènes du cycle se trouvent en position axiale.

Le degré de polymérisation diffère énormément selon l'origine de la cellulose; sa valeur peut varier de quelques centaines à quelques dizaines de milliers.

La molécule est étirée, car les liaisons sont équatoriales, et permettent donc une extension maximale. L'agencement se fait ensuite en micro-fibrilles (environ 1500 molécules par fibre). Elle n'est pas digérée par l'homme, mais est cependant utile au bon fonctionnement des intestins sous forme de fibres végétales. Les animaux herbivores utilisent en général des enzymes d'origine exogène, c'est-à-dire produites par certaines bactéries de la flore intestinale pour digérer la cellulose.

**L'inuline :** L'inuline est un fructane, un polysaccharide d'origine végétale, composé de molécules de fructose liées entre elles par des ponts  $\beta$  (2-1) et terminé par un glucose.



L'inuline n'est pas digestible par les enzymes de l'intestin humain et est considérée comme une fibre alimentaire soluble. L'inuline atteint le colon où elle est utilisée par la flore microbienne. L'inuline est un **prébiotique** (\*), c'est à dire qu'elle représente une source de nourriture pour les bonnes bactéries intestinales. Les chercheurs mettent beaucoup d'espoir dans les prébiotiques qui amélioreraient la qualité de la flore intestinale et favoriseraient la santé de l'intestin, notamment en stimulant la croissance de bonnes bactéries comme les bifidobactéries. Les prébiotiques pourraient également faire baisser le taux de cholestérol et de sucres dans le sang. Il semble aussi qu'ils pourraient améliorer l'absorption du calcium d'où l'intérêt d'en ajouter dans les produits laitiers. Une des explications plausibles à ce phénomène réside dans la formation d'acides gras à chaîne courte au cours de la fermentation de l'inuline par la flore intestinale. La baisse du pH luminal qui en résulte favorise l'ionisation du calcium qui est absorbé plus facilement par diffusion passive. Etant donné que l'inuline est couramment utilisée dans les produits laitiers, cette action potentialisatrice de l'absorption du calcium est un aspect intéressant à suivre dans la lutte contre l'ostéoporose.

Ce polymère de fructose est particulièrement abondant dans la racine de chicorée dont il est extrait industriellement. On le trouve aussi dans d'autres végétaux appartenant à la famille des Astéracées tels que les topinambours (ou Artichauts de Jerusalem), les artichauts, les salsifis ou à la famille des Liliacées tels l'ail, les oignons, les poireaux et les asperges, la ou encore la banane et le soja (famille des Fabacées). En fin de saison, lors des premières gelées, l'inuline subit une hydrolyse, ce qui entraîne une baisse de son rendement.

- l'artichaut (contient de 2 % à 6 % d'inuline) ;
- l'asperge (contient de 2 % à 3 % d'inuline) ;
- la banane (contient de 0,3 % à 0,7 % d'inuline) ;
- l'ail (contient de 9 % à 16 % d'inuline) ;
- le poireau (contient de 3 % à 10 % d'inuline) ;
- l'oignon (contient de 2 % à 6 % d'inuline).
- La chicorée contient 15 à 20 % d'inuline et entre 5 et 10 % d'oligofructose.

L'inuline et l'oligofructose diffèrent par leur degré de polymérisation, ce qui conditionne des fonctionnalités différentes. Les polymères contenant moins de dix unités de fructose sont nommés fructooligosaccharides (F.O.S), ils sont utilisés comme agents sucrants. Les polymères comprenant plus de dix unités de fructose n'ont pas de pouvoir sucrant mais sont utilisés pour améliorer la texture des aliments ou en remplacement des matières grasses. En effet, L'inuline est moins soluble dans l'eau froide que l'oligofructose et a donc tendance à

former un gel en milieu aqueux. Ce gel forme un réseau tridimensionnel de fines particules insolubles, qui reproduisent en bouche l'onctuosité de la graisse. L'oligofructose a des propriétés comparables au saccharose, tout en étant moins "sucré" et moins énergétique, d'où son utilisation dans les aliments en tant que substitut du saccharose.

(\*) Contrairement au probiotique, qui contient des micro-organismes vivants, un prébiotique est un ingrédient alimentaire (principalement des oligosaccharides) qui a la propriété de stimuler la croissance sélective de bactéries non pathogènes, et d'influencer favorablement la santé de l'hôte.

Le **glycogène** est la forme de réserve des glucides dans les organismes animaux ; il a la même structure que l'amylopectine.

L'**insuline** est produite par le pancréas pour permettre l'utilisation du sucre ingéré ou issu du métabolisme des aliments. Elle permet la régulation de la glycémie, en orientant le sucre excédentaire vers les cellules graisseuses (stockage irréversible en triglycérides). Sa production est directement corrélée à l'absorption de sucre.

D'autres hormones interviennent dans le métabolisme glucidique (cortisol, hormone de croissance, glucagon, adrénaline) mais l'insuline est la seule dont l'action soit hypoglycémisante.

#### ■ Les fibres

Les fibres sont des constituants végétaux de nature polysaccharidique qui ne sont pas hydrolysés par les enzymes digestives. Cette résistance à la digestion additionnée d'une aptitude au gonflement à l'eau (rétention de l'eau du contenu intestinal) ont des conséquences (bénéfiques) sur le transit intestinal. On inclut généralement dans les fibres des produits non glucidiques qui résistent également à la digestion enzymatique (tannins, cutines, lignine...)

Les fibres sont les polysaccharides des parois des cellules végétales (cellulose, hémicellulose, pectine) ou des polysaccharides cytoplasmiques (gommes et mucilage, amidons résistants).

Comme l'amidon, la **cellulose** est un homopolymère de glucose mais dans ce dernier cas, c'est l'anomère  $\beta$  du glucose qui est impliqué dans une liaison glycosidique entre les carbones 1 et 4 d'unités adjacentes. Ce type d'association conduit à un polymère linéaire dont 4 différentes chaînes (une trentaine) peuvent s'associer pour donner des microfibrilles de cellulose à l'état cristallin qui vont jouer un rôle structurant dans la paroi végétale.

Les **hémicelluloses** sont formées d'une chaîne principale d'oses (pentoses, hexoses) et de chaînes latérales osidiques. Les pentosanes (ou arabinoxylanes) sont des hémicelluloses composés de xyloses et de D-arabinoses. En boulangerie, les pentosanes solubles jouent un rôle dans l'absorption d'eau et la consistance de la pâte ( $\nearrow$  viscosité,  $\searrow$  extensibilité) et Les pentosanes insolubles retardent le rassissement du pain.

Les pectines sont des polysaccharides complexes, polymères de l'acide galacturonique avec des chaînes latérales faites de galactose et d'arabinose.

#### ■ Les minéraux

- Le sodium (Na) est le principal cation extracellulaire et joue un rôle dans la pression osmotique du plasma

- Le potassium (K) est le principal cation intracellulaire et intervient dans le métabolisme cellulaire et l'excitabilité neuromusculaire.

- Le calcium (Ca) est le cation majoritaire du tissu osseux et joue aussi un rôle majeur dans l'excitation des cellules musculaires et nerveuses, la perméabilité membranaire, la coagulation sanguine et certaines régulations hormonales. L'adsorption du Ca est diminuée en présence notamment de phytates.

Le phosphore (P) exerce plusieurs fonctions indispensables à la vie, notamment dans la composition des acides nucléiques, des phospholipides membranaires et le stockage et la libération d'énergie ou encore l'activation des enzymes.

Le magnésium (Mg) est stocké dans les os, combinée aux phosphates et bicarbonates. Après le potassium, le magnésium est le cation intracellulaire prédominant. Le magnésium participe au transfert d'énergie géré par les mitochondries.

Le Fer (Fe) a deux rôles majeurs : le transport d'oxygène (par la molécule d'hémoglobine) et le transfert d'électrons ( $Fe^{2+} \rightleftharpoons Fe^{3+} + e^-$ )

#### ■ Les oligoéléments

Ce sont des nutriments sans valeur énergétique mais dont la présence, à l'état de trace, est essentielle au métabolisme. Il s'agit du chrome, du cobalt, du cuivre, du fluor, de l'iode, du molybdène, du manganèse, du sélénium et du zinc.

#### ■ Les vitamines

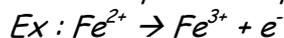
Les vitamines sont des substances indispensables à la vie et apportées par l'alimentation. Citons les principales, parmi les liposolubles, les vit. A, E, D et K, et parmi les hydrosolubles, les vit. B1, B2, B5, B6, B8, B9, B12, PP et C.

### 1.2. Le métabolisme énergétique

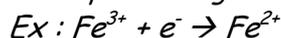
#### a) L'oxydo-réduction

La seule forme d'énergie utilisable par notre organisme est l'énergie d'oxydo-réduction contenue dans les atomes d'hydrogène (atome à 1 électron).

*Rappel : L'oxydation représente une fixation d'oxygène ou un déplacement d'hydrogène ; elle correspond à une perte d'électron (accroissement du nombre d'oxydation).*



*La réduction représente une perte d'oxygène ou une fixation d'hydrogène ; elle correspond à un gain d'électron (diminution du nombre d'oxydation).*



*Autrement dit, une molécule qui perd des électrons est oxydée et réciproquement, une molécule est réduite quand elle accepte des électrons.*

*Les réactions de réduction et d'oxydation sont couplées car toute oxydation (perte d'électrons) coïncide avec une réduction ; on parle donc de réactions d'oxydo-réduction.*

Les aliments fournissent en permanence des nutriments mis en réserve par les cellules et fournisseurs d'atomes d'hydrogène. La mitochondrie, grâce à son équipement enzymatique, est une véritable « centrale énergétique » : elle contient des molécules capables d'arracher les électrons des atomes d'hydrogène (oxydation) pour les transférer sur des atomes d'oxygène (réduction). La synthèse des liaisons phosphates de l'ATP, riches en énergie, a lieu pendant ces réactions d'oxydo-réduction.

#### b) Le transport des électrons

Dans les mitochondries, les deshydrogénases (enzymes) s'associent à une molécule, un coenzyme (généralement le  $NAD^+$ , Nicotinamide adénine dinucléotide, pour arracher une paire d'électrons (=énergie) aux atomes d'hydrogène. Tandis que le substrat (nutriment) s'oxyde et perd deux atomes d'hydrogène et donc deux électrons associés, le  $NAD^+$  gagne un hydrogène et deux électrons et se retrouve réduit en  $NADH$ . L'autre

atome d'hydrogène, privé de son électron, se retrouve sous sa forme ionique  $H^+$  dans le liquide intracellulaire.

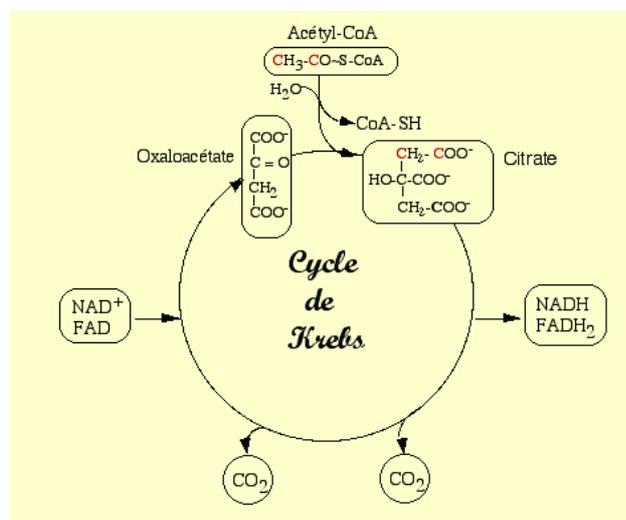
Un autre coenzyme, le **FAD**, Flavine Adénine dinucléotide, capte lui aussi des électrons en acceptant quant à lui deux atomes d'hydrogène. Il se retrouve réduit en **FADH<sub>2</sub>**.

La réduction de ces coenzymes (NAD<sup>+</sup> et FAD) est le résultat d'une série de réactions biochimiques qui s'effectue dans la mitochondrie, en aérobose (présence d'oxygène). de manière cyclique, à la suite de la glycolyse anaérobie (qui n'utilise pas d'oxygène) : le dernier métabolite de ce cycle, l'acide oxaloacétique, est aussi impliqué dans la première réaction. Ce cycle est appelé le cycle de Krebs (mis en évidence en 1937 par le biochimiste anglais du même nom) ou encore cycle des acides tricarboxyliques ou encore cycle de l'acide citrique. Son second nom de cycle des acides tricarboxyliques vient de ce que deux des premiers substrats de cette chaîne, le citrate et l'isocitrate sont des acides portant trois groupements COOH.

### c) Le cycle de Krebs

Le cycle de Krebs produit du carbone totalement oxydé (sous forme de CO<sub>2</sub>) mais surtout des coenzymes réduits (NADH + H<sup>+</sup> et FADH<sub>2</sub>) qui seront réoxydés au niveau de la chaîne respiratoire dont les enzymes se situent dans l'épaisseur de la membrane interne mitochondriale :  $NADH + H^+ + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O + NAD^+ + \text{énergie}$ . Cette énergie, dite Redox, est utilisée pour une réaction d'oxydation phosphorylante, ou **phosphorylation oxydative**, (liaisons phosphore fortement énergétiques) aboutissant à la formation de la molécule d'**ATP** (Adénosine triphosphate = composé phosphaté) à partir de l'ADP (Adénosine diphosphate).

Il est le point final et commun du catabolisme des glucides (glycolyse, voie des pentoses phosphates), lipides (hélice de Lypen) et acides aminés car tous ces catabolismes aboutissent à la formation d'**acétyl-coenzyme A**. L'acétyl-coenzyme A est une forme de transport des groupements acétyls qui proviennent du pyruvate. La première étape du cycle consiste à transférer ce groupement acétyl sur l'oxaloacétate pour former du citrate. Le reste du cycle consiste en des transformations catalysées. La dernière étape produit de l'oxaloacétate, qui pourra alors de nouveau recevoir un acétyl et recommencer le cycle. Il existe toutefois des réactions d'échappement au cycle de Krebs qui permettent d'utiliser certains intermédiaires pour d'autres fonctions cellulaires.



Ce qu'il faut retenir :

- 1) *Catabolisme des nutriments (Glucides, lipides, protides) => production d'acétyl-coenzyme A (1<sup>er</sup> substrat utilisé dans la phase suivante) - Anaérobiose*
- 2) *Cycle de Krebs => Réduction des coenzymes NAD<sup>+</sup> et FAD en NADH et FADH<sub>2</sub>, transporteurs d'électrons, et production de gaz carbonique. Le NADH et le FADH<sub>2</sub> sont des molécules riches en énergie car elles transportent des électrons qui ont un potentiel de transfert d'énergie élevé - Aérobiose*
- 3) *Chaîne respiratoire => Oxydation des coenzymes NADH et FADH<sub>2</sub> et production d'ATP (=énergie), de CO<sub>2</sub> et D'H<sub>2</sub>O - Aérobiose*

### 1.3. Les sources d'aliments

Les aliments disponibles pour satisfaire les besoins alimentaires de l'Homme sont les viandes, poissons et œufs, les produits laitiers, les corps gras, les céréales et légumineuses, les fruits et légumes, les produits sucrés et les boissons.

EAU : Une alimentation quotidienne variée (avec des légumes verts et des fruits notamment apporte environ 1200g d'eau.

#### PROTEINES :

- Les protéines peuvent être d'origine animale ou végétale.
  - des protéines simples comme l'albumine, les globulines, prolamines et glutélines sont présentes par exemple dans les œufs (albumines) et les céréales.
  - Les légumineuses sont des légumes riches en protéines.
  - Les protéines peuvent aussi être associées dans certains aliments à d'autres molécules comme des glucides, les lipides ou encore des métaux (Fe, Cu, Mo...). La caséine (protéine du lait) par exemple est une phosphoprotéine ; le blanc d'œuf est une ovalbumine, une phosphoglycoprotéine et le jaune d'œuf, associe quant à lui des protéines et lipoprotéines riches en phospholipides.
  - Tous les acides aminés sont présents dans les aliments contenant des protéines, qu'ils soient d'origine animale ou végétale, cependant ils ne le sont pas dans les proportions optimales nécessaires au métabolisme, certains acides aminés étant limités selon le régime. L'intérêt de faire des associations du genre "céréale-légumineuse" dans une alimentation tient au fait que les céréales sont L-M+ (lysine = AA limitant, M+ suffisant en Méthionine) alors que les légumineuses sont L+M- (Méthionine = AA limitant) .
- types de graine limitantes en lysine et suffisante en méthionine (L-M+)
- les céréales/graminées cultivées (maïs, riz, blé, orge, avoine, seigle, millet, engrain)
  - une autre graminée, le sorgho
  - une polygonacée, le sarrasin
- types de graine suffisantes en lysine et limitante en méthionine (L+M-)
- les légumineuses ou fabacées (pois, pois chiche, haricot, haricot mungo, soja, lentille, fève)
  - la graine d'amarante

### LIPIDES :

Les lipides de constitution des aliments sont très différents, qualitativement et quantitativement selon les aliments (viandes, œuf, poissons, lait..., graines, noix...). Les fruits et légumes ne contiennent pratiquement pas de lipides, sauf l'olive et l'avocat.

### GLUCIDES :

Les sources animales apportent peu de glucides. Ce sont les végétaux qui apportent l'essentiel des glucides alimentaires.

Betterave et canne à sucre → le saccharose (le sucre)

Fruits, miel, sirop d'érable, certains légumes → fructose

Raisin, miel et certains légumes → glucose

Les graines de céréales (maïs, froment...) et des légumineuses, les racines, tubercules et rhizomes (pomme de terre, patate douce, manioc, etc.), la châtaigne et la banane → amidon

Les sucres qui causent des gaz sont principalement le raffinose, le lactose, le fructose et le sorbitol. Les légumineuses contiennent une quantité importante de raffinose. On le retrouve aussi dans les légumes de la famille des choux, les asperges et les céréales à grains entiers. Le lactose, contenu dans le lait de vache et ses produits, peut augmenter les gaz, mais pour certaines personnes, il s'agit d'une véritable intolérance. Les autres sucres responsables de flatulences sont le fructose et le sorbitol. On les retrouve naturellement dans certains fruits et dans certains légumes. Mais ces sucres sont aussi utilisés, sous forme artificielle, dans les boissons gazeuses ou à base de fruits, ou comme succédané du sucre dans les aliments dits «diététiques» et les gommages à mâcher sans sucre.

L'amidon est une autre substance qui peut échapper partiellement à la digestion de l'estomac et de l'intestin grêle et causer des gaz intestinaux. L'amidon contenu dans le riz semble le seul à être bien absorbé par l'estomac, ce qui en fait le féculent le moins susceptible de causer des gaz.

Comme nous l'avons vu plus haut, le grain d'amidon est constitué de deux types de composants moléculaires : l'amylose et l'amylopectine. Ils peuvent être associés à des lipides, des protéines, des fibres et des micronutriments (vitamines, sels minéraux ...).

C'est essentiellement la proportion d'amylose par rapport à l'amylopectine qui détermine la nature physico-chimique des aliments amylicés et leurs effets nutritionnels sur l'organisme humain.

Ce rapport amylose / amylopectine peut-être très différent d'une famille botanique à l'autre mais aussi d'une variété à l'autre à l'intérieur d'une même famille.

Les amidons de céréales contiennent en général, entre 15 et 28% d'amylose. Mais certaines variétés de maïs en contiennent moins de 1% (maïs creux dont les extraits sont utilisés dans l'industrie alimentaire comme épaississants).

D'autres variétés de maïs en revanche en contiennent de 55 à 80% mais ils sont peu cultivés, car plus le taux d'amylose est élevé, plus le rendement est bas.

Les amidons des tubercules (appelés encore féculés), ce qui est le cas de la pomme de terre, ont une teneur en amylose beaucoup plus faible (de 17% à 22%).

Quant aux amidons de légumineuses (lentilles, haricots secs, pois chiches ...), ils sont au contraire beaucoup plus chargés en amylose (de 33 à 66%).

### FIBRES :

Les fruits et les légumes contiennent de la cellulose et des pectines, les féculents et les céréales des hémicelluloses et les sons de blé et d'avoine sont riches en lignine.

Les fibres alimentaires ne sont pas digérées au niveau de l'estomac et l'intestin grêle et produisent des gaz pendant leur fermentation par les bactéries du gros intestin. Les fibres solubles forment une substance gélatineuse qui contribue à améliorer la consistance des selles. D'autres fibres, les fibres insolubles, absorbent l'eau et augmentent le volume des selles. Les fibres améliorent donc le transit intestinal.

#### 1.4. Les besoins alimentaires

--> voir tableaux p12-13 et 18-19 des « Tables de composition des aliments »

## 2. LE BLE

Le blé est une monocotylédone qui appartient au genre *Triticum*, de la famille des Poacées (anciennement graminées). C'est une céréale.

### 2.1. Le blé parmi les céréales

Une céréale est une plante cultivée principalement pour ses graines utilisées dans l'alimentation de l'Homme et des animaux domestiques, souvent moulues sous forme de farine.

Actuellement, les céréales fournissent la majeure partie (45%) des calories alimentaires de l'humanité.

Sur le plan botanique, la majorité des céréales appartient à la famille des Poacées (blétendre, blé dur, épeautre, engrain, orge, avoine, seigle, triticales, riz, maïs, sorgho, millet), mais certaines graines d'autres familles botaniques sont considérées comme des céréales : le sarrasin ou blé noir (Polygonacées), le quinoa, l'amarante (Chénopodiacées) et le sésame (Pédaliacées).

Leur nom vient du latin *cerealis*, qui fait référence à Cérès, déesse romaine des moissons.

Nous nous intéresserons, dans ce cours, aux Poacées et plus particulièrement aux blés.

### 2.2. Le blé dur et le blé tendre

Les deux espèces de blé actuellement cultivées sont le blé tendre (*Triticum aestivum*) et le blé dur (*Triticum durum*). Les blés (genre *Triticum*) se différencient par leur degré de ploïdie (nombre de jeux de chromosomes). Le blé tendre possède ainsi trois génomes diploïdes composés chacun de 7 paires de chromosomes dits homéologues, soit 42 chromosomes ; il est hexaploïde et sa formule génomique est AA BB DD. Le blé dur est quant à lui tétraploïde et ne contient que les génomes A et B ; sa formule génomique est AA BB et il possède donc 28 chromosomes.

#### 2.2.1. L'histoire des blés

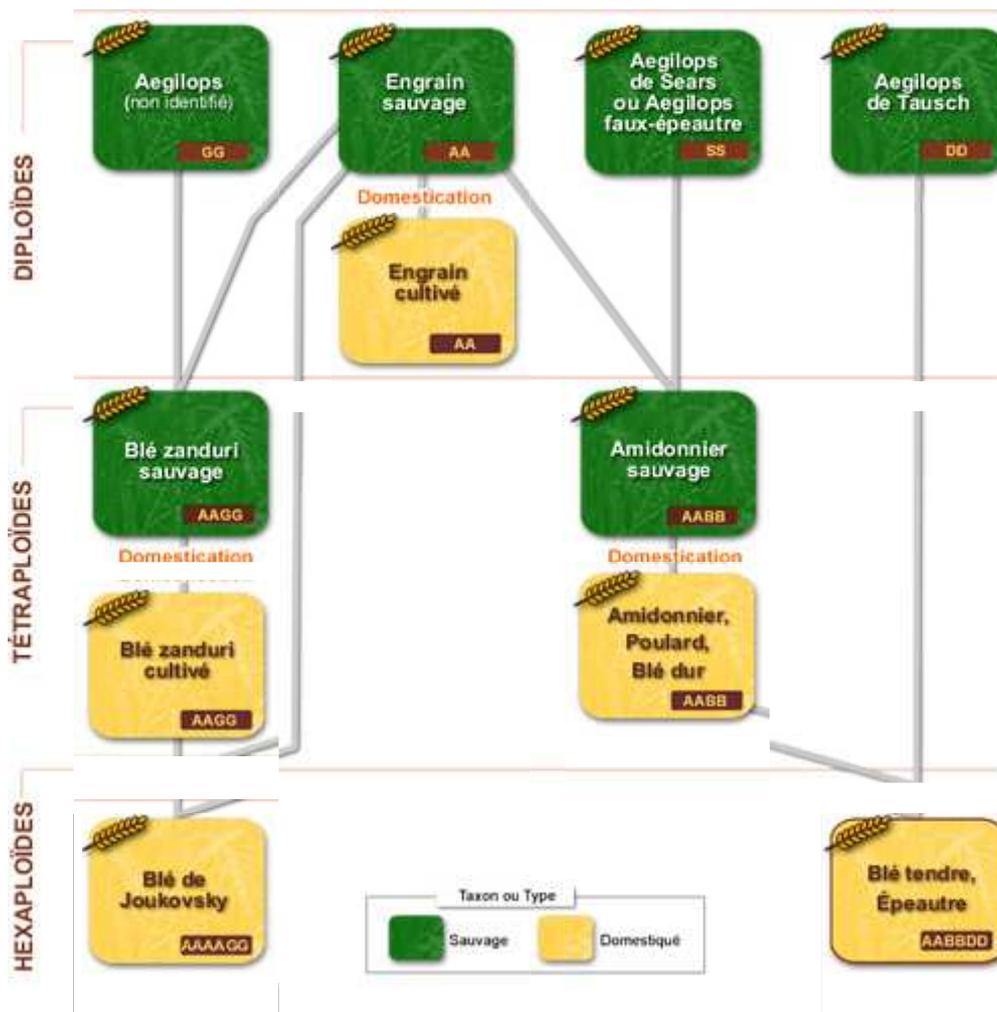
L'histoire des blés n'est pas encore totalement éclaircie ; leur filiation est en effet très complexe et incomplètement élucidée ; elle met en jeu un certain nombre d'hybridations interspécifiques naturelles qui ont la particularité d'être additionnelles : les génomes se sont additionnés dans leur globalité, augmentant le niveau de ploïdie des nouvelles espèces générées par ces croisements.

Il est ainsi acquis que le **génom**e A provient de *T. monococcum* (AA). Le **génom**e B quant à lui proviendrait d'un égilope (mauvaise herbe à rachis fragile), *Aegilops bicornis* ou

*speltoïdes*, *longissima* ou encore *searsii* (BB). Le **génom**e D proviendrait d'un autre égilope, *Aegilops squarrosa* (dénommé aussi *Triticum tauschii*) (DD).

Le croisement naturel *T. monococcum* - AA X Egilope - BB a permis l'apparition d'un blé dur sauvage (*T. turgidum dicoccoïdes*), de type AA BB qui a ensuite progressivement évolué vers nos blés dur actuels de *T. turgidum dicoccum* à *T. turgidum durum* (communément appelé *T. durum*). Nos blés tendres actuels, à rachis solides, seraient issus d'un autre croisement naturel *T. turgidum dicoccum* X Egilope porteur du génome D.

Les blés cultivés sont apparus il y a environ 10 000 ans, dans le Croissant Fertile, zone qui s'étale entre la partie orientale des côtes méditerranéenne et le golfe persique.



### 2.2.2. Composition histologique et chimique du grain de blé

Le grain de blé est en réalité un fruit, dans lequel les téguments de la graine et le péricarpe du fruit sont intimement liés. C'est un fruit dit sec et indéhiscent, appelé caryopse.

Ce fruit est appelé « grain » dans le langage courant. On parle effectivement de grains de blé. A noter que dans certains cas, les glumes, bractées qui enveloppent la fleur nue (sans pétales, ni sépales) des graminées, restent adhérentes au grain ou caryopse. On parle alors de céréales à grain « vêtu », p. ex. le blé amidonnier (*Triticum turgidum dicoccum*)

ou l'épeautre (*Triticum aestivum spelta*). Dans les autres cas, les glumes sont éliminées au battage et constituent la « balle », on parle alors de grains nus, bien plus faciles à préparer, car on peut les mouliner sans décorticage préalable.

La présence d'un sillon profond sur toute la longueur du grain de blé détermine les opérations d'extraction de la farine (séparations de l'albumen des enveloppes). La simple abrasion n'est pas possible (comme pour le riz). L'extraction de la farine nécessite de fragmenter le grain puis d'isoler progressivement l'albumen à partir des zones les plus internes du grain, du centre vers la périphérie.

Le taux d'humidité du grain à la récolte est d'environ 14 à 15 % du poids du grain

### Composition histologique

Le grain de blé est formé de trois parties :

- **l'albumen** (ou endosperme) constitué de l'albumen amylicé et de la couche à aleurone → 80 à 85 % du grain.

L'albumen (albumen amylicé) du grain est remplie de granules d'amidon dispersés dans une matrice protéique.

L'aleurone est une protéine présente sous formes de grains dans l'endosperme du grain. Elle forme l'assise externe du tégument de certaines graines. Lors de la germination, l'hydrolyse de la graine provoque la désintégration des grains d'aleurone en acides aminés. Stimulée par les hormones produites par l'embryon, l'aleurone synthétise des enzymes qui permettent la dissociation de l'amidon de l'endosperme en sucres nécessaires à la croissance des racines et de la gemme.

- **Les enveloppes** de la graine et du fruit, formés de 6 tissus différents : épicarpe + mésocarpe + cellules croisées + cellules tubulaires, (= péricarpe), tégument séminal + épiderme (téguments de la graine) → 13 à 17 % du grain
- **Le germe** → 3% du grain. Il comprend :
  - l'embryon qui comprend les ébauches des feuilles, bourgeons et racines
  - le scutellum qui renferme des protéines, des matières grasses, des vitamines (B1) et une faible quantité d'amidon. Lors de la germination, il cède ses ressources à l'embryon qui se développe. Il devient ensuite un organe de digestion servant à transférer les matières nutritives de l'albumen vers la jeune plantule.

### Composition chimique

Le grain de blé est principalement composé (teneur en %MS) :

- d'amidon → 70% environ,
- de protéines → 10 à 15%,
- et de pentosanes → 8 à 10 %.

Les autres constituants sont :

- les lipides (2 à 3 %),
- la cellulose (2 à 4 %),
- les sucres libres (2 à 3%),
- les minéraux (1,5 à 2,5%)
- et les vitamines.

Ces constituants se répartissent de manière inégale au sein des différentes fractions histologiques du grain décrites précédemment :

- Enveloppes = cellulose + matières minérales + oligoéléments
- assise protéique = protéines + lipides + matières minérales + vitamines + oligoéléments
- albumen amylicé ou albumen = amidon + sucres simples + protéines (gluten) + lipides + matières grasses + vitamines

- germe = protéines + lipides + matières minérales + vitamines

Les céréales ainsi que les légumineuses contiennent de l'acide phytique situé dans l'ensemble du grain mais plus principalement dans leur enveloppe (péricarpe). Cet acide s'associe à certains minéraux présents dans l'intestin pour former des phytates insolubles. Il empêche l'assimilation des minéraux dans notre organisme (l'on parle de déminéralisation). Heureusement, sous l'action de la phytase (une enzyme de la farine, active grâce à l'acidité du levain), l'acide phytique est détruit. Plus le taux d'extraction d'une farine est élevé, plus sa teneur en acide phytique est importante.

### 2.2.3. Les autres céréales

- L'**Epeautre** ou Grand épeautre, est un blé appartenant à une sous-espèce du blé tendre. Il est souvent rangé dans les blés à grains vêtus, mais lors du battage, ce sont en fait les épillets entiers, avec leurs glumes et glumelles, ainsi qu'un segment du rachis, qui sont obtenus. Au contraire des autres blés vêtus diploïdes et tétraploïdes, c'est le segment situé au-dessus de l'insertion de l'épillet qui reste adhérent, et non celui situé au-dessous.

L'épeautre est longtemps resté préféré dans certaines régions européennes pour son goût, mais il demande une opération de plus que le blé tendre, le décorticage. Avec la disparition au XIXe siècle des moulins artisanaux qui détenaient ce savoir-faire, l'épeautre a pratiquement disparu. Le gruau d'épeautre a dû également reculer devant la semoule de blé dur. De nos jours, il fait partie des céréales recherchées par les tenants de l'agriculture biologique et d'une alimentation diététique, et connaît un regain d'intérêt.

→ *Triticum aestivum spelta* - blé hexaploïde ( $2n = 3 \times 2 \times 7 = 42$ ), génome AABBDD

- Le **seigle** est cultivé comme céréale ou comme fourrage. C'est une céréale rustique adaptée aux terres pauvres et froides. Sa culture est de nos jours marginale. La farine de seigle est recherchée pour la fabrication de pain, notamment pour sa valeur diététique (richesse en pentosanes). Le seigle contient peu de gluten et les qualités de celui-ci sont de surcroît peu favorables à la constitution d'un réseau suffisamment tenace ; en panification, il est donc nécessaire de le coupler avec de la farine de blé tendre panifiable. La farine, dite de méteil, est issue de la mouture conjointe de blé et de seigle cultivés simultanément et à proportions égales ; par extension, un pain de méteil et un pain fabriqué à partir de farines de seigle et de blé à proportions égales (50%).

→ *Secale céréale* - espèce diploïde ( $2n = 2 \times 7 = 14$ ), génome RR

- Le **triticale** est un hybride artificiel entre le blé et le seigle. Il offre l'avantage de combiner le potentiel de rendement du blé et la rusticité du seigle. Sa farine moins riche en gluten que celle du blé n'est pas panifiable, tout comme le seigle. Son utilisation est avant tout en alimentation animale.

→ *XTriticosecale* - son niveau de ploïdie dépend de l'espèce de blé utilisé.

- L'**avoine** est cultivée comme céréale (flocons d'avoine) ou fourrage. Elle est composée d'une fibre très particulière appelée bêta-glucane, qui régule la glycémie et aussi le taux de cholestérol sanguin.

→ *Avena sativa* - espèce hexaploïde ( $2n = 6 \times 7 = 42$ ), génome AACDD (origines évidemment différentes de celles du blé)

- L'**orge** est la plus ancienne céréale cultivée. En alimentation animale, étant pauvre en protéines, elle demande à être complétée. En alimentation humaine, son utilisation est essentiellement brassicole. L'orge germée et grillée donne le malt. Comme l'avoine, l'orge apporte des fibres alimentaires du type bêta-glucane qui lui confèrent des propriétés nutritionnelles particulières. Il existe aussi des orges waxy (100% amylopectine) → cf. chapitre sur l'index glycémique.  
→ *Hordeum vulgare* - Espèce diploïde ( $2n = 2 \times 7 = 14$ )
  
- Le **riz** est un élément fondamental de l'alimentation de nombreuses populations du monde, notamment en Asie et en Afrique. C'est la première céréale mondiale pour l'alimentation humaine, la deuxième après le maïs pour le tonnage récolté. On le cultive en Asie mais aussi en Europe : en Italie (plaine du Pô), en Espagne, en Russie, en Grèce, au Portugal, en France (Camargue et en Guyane), en Ukraine ou encore en Bulgarie. Il est dépourvu de gluten.  
→ *Oriza sativa* - Espèce diploïde ( $2n = 2 \times 7 = 14$ )
  
- Le **maïs** est utilisé en Europe en alimentation du bétail, en amidonnerie, semoulerie, en alimentation humaine sous forme d'huile, de corn flakes, ect... Il est dépourvu lui aussi de gluten. IL existe des maïs waxy et inversement riches en amylose, qui sont utilisés spécifiquement en amidonnerie.  
→ *Zea mays mays* - Espèce diploïde ( $2n = 2 \times 10$ )
  
- L'**Engrain** (ou Petit Epeautre) cultivé est un blé de petite taille (moins de 70 cm), au grain vêtu et au rendement faible. Il survit sur des sols pauvres là où les autres espèces ne donnent rien. C'est une espèce relativement uniforme, dont la plupart des cultivars ne contiennent qu'un grain par épillet, d'où son nom allemand **Einkorn**.  
Il est cultivé en France, principalement en Provence, et est consommé en grains, comme le riz. Il contient du gluten mais en très faible quantité.  
→ *Triticum monococcum* L. - blé diploïde ( $2n = 2 \times 7 = 14$ ), génome AA
  
- L'**Amidonier** est un blé vêtu, dont la culture est en forte régression. Il est cultivé en République tatare, en Transcaucasie, dans les Pyrénées espagnoles, en Suisse et en Yougoslavie ainsi qu'au Proche Orient (fabrication d'une qualité supérieure de boulgour)  
→ *Triticum turgidum dicoccum*. - blé tétraploïde ( $2n = 2 \times 2 \times 7 = 28$ ), génome AABB
  
- le « **kamut®** » ou blé de Khorasan. Le kamut® est en fait un cultivar à gros grains introduit aux Etats-Unis en 1950 ; Il est disponible en grains ou en farine dans les épiceries diététiques, et se voit attribuer des qualités particulières : plus de protéines de qualité supérieure, d'acides gras insaturés, de minéraux et d'oligoéléments que le blé moderne. La teneur en sélénium (env. 900 µg/kg) serait en outre exceptionnellement élevée, beaucoup plus élevée que celle des autres variétés de blé utilisées pour la consommation humaine. Il serait plus digeste que les céréales modernes. Le blé de Khorasan est un blé à épi très lâche, proche du blé dur et difficile à panifier. Cultivé en Asie centrale (Turkménistan, Ouzbékistan, Tadjikistan), Turquie, Syrie et Irak jusqu'au Khorasan (Iran) et aussi en Azerbaïdjan, ce blé est adapté à la culture irriguée en oasis.  
→ *Triticum turgidum turanicum*. - blé tétraploïde ( $2n = 2 \times 2 \times 7 = 28$ ), génome AABB

- Le **millet** est un terme générique qui désigne plusieurs espèces de céréales vivrières, à très petites graines, cultivées principalement dans les zones sèches, notamment en Afrique et en Asie. Elles sont souvent appelées aussi mil. Millet sans autre précision désigne souvent le millet commun, mais le millet le plus cultivé est le « millet perle ».  
Moins exigeantes et plus rustiques que le sorgho, ces espèces sont bien adaptées aux zones tempérées ou tropicales sèches où la saison des pluies est brève.  
Le millet est un aliment énergétique, nutritif, recommandé pour les enfants et les personnes âgées ou en convalescence.  
Il est consommé surtout sous forme de bouillies et de galettes. La farine de mil devient rapidement rance et ne peut pas être conservée longtemps. Traditionnellement, le grain est pilé dans un mortier. De plus en plus, on mécanise cette préparation : le grain est alors passé dans une décortiqueuse et un moulin à farine, ce qui évite un travail laborieux et améliore la qualité de la farine. La teneur en protéines des différents mils, et leur qualité, se compare à celle du blé ou du maïs. Une des principales espèces de millet, l'éleusine a une teneur relativement élevée de méthionine, acide aminé qui fait souvent défaut dans les céréales tropicales.  
Le millet est une céréale sans gluten.
  - Eleusine = *Eleusine coracana*
  - Fonio ou mil africain = *Digitaria ssp.*
  - Millet commun = *Panicum miliaceum*
  - Moha de Hongrie = *Panicum germanicum*
  - Millet des oiseaux ou millet d'Italie = *Setaria italica*
  - Millet indien = *Panicum sumatrense*
  - Millet japonais = *Echinochloa frumentacea*
  - Millet perlé ou petit mil = *Pennisetum glaucum*
  - Teff = *Eragrostis tef.*
  
- Le **sarrasin** ou blé noir (ou encore bucaïl) est une polygonacée (famille de l'oseille) . Il est dépourvu de gluten.
  - *Fagopyrum esculentum*

### 2.3. Le gluten

Il constitue environ 80% des protéines contenues dans le blé et se compose de gliadine, de gluténine (et aussi d'acides gras et de sucres).

Le gluten est responsable de la visco-élasticité de la pâte malaxée. Cette visco-élasticité permet de faire du pain : les bulles de CO<sub>2</sub> dégagées lors de la fermentation alcoolique par les levures sont piégées dans le réseau de gluten à la fois tenace et élastique (la pâte "lève").  
Les maïs, riz complet et millet sont des céréales sans gluten. Le sarrasin, une polygonacée, ainsi que la quinoa et l'amarante, des chénopodiacées, ne contiennent pas non plus de gluten.  
Le gluten a une forte teneur en glutamine et proline et faible en lysine, histidine et arginine (des acides aminés basiques).

### 2.4. Les utilisations du blé

Le blé est la première céréale consommée au monde. Ses deux principales formes d'utilisation sont la fabrication de pain et de pâtes alimentaires. Toutefois, même si cela reste marginal, le blé possède d'autres applications : blé à germer, alimentation animale,

industries des cosmétiques, de la diététique, de l'amidonnerie, pour la fabrication d'engrais, l'enrobage des semences, les papiers peints, les rubans adhésifs, le bio-éthanol, etc.

## 2.5. La maladie cœliaque

La **maladie cœliaque** ou **intolérance au gluten**, est une maladie auto-immune, caractérisée par une atteinte de tout ou partie des villosités recouvrant l'intestin grêle. Cette maladie est due à une intolérance au gluten et aux protéines apparentées que l'on trouve dans certaines céréales (blé, seigle, orge, épeautre, avoine). Il en résulte une malabsorption et donc des carences alimentaires. Les personnes cœliaques doivent s'abstenir à vie de consommer les produits contenant ces glutens.

Les composants toxiques dans la maladie cœliaque sont certaines prolamines :

- les oméga-gliadines du blé et d'autres espèces proches, comme l'épeautre, le kamut...
- les hordénines de l'orge.
- les sécalines du seigle.
- les prolamines du triticale,
- Les avénines de l'avoine ont été classées dans les protéines toxiques pour les malades cœliaques. Néanmoins, ce classement est aujourd'hui remis en cause, et leur consommation pourrait ne pas provoquer de lésions intestinales

---

### Bibliographie

- Jacotot B. et Campillo B., 2003.- NUTRITION HUMAINE, Ed. Masson, Paris, 311 pp.
- Groupe de recherche en éducation nutritionnelle (GREEN), 1996.- ALIMENTS, ALIMENTATION ET SANTE, Ed. Lavoisier TEC&DOC, 440 pp.
- Institut scientifique d'hygiène alimentaire, 2004.- TABLES DE COMPOSITION DES ALIMENTS, LT Ed. Jacques Lanore, Paris, 116pp.
- <http://museum.agropolis.fr>, site web d'Agropolis, Montpellier.
- Feillet P., 2000.-LE GRAIN DE BLE, Ed. INRA, Paris, 308 pp.
- <http://fr.wikipedia.org/wiki/Accueil>, encyclopédie sur internet, modifiable par l'utilisateur.
- Gallais A et Bannerot H., 1992.- AMELIORATION DES ESPECES VEGETALES CULTIVEES, Ed. INRA, 768pp.