

Chapitre 3 : COMPOSITION CHIMIQUE DE LA CELLULE

Plan du cours

1. L'eau et les autres molécules inorganiques
 - 1.1. L'eau
 - 1.2. Autres molécules inorganiques : les sels minéraux
2. Les molécules organiques
 - 2.1. Les glucides
 - 2.2. Les lipides
 - 2.3. Les protides
 - 2.4. Les acides nucléiques

Objectifs du cours

- Connaître la composition chimique de la cellule

Introduction

Les êtres vivants sont composés de trois types de matières qu'on peut découvrir successivement lorsqu'un échantillon vivant est exposé à la chaleur :

- De la vapeur d'eau se dégage en premier révélant la présence de l'eau.
- L'échantillon devient noir à cause de la combustion d'une matière riche en carbone : la matière organique.
- A la fin de la combustion, il persiste de cendres composées d'éléments minéraux.

1. L'eau et les autres molécules inorganiques

Les molécules inorganiques sont toutes les molécules sans squelette fait d'atomes de carbones liés à de l'hydrogène, par exemple l'eau (H_2O) et le CO_2 .

1.1. L'eau

La vie est dépendante de l'eau. C'est le principal constituant de la matière vivante, représentant en moyenne 60 % de la masse totale d'un corps (70 % du poids du corps chez l'homme adulte, 60 % chez la femme, 80 % chez le nourrisson et 55 % chez le vieillard). Les besoins journaliers sont de 2 à 2,5 L. L'homme meurt s'il perd 12 % de son eau.

1.1.1. Structure de l'eau

C'est une petite molécule ($PM = 18$). Elle présente un atome d'oxygène lié par liaisons covalentes à deux atomes d'hydrogène. L'oxygène attire le nuage électronique et constitue une charge partielle négative alors que les hydrogènes présentent une charge partielle positive : l'eau est une molécule polaire. L'eau, par sa nature polaire, attire les autres molécules polaires et les ions (hydrophiles) et repousse les molécules apolaires (hydrophobes) L'eau peut aussi se dissocier en H^+ et OH^- . L'équilibre est mesuré par le pH.

Les molécules d'eau s'assemblent de manière transitoire en un réseau de liaisons hydrogène.

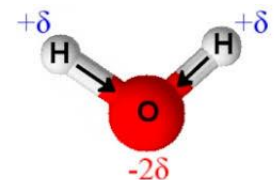


Fig. 1 : Schéma d'une molécule d'eau.

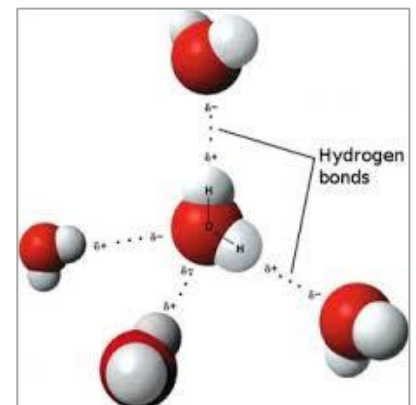


Fig. 2 : Molécules d'eau unies par des liaisons hydrogène.

1.1.2. Etas de l'eau dans l'organisme

- **L'eau de constitution** : elle entre dans la composition des molécules et en fait partie intégrante. Elle est étroitement liée aux macromolécules, en particulier aux protéines par des liaisons H. En la retirant, la structure de la molécule est profondément altérée.
- **L'eau liée ou d'imbibition** (4 à 5 %) : elle est faiblement liée aux molécules hydrophiles. Le cytosol imbibé d'eau se gonfle en donnant des structures colloïdales. L'eau liée permet les échanges osmotiques.
- **L'eau libre ou de dilution** $\cong 95\%$: c'est l'eau en excès dans la cellule qui sert de solvant des composés organiques et s'accumule dans les vacuoles. Elle peut circuler d'une cellule à l'autre en transportant les substances nutritives mais aussi les déchets du métabolisme.

1.1.3. Importance de l'eau dans la matière vivante

L'importance vitale de l'eau résulte de ses différentes propriétés :

- Une grande capacité thermique, c'est-à-dire le pouvoir d'absorber ou de dégager une grande quantité d'énergie calorique, sans que sa propre température change beaucoup. Cette propriété permet aux organismes vivants de maintenir plus facilement leur température corporelle.
- Un grand pouvoir de vaporisation (grande chaleur de vaporisation pour briser les liaisons hydrogène et s'évaporer). Ceci permet d'évacuer de grandes quantités de chaleur par transpiration.
- L'eau est une molécule polaire, ce qui en fait un bon solvant (solvant universel). Les réactions biochimiques se déroulent pour la plupart en milieux aqueux et les molécules minérales et organiques sont dissoutes dans l'eau. D'autre part, ces molécules sont véhiculées vers les différents tissus sous forme de solutés.
- Elle est indispensable aux réactions d'hydrolyse et est produite par les réactions de condensation. La dégradation des macromolécules se fait en présence d'eau (digestion) et les réactions de synthèse par élimination d'eau.
- Elle assure une protection mécanique. C'est le cas du liquide céphalo-rachidien qui allège l'encéphale et le protège contre les traumatismes, du liquide amniotique qui permet la protection du fœtus et du liquide synovial qui réalise celle des articulations.

1.2. Autres molécules inorganiques : les sels minéraux

Ce sont des composés ioniques qui, dissous dans l'eau, sont sous la forme des ions qui les composent, appelés **électrolytes**. Les sels minéraux se présentent sous deux formes dans la matière vivante. Ils se retrouvent d'une part dans la **constitution de structures** peu ou pas solubles (squelettes, coquilles et carapaces), mais aussi **en solution**, dissociés en ions. Dans la cellule, un équilibre finement régulé est maintenu entre les différentes concentrations d'ions. Une minime variation de la balance ionique peut avoir des effets désastreux sur l'être vivant. À titre d'exemples, les ions interviennent notamment dans l'excitabilité neuromusculaire, dans les effets osmotiques, comme cofacteurs de certaines protéines, etc. Une carence en sels minéraux chez les plantes peut entraîner des symptômes tels un ralentissement dans la croissance, des

chloroses voir même des nécroses. Les rôles des différents éléments minéraux chez les animaux et chez la plante sont respectivement présentés en Annexes 1 et 2).

2. Les molécules organiques

Un composé chimique est dit organique lorsqu'il possède au moins un atome de carbone lié au minimum à un atome d'hydrogène. Les composés organiques présentent une haute diversité structurelle et fonctionnelle, ainsi qu'une forte stabilité grâce aux propriétés spécifiques de liaison de l'atome de carbone, sa valence lui permettant notamment de former quatre liaisons covalentes avec d'autres atomes. Les biomolécules organiques se classent en quatre grands groupes : glucides, lipides, protéines et acides nucléiques. Certains glucides, les protéines et les acides nucléiques sont des **polymères**, c'est-à-dire des molécules constituées d'un grand nombre d'unités structurales identiques ou semblables, les **monomères**, unis par des liaisons covalentes.

2.1. Les glucides

Encore appelés **hydrates de carbone** [$C_m(H_2O)_n$ avec $m \geq n$], les glucides sont des molécules organiques ternaire (composées de carbone, d'hydrogène et d'oxygène), mais certains peuvent contenir de l'azote, du phosphore ou du soufre. Ils représentent 1 à 2 % de la masse de la cellule.

Ils sont une source d'énergie métabolique importante pour les êtres vivants (rôle métabolique), l'énergie provenant de l'oxydation du glucose stocké sous forme de polymères tels que le glycogène chez les animaux ou l'amidon chez les plantes. Ils ont aussi un rôle structural (cellulose des plantes, chitine des animaux), se comportent comme constituants des acides nucléiques, de coenzymes. Leur rôle est également essentiel dans la communication intercellulaire (interviennent comme signaux de reconnaissance moléculaire par association aux protéines et aux lipides) et le fonctionnement du système immunitaire.

Ils se répartissent en deux groupes selon leur comportement en milieu acide et à chaud :

- les **sucres simples ou oses ou monosaccharides** (non hydrolysables) ;
- les **sucres complexes ou osides** (hydrolysables), comprenant les holosides (constitués uniquement d'oses simples, Ex : amidon, glycogène, saccharose) et les hétérosides (constitués d'une partie glucidique $\pm$ importante et d'un aglycone = partie non glucidique).

Le représentant majeur des glucides est le **glucose** ($C_6H_{12}O_6$) de par son importance quantitative, son rôle biologique, son intervention dans la structure de nombreux glucides.

2.1.1. Les monosaccharides ou oses

Ce sont des sucres simples non ramifiés dont tous les carbones portent une fonction alcool ($-OH$), sauf un qui porte une fonction carbonyle, divisant les oses en aldoses (fonction aldéhyde) ou cétooses (fonction cétone). On classe également les oses en fonction du nombre de carbones qu'ils possèdent (3 à 8 carbones) : trioses, tétooses, pentoses, hexoses et heptoses. Le glucose ($C_6H_{12}O_6$) est, par exemple, un aldohexose (aldose et hexose), tandis que le fructose est un cétohexose (cétoose et hexose).

Les oses sont généralement représentés par la projection de Fischer. Celle-ci consiste en une représentation plane d'une molécule tridimensionnelle. Toutes les liaisons chimiques sont représentées avec des lignes horizontales ou verticales, de telle sorte que la molécule chimique ressemble à une échelle à un seul montant. La chaîne carbonée principale se situe sur la ligne verticale et les groupements attachés aux atomes de carbone sont disposés horizontalement de part et d'autre des atomes de carbone (à gauche et à droite).

La présence d'un **carbone asymétrique** (carbone lié à 4 substituants différents) conduit à 2 configurations différentes qui diffèrent par la position spatiale de l'hydroxyle (**stéréoisomères**) : la configuration **D** désigne la structure où le OH du carbone asymétrique est à droite de l'axe de la chaîne carbonée alors que la configuration **L** représente la structure où le OH du carbone asymétrique est à gauche de cet axe. Dans le cas des oses ayant plus d'un carbone asymétrique, les symboles D et L réfèrent à la configuration du carbone le plus distant de la fonction réductrice. Une molécule comportant n carbones asymétriques possède 2^n stéréoisomères. On désigne par **énantiomères**, 2 deux molécules qui sont images l'une de l'autre dans un miroir (Ex : D et L-glucose). Les configurations stéréochimiques sont moins abondantes au niveau de l'affiliation des cétooses car la dihydroxyacétone est optiquement inactive.

Enfin, les oses constitués de quatre atomes de carbone ou plus peuvent se cycliser. La cyclisation se fait par la réaction entre l'atome d'oxygène de la fonction carbonyle (aldéhyde ou cétone) et un atome de carbone portant une fonction alcool. L'atome de carbone de la fonction carbonyle devient alors asymétrique et est appelé **carbone anomérique**. La cyclisation entraîne donc l'établissement de deux formes possibles, **les anomères**, distingués par les lettres α et β . La forme est α si la fonction alcool ($-\text{OH}$) du carbone anomérique et le groupement $-\text{CH}_2\text{OH}$ terminal se trouvent de part et d'autre du cycle. La forme est β si ces deux groupements sont du même côté du cycle.

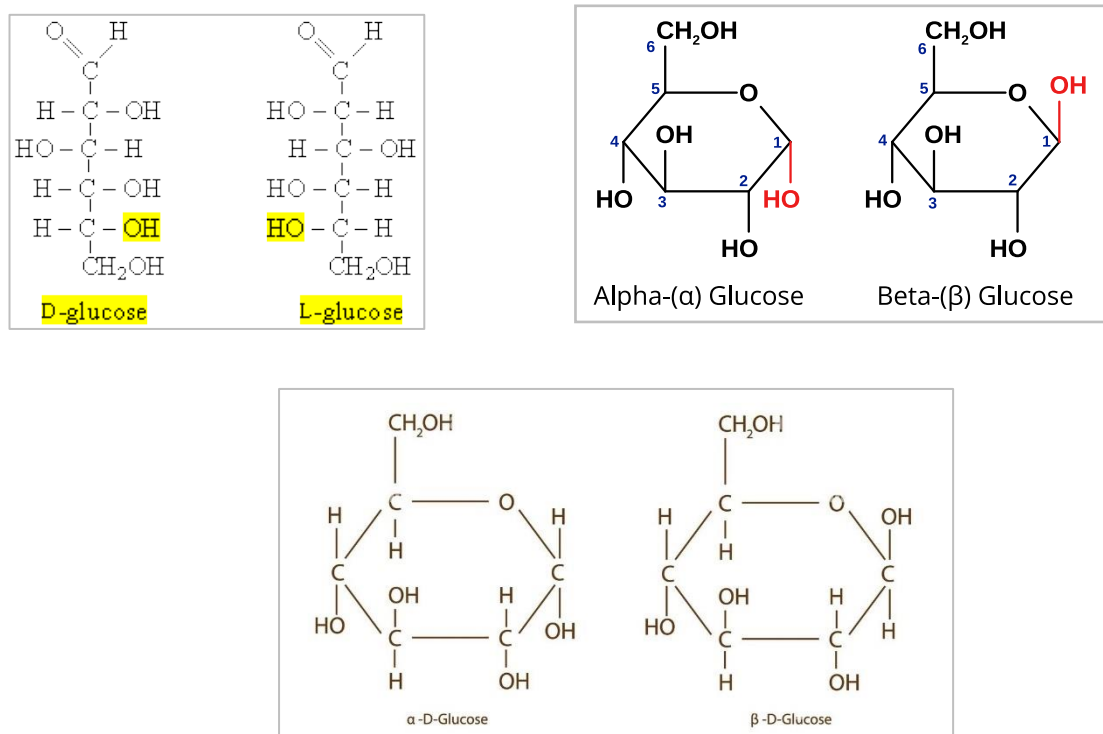


Fig.3 : Les différentes représentations du glucose.

2.1.2. Les disaccharides et oligosaccharides

Les disaccharides sont des oligosaccharides formés de deux oses unis par une fonction alcool ou carbonyle après perte d'une molécule d'eau. La liaison est appelée osidique et peut être rompue sous l'action d'enzymes spécifiques par une réaction d'hydrolyse. Cette liaison est dite α si elle est située de l'autre côté du cycle par rapport au groupement $-\text{CH}_2\text{OH}$ terminal du premier ose. Elle est dite β si elle est située du même côté du cycle que le groupement $-\text{CH}_2\text{OH}$ terminal du premier ose. La liaison osidique est donc nommée en fonction de sa conformation et du numéro des deux carbones qu'elle lie. Le lactose du lait est par exemple un disaccharide formé d'une molécule de β -galactose et d'une molécule de β -glucose. La liaison osidique reliant les deux est une liaison β (1-4). Des oligosaccharides de grandeur croissante (tri-, tétra-saccharide...) peuvent également se former par ajout successif d'oses.

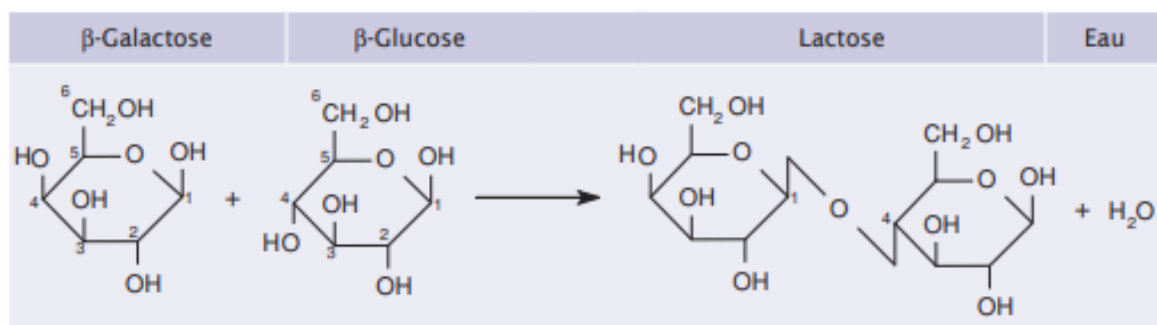


Fig.4 : Synthèse d'un disaccharide (le lactose) à partir d'une molécule de galactose et d'une de glucose La liaison entre les deux est appelée liaison osidique.

2.1.3. Les polysaccharides

Les polysaccharides sont des polymères qui peuvent être classés en deux grandes catégories selon leur fonction biologique : structurelle ou de stockage. Le glycogène et l'amidon sont par exemple des formes de mises en réserve du glucose qui se présentent sous la forme de grains. Les grains de glycogène sont dispersés dans le cytoplasme des cellules animales tandis que les grains d'amidon sont dispersés dans le cytoplasme et les chloroplastes des cellules végétales. La cellulose, formée dans la cellule végétale et également constituée de glucose, intervient quant à elle dans la constitution de la paroi cellulaire. Une catégorie particulière de polysaccharides est représentée par le groupe des glycosaminoglycanes, présents notamment dans la matrice extracellulaire des tissus conjonctifs.

2.2. Les lipides

Les lipides ne sont pas des polymères. Cette classe mal délimitée regroupe une grande diversité de molécules dont la caractéristique commune est l'insolubilité dans l'eau. Leur comportement hydrophobe repose sur leur structure moléculaire. Leur importance est triple : ce sont les constituants fondamentaux des membranes cellulaires, leur dégradation libère une grande quantité d'énergie (l'hydrolyse des acides gras stockés dans les triglycérides libérant environ 37 KJ d'énergie par gramme de lipide, contre environ 17 KJ pour les glucides), et ce sont de plus des précurseurs biomoléculaires.

2.2.1. Les acides gras

Ce type de lipide entre lui-même dans la composition d'un grand nombre d'autres lipides. Les acides gras $[\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_n-\text{COOH}]$ sont très hydrophobes, car formés en majorité de groupements $-\text{CH}_2$ apolaires. Seul le groupement carboxylique ($-\text{COOH}$) est hydrophile. Les acides gras peuvent être saturés ou insaturés. Les premiers ne possèdent que des liaisons simples entre leurs carbones tandis que les seconds possèdent une ou plusieurs doubles liaisons au niveau de leur chaîne carbonée. Les acides gras essentiels (non synthétisés par l'organisme, l'apport alimentaire est obligatoire) sont insaturés et d'origine végétale.

Les autres acides gras sont synthétisés au niveau du tissu adipeux, de la moelle osseuse, des poumons et des intestins, dans la matrice mitochondriale et le hyaloplasme.

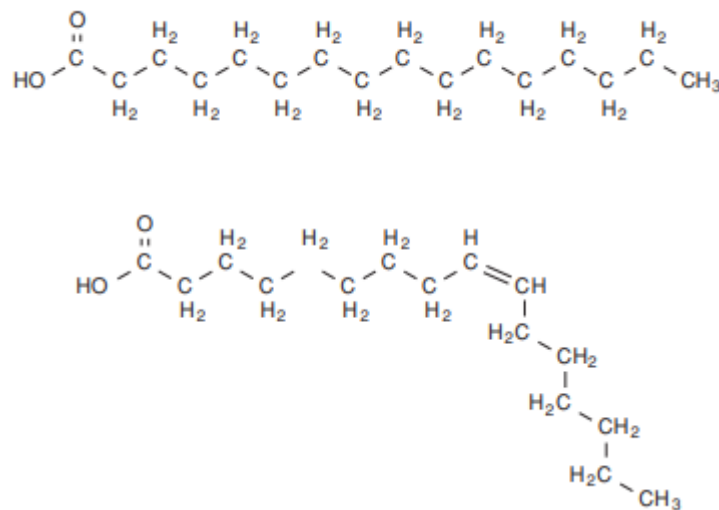


Fig.5 : Formule d'un acide gras saturé (l'acide palmitique, en haut) et d'un acide gras insaturé (l'acide palmitoléique, en bas).

2.2.2. Les glycérides

Les glycérides sont des esters d'acides gras et de glycérol. Selon le nombre d'alcools estérifiés, on distingue des mono-, di- ou triglycérides. Ce sont les principaux lipides de réserve. Totalement insolubles dans l'eau, ces molécules ne présentent pas de caractère hydrophile. Elles constituent la majorité des graisses et des huiles animales et végétales. Les glycérides d'origine endogène sont formées à partir des glucides en excès. Les glycérides sont stockées sous forme de gouttelettes lipidiques dans la cellule.

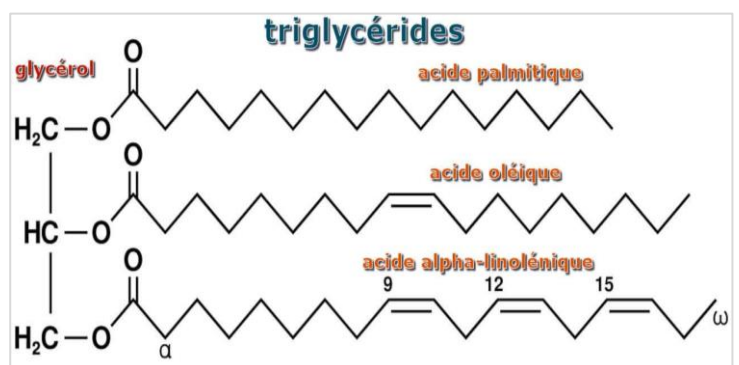


Fig.6 : Schéma d'un triglycéride.

2.2.3. Les phospholipides

Les phospholipides sont constitués d'une molécule de glycérol liée à deux acides gras, ainsi qu'à un groupement phosphoryle lui-même lié à un autre composé hydrophile (ex : choline). Ces molécules sont dites amphipathiques : elles possèdent une queue hydrophobe (acides gras) et une tête hydrophile (groupement phosphoryle). Au contact de l'eau, les parties apolaires de la molécule amphipathique sont repoussées par les molécules d'eau tandis que les parties polaires s'y associent. Trois types de structures phospholipidiques peuvent dès lors se former : une monocouche, une micelle ou une bicouche, cette dernière constituant la structure de base de toute membrane biologique (Voir chapitre 4).

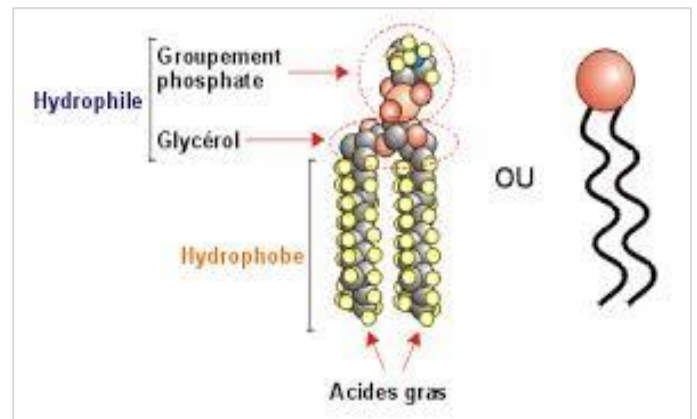


Fig. 7 : Schéma d'une molécule de phospholipide.



Les **toxines bactériennes** sont riches en phospholipases. Elles peuvent dégrader les membranes et être à l'origine de pathologies. C'est le cas de la toxine cholérique qui a pour cible la membrane des cellules intestinales

2.2.4. Les sphingolipides

Les **sphingolipides** contiennent de la sphingosine (acide palmitique + sérine) et sont les constituants fondamentaux de la myéline. Les représentent 50 % du poids sec du tissu nerveux (protéines : 40 %) et interviennent dans les fonctions de transfert de l'information neuronale.

2.2.5. Les stéroïdes

Les stéroïdes sont caractérisés par un squelette carboné formé de quatre cycles accolés. Les groupements fonctionnels attachés aux cycles varient d'un type de stéroïde à l'autre. Un exemple est le cholestérol.

Le **cholestérol** est une biomolécule animale, absente chez les végétaux et les microorganismes, portant une fonction alcool, qui existe dans les cellules et les liquides biologiques sous forme libre ou combinée. Les fonctions physiologiques attachées à ces deux formes sont spécifiques.

Le cholestérol est un précurseur des acides biliaires, des hormones stéroïdiennes et des vitamines A, K et D, et un constituant essentiel des membranes (rôle de modulateur de la fluidité membranaire). Il a une origine exogène (faible, de 200 mg à 1 g par jour) et endogène par biosynthèse qui se réalise dans le cytosol. Les tissus de synthèse les plus actifs sont le foie et la muqueuse intestinale (1 à 2 g par jour).

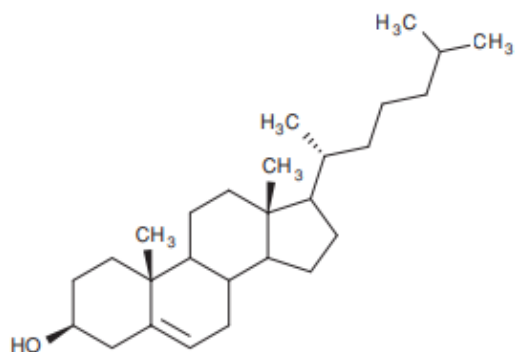


Fig.8 : Formule du cholestérol.



Le cholestérol alimentaire d'origine animale est lié à certaines protéines et se fixe dans le milieu sanguin sur les LDL. Plus la quantité ingérée est importante, plus le taux de LDL augmente. Le complexe LDL-cholestérol pénètre moins facilement dans les cellules que le complexe HDL-cholestérol. Il est alors en quantité importante dans le sang. C'est ce qui est appelé couramment le mauvais cholestérol.



L'accumulation de cholestérol provoque des xanthomes (nodules formés de cellules chargées de cholestérol) au niveau de la peau et des os et des athéromes (lésion circonscrite de la surface interne d'une artère formée par le dépôt de nodules lipidiques) au niveau de la paroi des vaisseaux.
L'**athérosclérose** : est une lésion qui s'installe dans les vaisseaux très lentement, puis brusquement se complique d'une insuffisance respiratoire ou ischémie (irrigation sanguine insuffisante d'un tissu ou d'un organe).

2.3. Les protides

Chez les eucaryotes, les protéines sont des polymères formés d'un assortiment de vingt acides aminés différents. Elles jouent un rôle dans le métabolisme cellulaire en agissant comme catalyseur des réactions chimiques, mais interviennent également dans la structure des tissus, le stockage et le transport de petites molécules et d'ions, les communications cellulaires, le mouvement par contraction des muscles et les défenses de l'organisme contre des éléments étrangers ou des cellules cancéreuses.

2.3.1. Les acides aminés

Les acides aminés sont les unités élémentaires constitutives des protides. Ils sont constitués d'un groupement amine ($-\text{NH}_2$) et d'un groupement carboxylique acide ($-\text{COOH}$) liés à un atome de carbone central, appelé carbone α . Ils ne diffèrent entre eux que par leur chaîne latérale (groupement $-\text{R}$), composée essentiellement de $-\text{CH}_2$ et de $-\text{CH}_3$ également lié au carbone α . Les vingt acides aminés protéinogènes peuvent être groupés en cinq classes selon les propriétés de leur chaîne latérale : apolaire, polaire non chargé, chargé, aromatique et enfin la classe des acides aminés à fonctions particulières. L'ensemble des acides aminés est présenté dans l'Annexe 3.

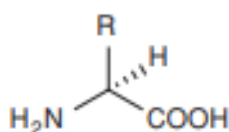


Fig.9 : Schéma général d'un acide aminé.

Les acides aminés s'unissent entre eux par des liaisons peptidiques lors de réactions de déshydratation entre la fonction acide du premier acide aminé et la fonction amine du second, formant un peptide. À l'exception de certains oligopeptides, la grande majorité des peptides naturels sont des polypeptides pouvant contenir plusieurs centaines d'acides aminés. Les protéines peuvent être formées d'une ou plusieurs chaînes polypeptidiques.

2.3.2. Structure des protéines

On distingue quatre niveaux d'organisation des protéines.

La structure primaire d'une protéine est définie comme la séquence en acides aminés du (ou des) polypeptide(s) qui la compose(nt).

La structure secondaire est la configuration régulière que prend le squelette polypeptidique suite à la formation de liaisons hydrogène entre ses groupes peptidiques. Ces liaisons impliquent donc les atomes du squelette peptidique et non ceux des chaînes latérales. Les plus connues sont la structure en spirale (hélice α) et la structure plane (feuillet plissé β).

La structure tertiaire est la forme tridimensionnelle finale de la protéine, généralement irrégulière. Elle résulte de la réactivité des groupes latéraux de la chaîne polypeptidique qui interagissent de différentes façons : liaisons hydrogène, hydrophobes, électrostatiques, covalentes (ponts disulfures...). Cette structure confère à la protéine une activité spécifique.

La structure quaternaire d'une protéine multimérique concerne l'association de ses différentes chaînes peptidiques ou sous-unités les unes par rapport aux autres.

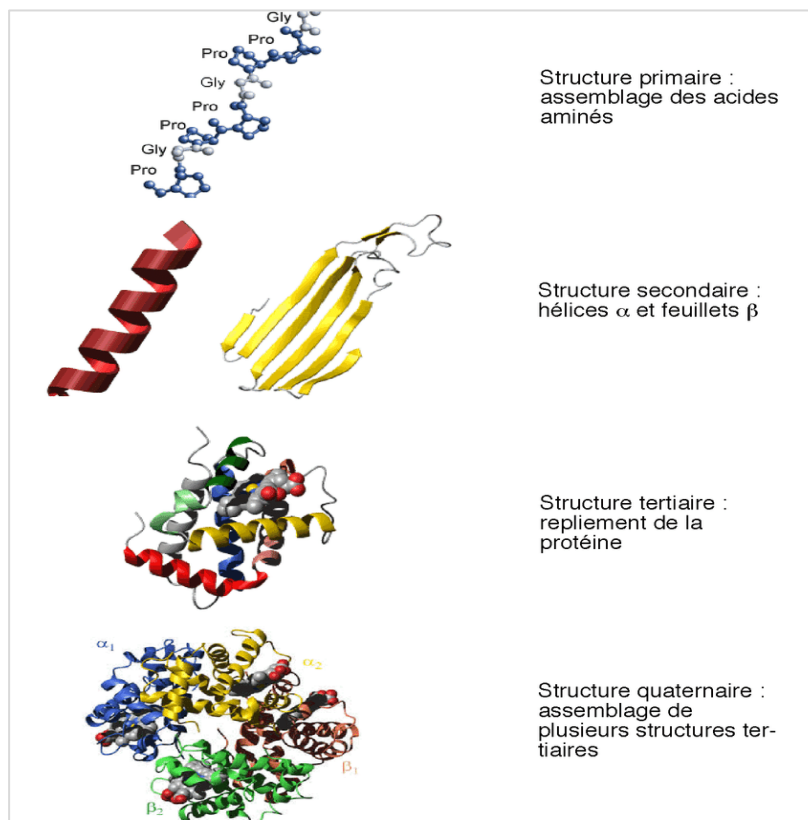


Fig.10 : Les différentes structures des protéines.

Les fonctions des protéines

Les protéines interviennent à tous les niveaux de la cellule et de l'organisme.

- Les protéines de structure sont des constituants membranaires
- Les protéines de reconnaissance assurent la cohésion tissulaire, la fixation d'un messager chimique et interviennent dans les réponses immunitaires.
- Les messagers chimiques tels que certains neuromédiateurs et certaines hormones sont responsables de la communication intercellulaire.
- Les canaux membranaires permettent le transfert d'ions ou de molécules.
- Les enzymes catalysent toutes les réactions biochimiques qui se déroulent dans notre organisme.

Certaines protéines portent plusieurs fonctions simultanément.

2.4. Les acides nucléiques

Les acides nucléiques, polymères de nucléotides, constituent les dispositifs de stockage de l'information dans la cellule. Il en existe deux groupes : les acides désoxyribonucléiques (ADN) et les acides ribonucléiques (ARN). Ces molécules permettent la transmission de l'information génétique nécessaire pour produire les protéines correctes d'une génération à l'autre (voir Chapitres 6 et 7).

2.4.1. Les nucléosides et les nucléotides

Les **nucléosides** sont obtenus par formation d'une liaison glycosidique entre un pentose (ribose ou désoxyribose) et une base azotée soit purique (Adénine et Guanine), soit pyrimidique (Cytosine, Thymine et Uracile).

Les **nucléotides** sont des nucléosides phosphorylés (un, deux ou trois groupements phosphate). Ils sont les monomères constitutifs des acides nucléiques. Ils intègrent la synthèse des chaînes polynucléotidiques sous la forme de nucléosides triphosphatés : adénosine triphosphate (ATP), cytosine triphosphate (CTP), GTP, TTP et UTP.

Remarque : Certaines molécules impliquées dans le transfert d'électrons sont des dinucléotides particuliers, ils jouent alors le rôle de coenzyme d'oxydoréduction. Par exemple, on citera le NAD^+ (Nicotinamide Adénine Dinucléotide), le FAD (Flavine Adénine Dinucléotide) et le NADP^+ (Nicotinamide Adénine Dinucléotide Phosphate), trois transporteurs d'électrons impliqués dans la respiration cellulaire (pour les deux premiers) ou la photosynthèse (pour le troisième).

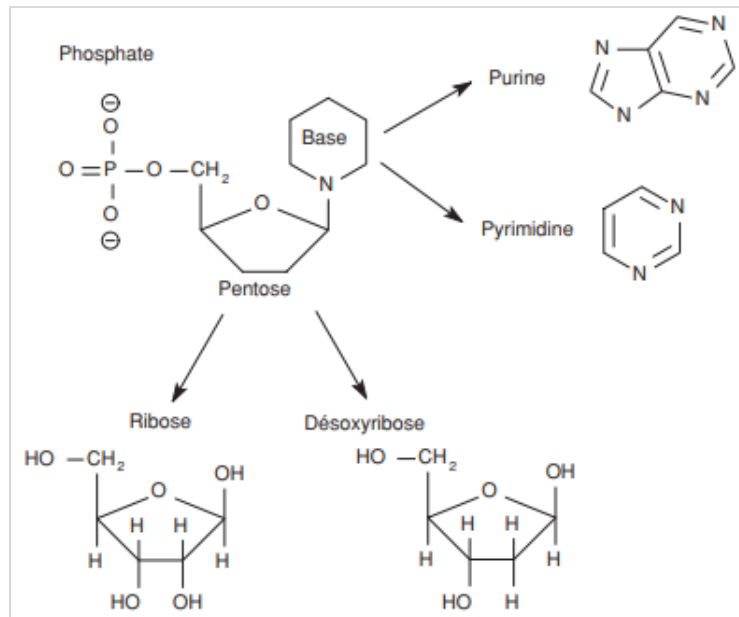


Fig.11 : Structure d'un nucléotide monophosphaté Le pentose peut être un ribose ou un désoxyribose et la base azotée une purine ou une pyrimidine.

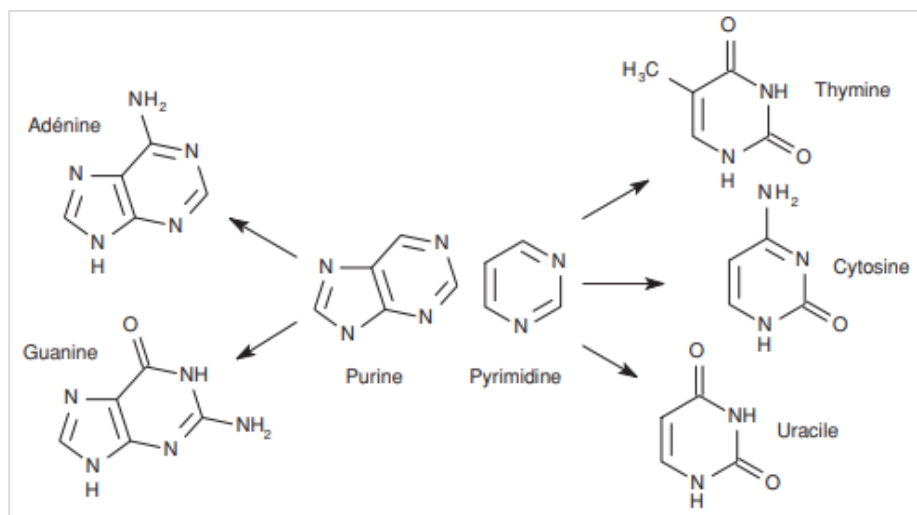


Fig.12 : Les bases azotées purines (adénine et guanine) et pyrimidines (thymine, cytosine et uracile).

2.4.2. L'acide désoxyribonucléique (ADN)

L'ADN est une molécule bicaténaire présentant une structure en double hélice (modèle proposé par Watson et Crick en 1953). Chaque brin est un polydésoxyribonucléotide, les nucléotides étant reliés par des ponts phosphodiester entre groupements phosphate et les désoxyriboses. Les deux brins sont appariés selon le principe de complémentarité des bases (entre A et T, 2 liaisons hydrogène et entre C et G, 3 liaisons hydrogène) et sont disposés de manière antiparallèle. Chez les Eucaryotes, l'ADN est situé dans le noyau, les mitochondries et les chloroplastes. Il est le support de l'information génétique (Voir chapitre 6), la séquence des nucléotides déterminant les structures primaires des protéines.

Remarque : la composition en base de l'ADN est caractéristique d'un organisme et non des tissus de cet organisme. Elle est indépendante de l'âge, du sexe, de l'état nutritionnel, de facteurs environnementaux. Dans une espèce, la quantité d'ADN par noyau est constante.

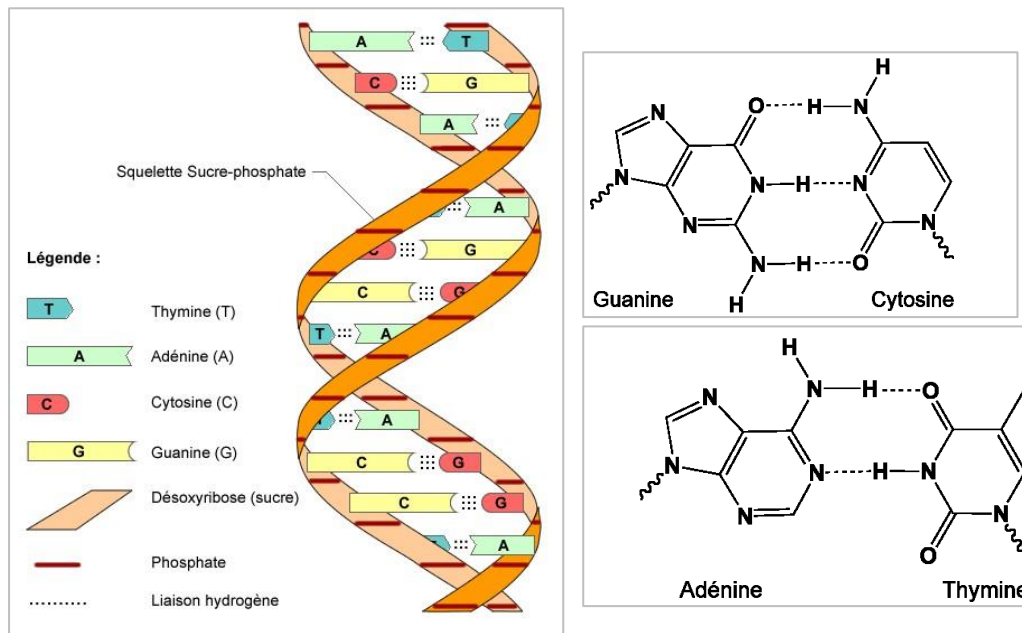


Fig.13 : Structure de l'ADN.

2.4.3. Les acides ribonucléiques (ARN)

L'ARN est un polymère linéaire constitué de ribonucléotides qui diffèrent entre eux par la nature de leurs bases azotées (adénine, guanine, cytosine et uracile). La molécule est généralement monocaténaire, constituée d'une seule chaîne nucléotidique. Cette chaîne peut toutefois être repliée sur elle-même sur de courtes distances, en raison de l'établissement de liaisons hydrogène entre bases complémentaires. La séquence des bases le long de molécules d'ARN est spécifique et va permettre la synthèse de protéines précises (voir Chapitre 6). Différentes molécules sont constituées d'ARN : les ARN messagers (ARNm), les ARN ribosomiques (ARNr), les ARN de transfert (ARNt), les petits ARN nucléaires (ARNsn) ou nucléolaires (ARNsno).

Annexe 1 : Distribution des principaux minéraux dans l'organisme et leur importance humaine

Minéral	Distribution	Importance	Excès	Carence
Calcium	Os et dents	Dureté des os et des dents, perméabilité membranaire, transmission des influx nerveux, contraction musculaire, coagulation du sang	Léthargie, confusion, douleurs, calculs rénaux	Tétanie, ostéoporose, rachitisme
Chlore	Liquide extracellulaire	Pression osmotique et pH, suc gastrique, contribue au transport du CO ₂ dans le sang	Vomissements	Crampes, apathie
Soufre	Tout l'organisme, notamment cheveux, peau, ongles	Composant de nombreuses protéines et vitamines, présentes dans les cartilages, tendons et os	Aucun problème connu	
Potassium	Milieu intracellulaire	Maintien de la pression osmotique, influx nerveux, contraction musculaire, glycogénogenèse, synthèse protéique	Déshydratation, insuffisance rénale, faiblesse musculaire	Paralysie, tachycardie
Sodium	Liquide extracellulaire	Maintien de la pression osmotique, équilibre hydrique, fonctionnement neuromusculaire, transport membranaire et micronutriments	Hypertension, œdème	Crampes abdominales et musculaires, convulsions
Magnésium	Toutes les cellules (abondant dans les os)	Composant de coenzymes intervenant dans l'hydrolyse de l'ATP, réponses musculaire et nerveuse	Diarrhée	Tremblements, faiblesse, spasmes vasculaires
Phosphore	Os et dents, muscles, tissus nerveux et sang	Composant des acides nucléiques, protéines, phospholipides, ATP et phosphates, stockage et transfert d'énergie, activité nerveuse et musculaire	Pas de problème connu	Croissance ralentie
Fer	Hémoglobine, moelle osseuse, foie et rate, muscles striés	Transport de O ₂ , phosphorylation oxydative (mitochondrie)	Cirrhose, diabète	Anémie, thermorégulation perturbée
Zinc	Foie, reins, encéphale, testicules	Composant enzymatique, croissance, cicatrisation, goût et odorat, production de spermatozoïdes	Tremblements, troubles de l'élocution	Perte du goût et de l'odorat, retard de croissance, stérilité
Cuivre	Foie, reins	Croissance et développement	Pas de problème particulier	Pathologies hépatiques, problèmes neurologiques

Annexe 2 : Importance des principaux minéraux dans la plante

Elément minéral	Importance dans la plante	Carence
Azote	Constituant des acides aminés et protéines	Jaunissement, chute des feuilles
Phosphore	Constituant des acides nucléiques et molécules énergétique	Faible croissance, floraison retardée
Potassium	Régulation osmotique et ouverture des stomates	Faible résistance au froid et à la sécheresse
Calcium	Cohésion de la paroi pectocellulosique	Dommages sur les méristèmes
Magnésium	Constituant de la chlorophylle	Dépérissement des feuilles
Manganèse	Constituant de nombreuses enzymes	Dessèchement des feuilles

Annexe 3 : Les acides aminés et leurs formules chimiques

