

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique Université A.
Mira de Bejaia

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

Département des Sciences Alimentaires



Polycopié de Cours

Destiné aux étudiants de deuxième année (L2)

Filière : Sciences Alimentaires

Spécialités :

- Technologie Agroalimentaire et Contrôle de Qualité (TAACQ)
- Alimentation Nutrition et Pathologies (ANP)
- Contrôle de Qualité et Analyse des Aliments (CQAA)

Matière

Biochimie Structurale (glucides, lipides et protéines)

Présenté par :

Dr. KAAANIN-BOUDRAA Ghania

Enseignante-Chercheur (MCB)

Année Universitaire : 2025/2026

Préface

Ce support pédagogique est conçu pour développer et approfondir les notions fondamentales de la biochimie générale, en mettant particulièrement l'accent sur l'étude des macromolécules glucidiques, lipidiques et protéiques. Il vise à fournir aux étudiants les connaissances nécessaires pour comprendre la structure, les propriétés et les fonctions biologiques de ces composés essentiels. À travers une approche progressive, ce document introduit les concepts de base de la chimie des glucides, des lipides et des protéines, leur classification, leurs réactions caractéristiques, ainsi que leur rôle dans le métabolisme cellulaire. L'objectif est d'amener l'étudiant à établir des liens entre la structure chimique des molécules et leurs fonctions biologiques, tout en développant une compréhension intégrée des processus biochimiques impliqués dans la nutrition et la transformation des aliments.

Ce document s'adresse principalement aux étudiants inscrits dans le parcours de Licence deuxième année des Sciences Alimentaires. Il leur permettra d'acquérir une base solide pour aborder les enseignements plus spécialisés de la biochimie appliquée et de la technologie alimentaire. Il constitue également une ressource utile pour les biologistes souhaitant réviser ou consolider leurs connaissances de base, afin de mieux interpréter certains phénomènes biochimiques rencontrés dans leurs travaux de recherche ou leurs activités professionnelles.

Enfin, les professionnels des industries alimentaires y trouveront des précisions sur les propriétés, les transformations et le comportement des composants biochimiques des denrées alimentaires, leur permettant ainsi d'améliorer la qualité, la stabilité et la valeur nutritionnelle des produits.

Table des matières

INTRODUCTION	1
Chapitre I. Structure des glucides	
A. OSES.....	3
1 ALDOSE	6
2 CETOSE	8
II STRUCTURECYCLIQUEDES OSES	10
A. CYCLISATION DES SUCRES	11
III DIFFERENTS TYPES D' OSES.....	13
1 OSES « NEUTRES ».....	14
2 OSAMINES	14
3 ACIDE URONIQUES.....	15
4 ACIDE SIALIQUES.....	15
IV COMPOSES DERIVES DES OSES.....	16
1 ACIDE L-ASCORBIQUE (VITAMINE C)	16
2 POLYALCOOLS (OU POLYOLS).....	16
V NOMENCLATURE DES OSES	17
VI CONFORMATION SPATIALE DES OSES.....	17
VII PROPRIETES PHYSICOCHIMIQUES DES OSES (OU MONOSACCHARIDES).....	17
1 OXYDATION DES MONOSACCHARIDES	18
1.1 Oxydation de la fonction aldéhyde en fonction acide carboxylique.....	18
1.2 Oxydation de la fonction aldéhyde et la fonction alcool primaire en acide carboxylique.....	18
1.3 Oxydation de la fonction alcool primaire en fonction acide carboxylique	19
2 REDUCTION DES OSES (OU MONOSACCHARIDES)	19
3 FORMATION D'ESTER (REACTION D'ESTERIFICATION)	20
4 ALKYLATION.....	20
5 ACTION DES ACIDES CONCENTRE.....	21
B LES OSIDES.....	22
I HOLOSIDES	22
1. DIHOLOSIDES.....	22
A. Diholosides réducteurs.....	23
B. Diholosides non réducteurs.....	24
2. TRIHOLOSIDES	24
3. POLYHOLOSIDES.....	25
II. LES HETEROSIDES.....	28
Chapitre II : structure des lipides	
INTRODUCTION	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
I. ACIDES GRAS.....	31
I.1 TYPES D' ACIDES GRAS	32
1.1.1 Acides gras saturés	32
1.1.2 Acides gras désaturés (insaturés)	32
A. Acides gras mono-insaturés.....	33
B. Acides gras polydésaturés (plusieurs doubles liaisons)	33
I.2 PROPRIETES PHYSICO-CHIMIQUES DES LIPIDES ET DE LEURS CONSTITUANTS.....	34

I.2.1 Propriétés physiques.....	34
I.2.2 Propriétés chimiques.....	35
I.2.2.1. Propriétés dues à la présence du groupement carboxylique (-COOH).....	35
I.2.2.2 Propriétés dues à la double liaison.....	36
II. GLYCEROLIPIDES.....	39
1. GLYCERIDES (ACYL-GLYCEROLS).....	39
2. GLYCEROPHOSPHOLIPIDES.....	39
III SPHINGOLIPIDES.....	41
1. SPHINGOMYELINES.....	41
2. SPHINGOLIPIDES.....	42
IV CERIDES.....	42
 Chapitre III : Acides aminés, peptides et protéines	
III.1. GENERALITES.....	44
III.1.1. ACIDES AMINES ET PEPTIDES.....	41
III.1.1.1. Acides aminés.....	41
III.1.1.2. Propriétés physico-chimiques des acides aminés.....	43
III.1.2. PEPTIDES.....	48
III.2. PROTEINES.....	49
III.2.1. DIFFERENTS NIVEAUX DE STRUCTURE DES PROTEINES.....	49
III.2.1.1. Structureprimaire.....	50
III.2.1.2. Structuresecondaire.....	50
III.2.1.3. Structuretertiaire.....	51
III.2.1.4. Structurequaternaire.....	52
III.2.2. CLASSIFICATION.....	53
III.2.3. PROPRIETES PHYSIQUES DES PROTEINES.....	53
III.2.3.1. Solubilité.....	53
III.2.3.2. Propriétés optiques.....	55
III.2.3.3. Propriétés osmotiques.....	55
III.2.3.4. Propriétés d'ionisation.....	56
III.2.4. EXTRACTION DES PROTEINES ALIMENTAIRES (METHODES, PROPRIETES ET UTILISATION DES CONCENTRATIONS ET ISOLATS PROTEIQUES).....	56
III.2.4.1. Chromatographie.....	56
III.2.4.1.1. Chromatographie par filtration sur gel.....	57
III.2.4.1.2. Chromatographie par échange d'ions.....	57
III.2.4.1.3. Chromatographie par interactions hydrophobes.....	58
III.2.4.1.4. Chromatographie par affinité.....	58
III.2.4.2. Electrophorèse.....	59
III.2.5 DETERMINATION DU NOMBRE DES CHAINES POLYPEPTIDIQUES (SOUS UNITES).....	59
III.2.5.1 Identification du résidu N-terminal.....	59
III.2.5.2 Détermination de l'extrémité C-terminal.....	62
CONCLUSION.....	66
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	68

Liste des figures

Figure 01 : Classification des glucides.	3
Figure 02: Structures des monosaccharides les plus simples.	4
Figure 03: Projections des structures des configurations d et l du glyceraldehyde (representation proposee par fischer).....	4
Figure 04 : Structure des epimeres.	5
Figure 05 : Deviation de la lumiere sous le polarimetre.....	6
Figure 06 : Les aldotetroses : quatre stereo-isomeres.....	7
Figure 07 : Filiationdesaldoses de kiliani-fisher.....	8
Figure 08: Configuration des d-xylulose et d-ribulose (epimeres).....	9
Figure 09: Filiationdes cetoses de kiliani-fisher.....	10
Figure 10 : Reaction de formation d'un acetal.	11
FIGURE 11 :CYCLISATION DES ALDOSES EN C1-C5.	11
Figure 12 :Cyclisation des Aldoses en C1-C4.....	12
Figure 13 : Cyclisation des cetoses en c2-c6.	13
Figure 14 : Cyclisation des cetoses en c2-c5.....	13
Figure 15: Structure de quelques hexosamines.	14
Figure 16 : α ou β acide-d-glucuronique.	15
Figure 17: Structure l'acide sialique (ou neuraminique).	15
Figure 18: Structure de quelques oses acides et de quelques acides derives des oses.....	16
Figure 19: Structure du myo-inositol, un des isomeres du meso-inositol (hexa-alcool derive du cyclohexane).	17
Figure 20 : Forme bateau (1) et la forme chaise (2) du cycle pyrane.....	17
Figure 21: Oxydation du d-glucose en acide d-gluconique.....	18
Figure 22 : Oxydation du d-glucose en acide d-glucarique.....	19
Figure 23 : Acide β -d-glucuronique.	19
Figure 24 : Reduction de d-glucose (un aldose).	20
Figure 25: Reduction du fructose en d-glucitol et d-mannitol.....	20
Figure 26: La perméthylation du glucose par le sulfate de méthyle.....	21
Figure 27: Formation d'un derive du hydroxymethylfurfural et furfurique par l'action d'un acide concentre.....	21
Figure 28 : Structure de maltose ou α -d-glucopyranosyl-(1 \rightarrow 4) β -d-glucopyranose ou α -d-glucopyranosido (1 \rightarrow 4) β -d-glucopyranose.....	23

Figure 29 : Structure du lactose.	24
Figure 30: Structure du saccharose.	24
Figure 31: Structure du raffinose.	25
Figure 32: Structure de l'amylose.	25
Figure 33: Structure de l'amylopectine.	26
Figure 34 : Structure du glycogène.	27
Figure 35 : Structure du cellulose.	28
Figure 36: Structure de la dextrine.	28
Figure 37: Temperature de fusion des acides gras.	34
Figure 38 : Structure d'un triglyceride.	39
Figure 39: Structure de l'acide phosphatidique.	40
Figure 40: Structure du phosphatidyl-ethanolamine.	40
Figure 41 : Structure de la sphingosine.	41
Figure 42: Structure du ceramide.	41
Figure 43: Formule generale d'un acide amine.	41
Figure 44 : Les 20 acides aminés.	42
Figure 45: Stereochimie des acides aminés.	43
Figure 46: Absorption des acides aminés aromatiques dans l'UV.	44
Figure 48 : Etapes de titration d'un acide aminé.	45
Figure 49: Synthèse d'une liaison peptidique.	49
Figure 50: Structure primaire d'une protéine.	50
Figure 51: Structure secondaire d'une protéine.	51
Figure 52: Structure tertiaire d'une protéine.	52
Figure 53: Stabilisation de la structure tertiaire.	52
Figure 54: Structure quaternaire de l'hémoglobine.	53
Figure 55: Courbe de solubilité d'une protéine en fonction de la concentration en sel.	54
Figure 56: Courbe de solubilité d'une protéine en fonction du pH du milieu.	55
Figure 57: Différents types de chromatographie.	58
Figure 58: Exemple de l'électrophorèse d'un mélange d'acides aminés.	59
Figure 59 : Identification de l'acide aminé N-terminal par la méthode de Sanger.	60
Figure 60 : Identification de l'acide aminé N-terminal par la méthode d'Edman.	61
Figure 61 : Identification de l'acide aminé N-terminal par la méthode de dansylation.	62
Figure 63 : Identification du résidu C-terminal par la méthode du bromure de cyanogène (CNBr).	63

Liste des tableaux

Tableau I : liste des acides gras saturés et insaturés.	32
--	----

Introduction

La biochimie structurale est une discipline fondamentale qui étudie la relation entre la structure des biomolécules et leurs fonctions biologiques. Parmi ces biomolécules essentielles, les glucides, les lipides et les protéines occupent une place centrale dans l'organisation et le fonctionnement des systèmes vivants. Leur structure chimique, leur architecture tridimensionnelle et leurs interactions déterminent leur rôle dans les processus métaboliques, la signalisation cellulaire, la formation des membranes, ou encore la catalyse enzymatique.

Les glucides sont des molécules principalement constituées de carbone, d'hydrogène et d'oxygène. Leur structure, allant des monosaccharides simples aux polysaccharides complexes, conditionne leur fonction, qui peut être énergétique (glucose), structurale (cellulose), ou de stockage (glycogène). Les variations de configuration et les types de liaisons glycosidiques influencent fortement leurs propriétés biologiques.

Les lipides, caractérisés par leur hydrophobicité, jouent un rôle majeur dans la constitution des membranes cellulaires, le stockage de l'énergie et la signalisation. Leur structure variée et sont subdivisés en différents types tels que les acides gras, triglycérides, phospholipides ou stéroïdes cette structure détermine leur comportement physico-chimique et leur participation aux fonctions vitales telles que la perméabilité membranaire ou la transmission hormonale.

Les protéines, quant à elles, sont des macromolécules constituées d'acides aminés liés par des liaisons peptidiques. Leur structure est hiérarchisée en quatre niveaux : primaire, secondaire, tertiaire et quaternaire. Cette organisation tridimensionnelle confère aux protéines une grande diversité fonctionnelle, allant de la catalyse enzymatique à la signalisation, en passant par la structure cellulaire et le transport.

L'étude conjointe de ces macromolécules permet de comprendre comment la structure conditionne la fonction au niveau moléculaire. Ainsi, la biochimie structurale constitue un pilier essentiel pour l'analyse des mécanismes biologiques, la compréhension des pathologies liées à des anomalies moléculaires et le développement de nouvelles approches thérapeutiques.

Chapitre I :

Structure des glucides

Introduction

Les glucides appelés aussi les saccharides ou les sucres, sont les composés organiques les plus abondants sur la terre, ils sont formés par les organismes photosynthétiques (les plantes vertes, les algues et certaines bactéries) ; qui grâce à la photosynthèse, ils peuvent utiliser l'énergie lumineuse pour transformer le CO₂ en glucides, ces derniers sont ainsi utilisés comme des précurseurs à la biosynthèse des lipides, des protéines et des acides nucléiques. Du point de vue chimique on peut définir les glucides comme étant des polyhydroxyaldéhydes ou des polyhydroxycétones (ou des composés qui en dérivent), ou encore des polymères susceptibles de libérer ces mêmes composés par hydrolyse ; on distinguera ainsi les oses ou sucres simples et les osides dont l'hydrolyse livre plusieurs oses.

Classification

On classe habituellement les glucides en 2 grandes classes (figure 1).

- Les **OSSES** qui sont des sucres simples de formule brute **C_n(H₂O)_n**.
- Les **OSIDES** qui sont des molécules complexes formées de plusieurs oses (**oligosides**) ou polymères d'oses (**polyosides**) ou associées à d'autres types de molécules (**hétérosides** : glycoprotéines ou glycolipides...).

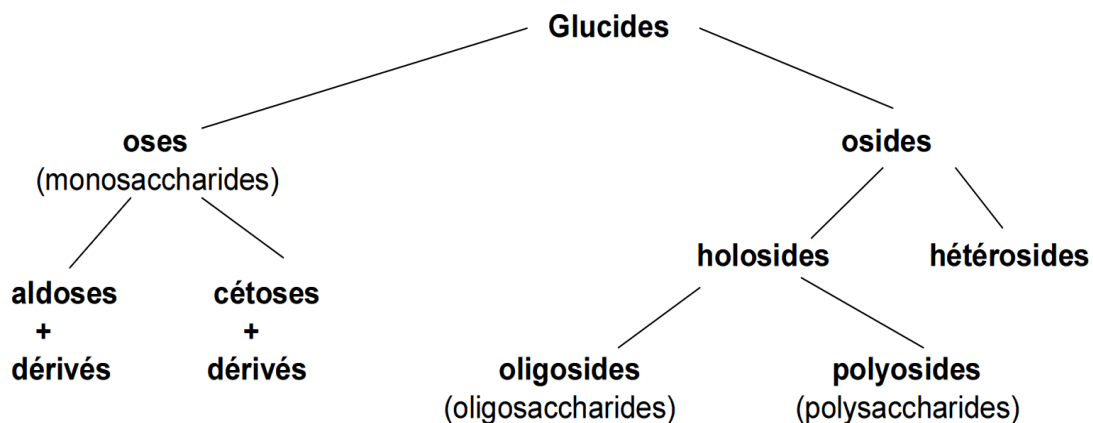


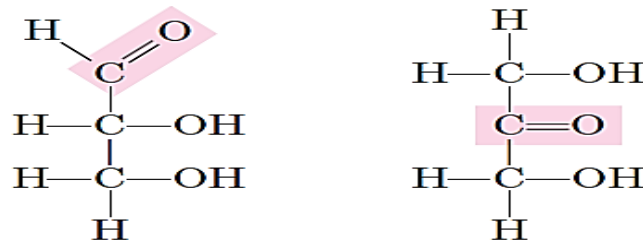
Figure 01 : Classification des glucides.

A. Oses

Les oses ou sucres simples (ou monosaccharides) sont des molécules comportant à la fois plusieurs fonctions alcooliques et une fonction réductrice, soit aldéhydique, soit cétonique. La classification des oses repose, d'une part, sur le nombre d'atomes de carbone de leurs molécules

(trioses, tétroses, pentoses, hexoses et cétooses) et, d'autre part, sur la nature de la fonction réductrice (aldoses et cétooses).

Les monosaccharides les plus simples sont ceux qui ont trois atomes de carbones, ce sont le D ou L- glycéraldéhyde, et la dihydroxyacétone (Figure 02).



D-Glycéraldéhyde Dihydroxyacétone

Figure 02: Structures des monosaccharides les plus simples.

I Epimérie des oses et pouvoir rotatoire

Si nous considérons la projection de la structure tridimensionnelle du glycéraldéhyde (Figure 3), nous constatons qu'il existe deux possibilités : dans un cas, l'hydroxyle porté par le carbone voisin de la fonction alcool primaire (cet atome de carbone est dit asymétrique car il porte quatre substituants différents, et il est signalé par un astérisque) est situé à droite du plan formé par la chaîne carbonée, c'est la configuration D ; dans l'autre cas, l'hydroxyle est situé à gauche de ce plan, c'est la configuration L. Ces deux formes sont l'image l'une de l'autre dans un miroir, elles représentent un couple d'isoméries optiques (ou d'**énantiomères**) dont les propriétés physiques et chimiques sont pratiquement toutes identiques.

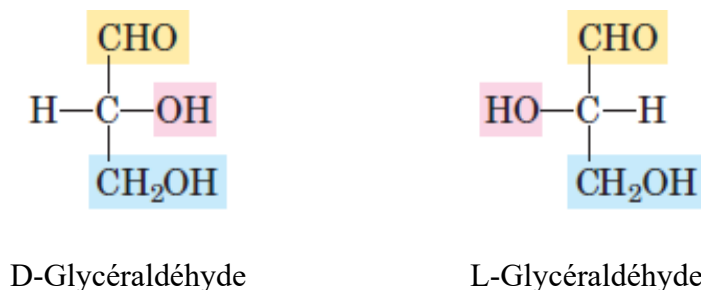


Figure 03: Projections des structures des configurations D et L du glycéraldéhyde (représentation proposée par Fischer).

La présence d'un carbone asymétrique (C*) entraîne l'existence d'une isomérisation optique. Pour chaque sucre simple, on aura 2 **énantiomères** : une molécule **D** et une molécule **L**. L'une est l'image de l'autre dans un miroir.

- Les oses naturels sont de la série **D**.
- Tous les oses possèdent au moins un C* asymétrique à l'exception du dihydroxyacétone.
- Lorsque le nombre d'atomes de carbone augmente, le nombre de carbone asymétrique (C*) augmente, car à l'isomérisation optique vient s'ajouter une isomérisation de position.
- Pour **n** carbone asymétrique, le nombre de stéréoisomères appartenant à la série **D** est **2ⁿ**.

✓ **Notion d'épimères**

Les **épimères** sont des stéréoisomères qui ne diffèrent entre elles que par la configuration d'un seul C*.

Exemples :

- le glucose et le mannose sont 2 épimères, ils diffèrent par la configuration du carbone 2 (Voir la figure 04).
- Le glucose et le galactose sont 2 épimères, ils diffèrent par la configuration du carbone 4.

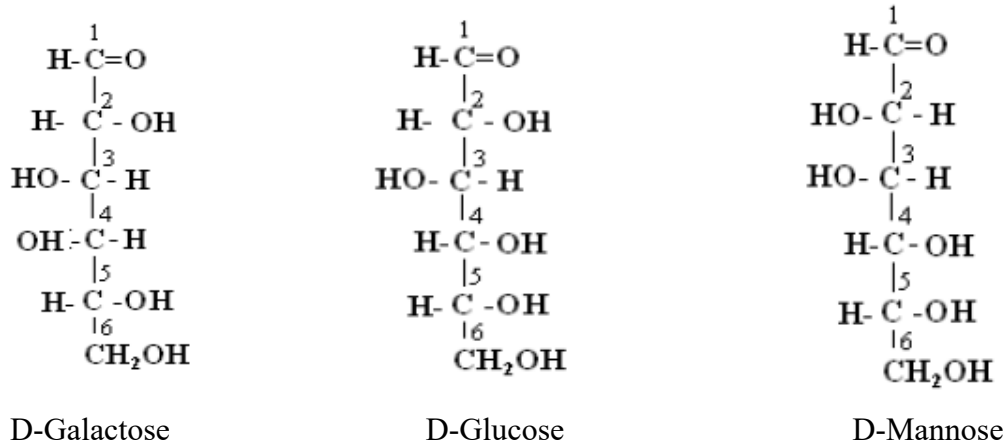


Figure 04 : structure des épimères.

✓ **Pouvoir rotatoire lié au carbone asymétrique (C*)**

Toute molécule chirale possède la particularité d'être optiquement active ou douée de pouvoir rotatoire ; traversée par un faisceau de lumière polarisée (Figure 05), elle provoque la rotation du plan de polarisation de la lumière à un angle α .

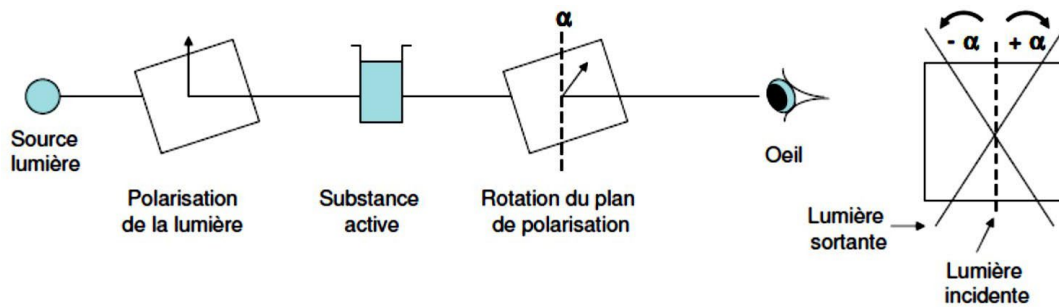


Figure 05 : Déviation de la lumière sous le polarimètre.

- **Pouvoir rotatoire spécifique:**

L'angle α de rotation est donné par la loi de Biot:

$$\alpha = [\alpha]^{20^\circ} \lambda \cdot L \cdot C$$

Avec :

$[\alpha]^{20^\circ}$: est le pouvoir rotatoire spécifique de la substance étudiée

L: est la longueur de la cuve polarimétrique exprimée en dm

C: la concentration de la solution étudiée en g/mL

$[\alpha]$: Pouvoir rotatoire en $^\circ \cdot \text{mL} / \text{dm} \cdot \text{mg}$

NB:

Le pouvoir rotatoire d'un mélange de substances est la somme des pouvoirs rotatoires de chaque substance.

- Lorsque la rotation est vers la droite le composé est dit dextrogyre et son pouvoir rotatoire est positif (+).
- Lorsque la rotation est vers la gauche le composé est dit lévogyre et son pouvoir rotatoire est négatif (-).

1 Aldose

Examinons le cas des *aldotétraoses* (aldose à quatre atomes de carbone). Nous pouvons appliquer la règle que nous venons d'énoncer, mais la situation est quelque peu compliquée par le fait qu'il y a deux atomes de carbone asymétriques. On aura les deux configurations D et L de l'érythrose (E1 et E2) formant un couple d'énantiomères car elles sont l'image l'une

de l'autre dans un miroir, et on aura de même les deux configurations D et L du thréose formant un couple d'énantiomères (T1 et T2) (Figure 06).

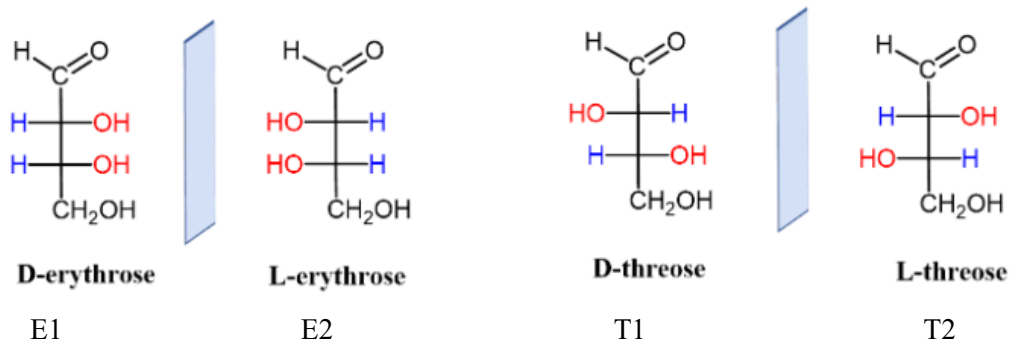


Figure 06 : Les aldotéoses : quatre stéréo-isomères.

➤ **Filiation des aldoses :**

Il est possible, en partant de l'un ou de l'autre des glycéraldéhydes, d'augmenter le nombre des atomes de carbone de la chaîne, unité par unité, pour obtenir des téoses (C4), des pentoses (C5) et des hexoses (C6). La voie de synthèse cyanhydrique dite méthode de Kiliani-Fisher permet de passer d'un ose à un homologue supérieur (Figure 07).

Les aldoses issus du D-glycéraldéhyde appartiennent à la série D alors que ceux dérivant du L-glycéraldéhyde sont dits de la série L.

Pour un aldose à n carbones, il existe 2^{n-2} stéréoisomères. L'alcool primaire et le carbone C1 associé à la fonction aldéhyde présentent une disposition symétrique.

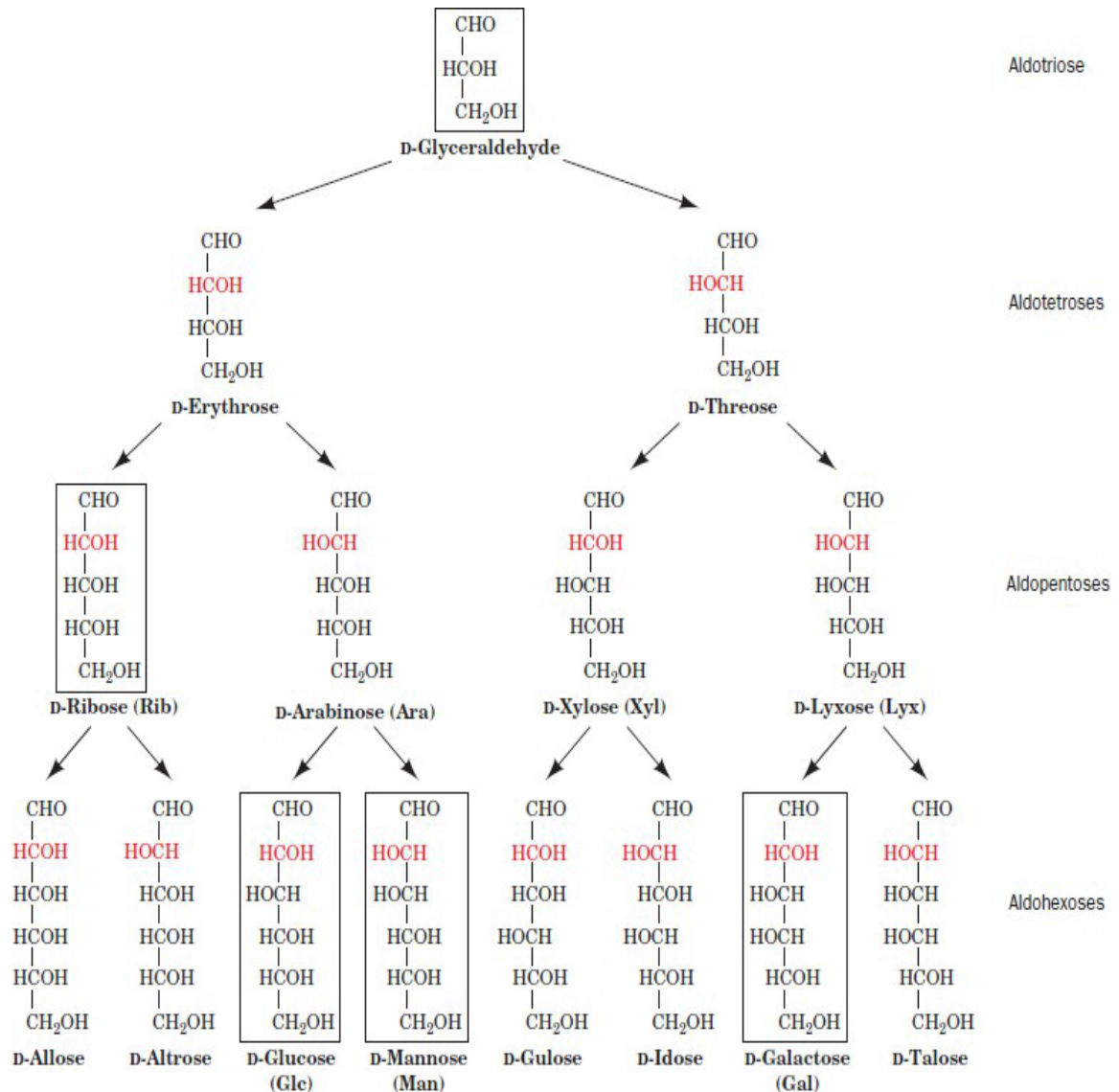


Figure 07 : Filiation des aldoses de Kiliani-Fisher.

2 Cétose

En ce qui concerne la configuration D et L des cétooses, la même règle déjà énoncée précédemment s'applique. On trouvera sur la figure 08 la structure de quelques cétooses jouant un rôle important dans le métabolisme glucidique. On remarquera qu'ils ont tous la fonction cétonique en position 2 et que à l'exception du fructose leurs noms comportent le suffixe *-ulose* qui est caractéristique des cétooses.

On notera que les deux cétopentoses représentés, le D-ribulose et D-xylulose, ne diffèrent que par la configuration au niveau d'un seul atome de carbone (le carbone 3), ce sont des *épimères*.

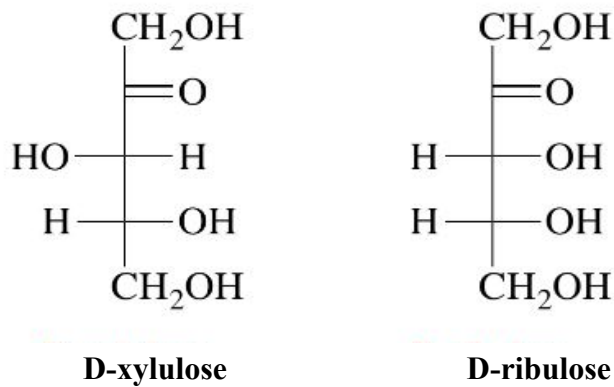


Figure 08: Configuration du D-xylulose et du D-ribulose (épimères).

- **Filiation des cétooses**

La filiation des cétooses commence à partir du céto-tétraose (Figure 09).

La différence concerne le nombre d'isomères obtenus : à nombre de carbones égal, les cétooses possèdent un carbone asymétrique (C^*) *de moins que les aldoses*.

Dans le cas d'une cétoose à n carbones, on obtient 2^{n-3} stéréoisomères. (3 pour les 2 alcools primaires en C_1 et C_n ainsi que le carbone portant la fonction cétone).

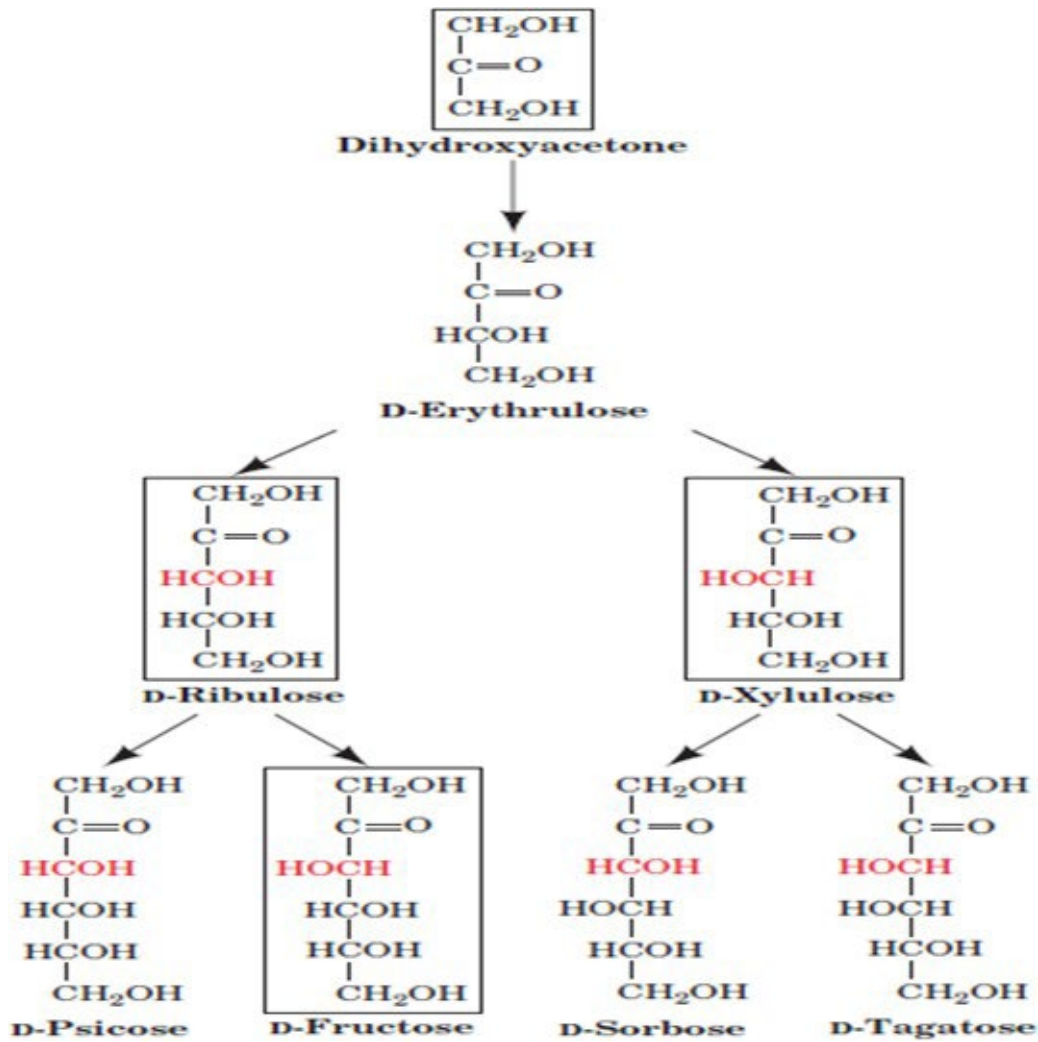


Figure 09: Filiation des cétooses de Kiliani-Fisher.

II Structure cyclique des oses

Jusqu'à présent, nous avons écrit la formule des oses sous format d'une chaîne linéaire. Mais cette représentation n'est pas satisfaisante car elle ne permet pas d'expliquer un certain nombre d'observations.

1. Le glucose et les autres aldoses, contrairement à la plupart des aldéhydes, ne recolorent pas la fuchsine décolorée par SO_2 (fuchsine de Schiff).
2. Le pouvoir rotatoire d'une solution fraîchement préparée de glucose change lorsqu'on l'observe au polarimètre (c'est ce qu'on a appelé la *mutarotation*). On a d'ailleurs isolé deux stéréo-isomères (ou anomères) du glucose : l' α -D-glucose ayant un pouvoir rotatoire spécifique $[\alpha]_D = +112,2^\circ$ et le β -D-glucose ayant un pouvoir rotatoire =

+18,7° ; mais, une fois en solution, chacune de ces deux formes subit une conversion, et on obtient finalement à l'équilibre un mélange des anomères α et β dont le pouvoir rotatoire est +52,7° à 20°C.

3. Quand un aldéhyde est traité par le méthanol en milieu acide, deux molécules de méthanol réagissent avec une molécule d'aldéhyde pour former un acétal (figure 10) :

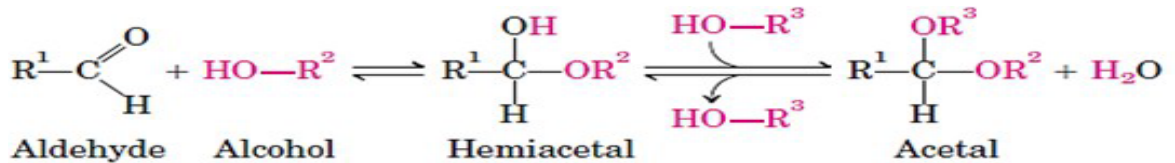


Figure 10 : Réaction de formation d'un acétal.

a. Cyclisation des sucres

Dans les glucides, les fonctions carbonyle et alcoolcoexistent au sein d'une même molécule, dotée d'une certaine flexibilité. Lorsqu'elles sont séparées par deux ou trois atomes de carbone, ces fonctions peuvent interagir entre elles pour former un hémiacétal intramoléculaire, à l'origine de la structure cyclique du sucre. Ce processus de cyclisation s'accompagne de la formation d'un pont oxydique interne, résultant de la création d'une liaison hémiacétalique après le retrait d'une molécule.

Il s'effectue une rotation de 90° autour de la liaison entre le C5 et le C6 de telle sorte que l'hydroxyle du C 5 se rapproche du groupement aldéhydique du C 1.

- La cyclisation des aldoses

L'hémiacétalisation intramoléculaire des aldoses résulte de la réaction entre le groupement carbonyle porté par le carbone C1 et une fonction hydroxyle située sur un autre carbone de la même molécule :

1. Lorsque la réaction implique le groupement hydroxyle du carbone C4, il se forme un cycle à cinq atomes (C1-C4) : le sucre adopte alors une forme furanose (Figure 11).
2. Si la réaction se produit avec le groupement hydroxyle du carbone C5, le cycle obtenu compte six atomes (C1-C5) : le sucre est alors sous forme pyranose (Figure 12).

Exemple du glucose :

Enlever ce qui figure sur la figure en haut sur la droite

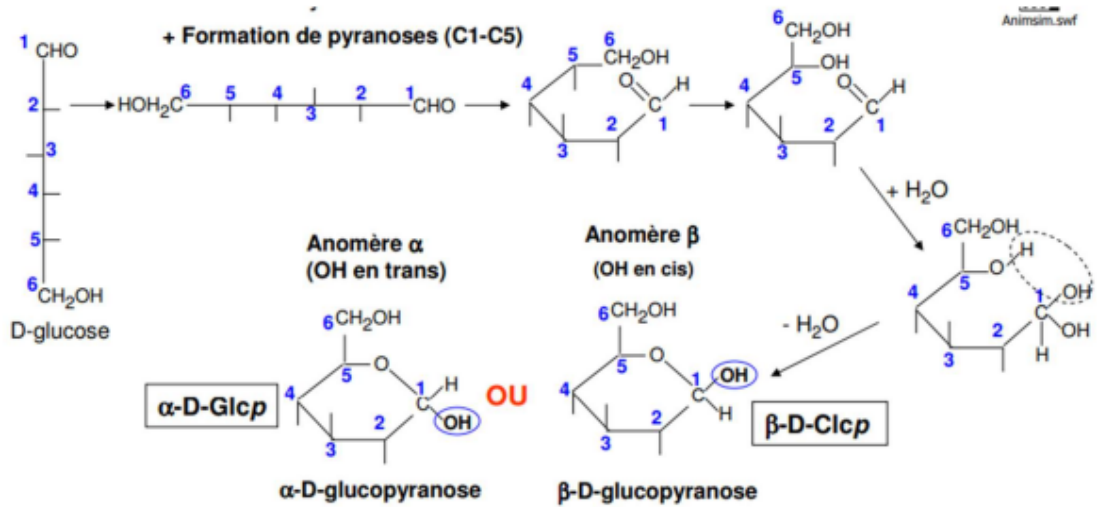


Figure 11 : Cyclisation des Aldoses en C1-C5.

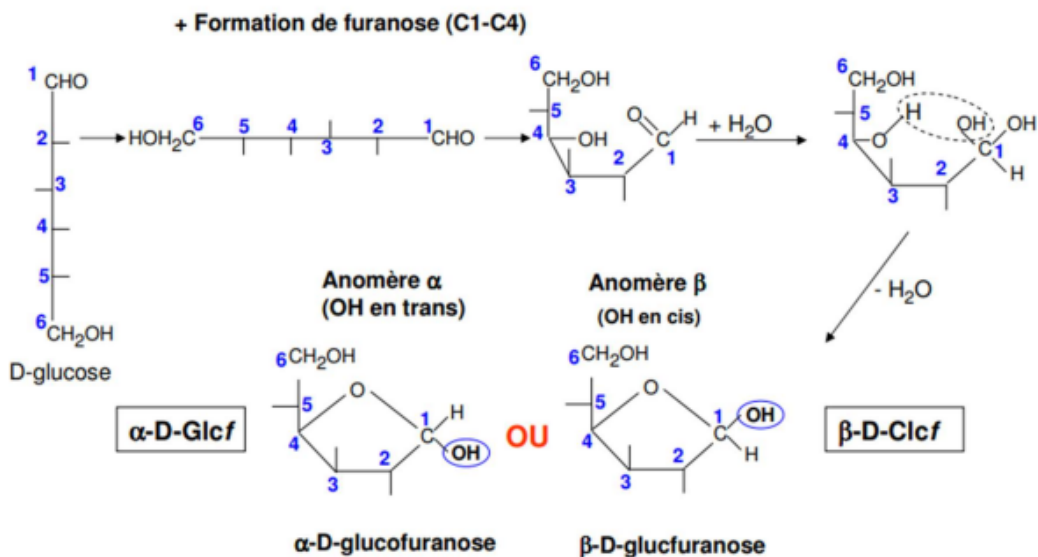


Figure 12 : Cyclisation des Aldoses en C1-C4

Lacyclisation des Cétoses

L'hémiacétalisation intramoléculaire des cétoses s'effectue par la réaction de la fonction carbonyle en C2 et la fonction hydroxyle en :

- 1- **C5 (C2-C5)**: un hétérocycle de 5 sommets est obtenu (1O et 4C) (figure 14) c'est un furanose.
- 2- **C6 (C2 et C6)**: un hétérocycle de 6 sommets est obtenu (1O et 5C) (figure 13) c'est un

pyranose.

Exemple du fructose:

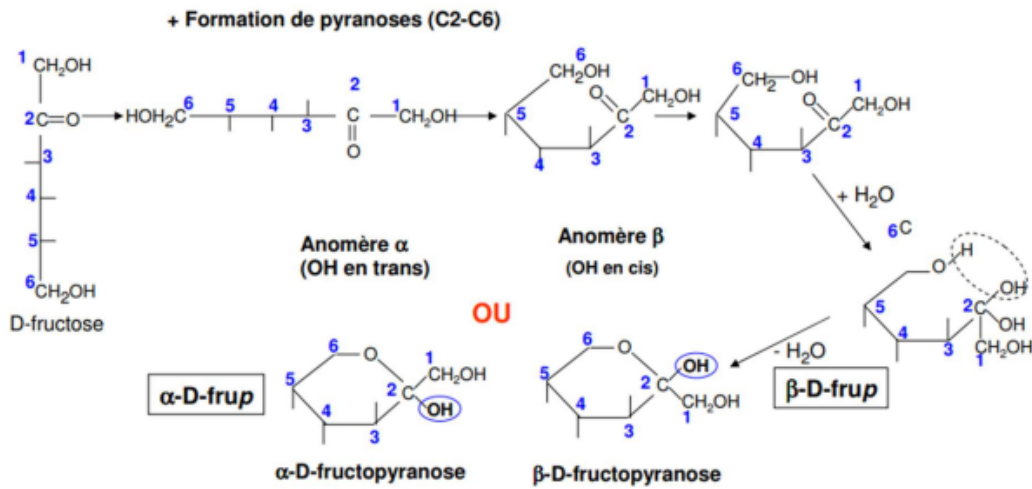


Figure 13 : Cyclisation des cétooses en C2-C6.

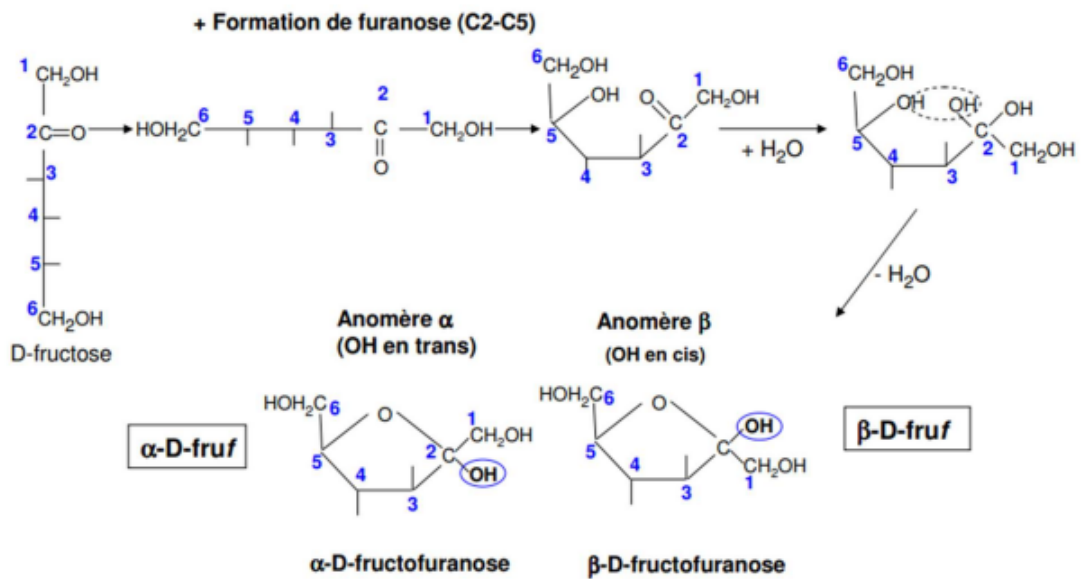


Figure 14 : Cyclisation des cétooses en C2-C5.

III Différents types d'oses

Les oses sont divisés en quatre catégories : les oses « neutre », les osamines, les acides uroniques et les acide sialiques (ou neuraminiques).

1 Oses « neutres »

On classe parmi les oses « neutres » les glucides qui ne possèdent, outre la fonction aldéhydrique ou cétonique, que des fonctions alcooliques. Ce sont, par exemple, le D-glucose, le D-galactose, le D-mannose, le D-xylose, etc.

Dans ce groupe figurent en outre les *désoses* qui sont des monosaccharides qui ont perdu 1 ou 2 oxygènes. Parmi eux, on peut citer les 6-désoxyhexoses que l'on peut considérer, soit comme des aldohexoses dont le $-CH_2OH$ terminal est remplacé par un $-CH_3$, soit comme des aldopentoses dont un hydrogène du carbone 5 est remplacé par un méthyl (exemples : le *L-rhamnose* ou 6-désoxy-L-mannose, le *L-fucose* ou 6-désoxy-L-galactose). Le plus important est un désoxy-pentose, le 2-désoxy-D-ribose, qui est l'ose trouvé dans les acides désoxyribonucléiques et qui dérive du D-ribose par simple remplacement de l'hydroxyle du carbone 2 par un hydrogène.

2 Osamines

Elles dérivent des oses par remplacement d'un hydroxyle (généralement celui porté par le carbone 2) par une fonction amine. On les rencontre souvent dans les polysides. Le groupement aminé est fréquemment acétylé. Sur la figure 15 sont présentées les structures des quatre hexosamines les plus courantes (la structure de la glucosamine et celle de l'acide muramique, un constituant de la muréine des parois bactériennes sont représentées sous la forme N-acétylée).

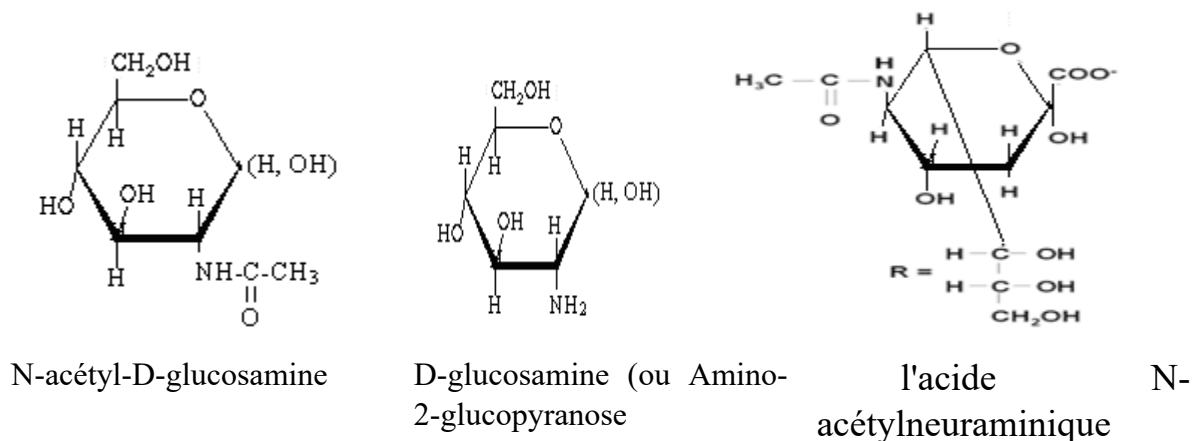


Figure 15: Structure de quelques hexosamines.

3 Acide uroniques

Les *acides uroniques* dérivent des aldoses par oxydation de la fonction alcool primaire en fonction carboxylique (et conservent donc la fonction aldéhydique) on connait également les acides provenant de l'oxydation de la fonction aldéhydique exemple : l'acide D-gluconique (voir la figure 16), et les diacides formés par l'oxydation de la fonction alcool primaire et de la fonction aldéhydique, mais ils sont moins importants.

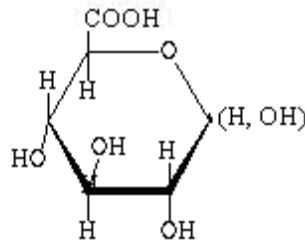


Figure 16 : α ou β Acide-D-glucuronique.

4 Acide sialiques

Les acides sialiques (ou neuraminiques) sont des dérivés (en général acétylés) de l'acide neuraminique, lui-même formé d'une molécule d'acide pyruvique (carbones 1, 2, 3) condensée avec une molécule de D-mannosamine (carbone 4 à 9). Si le groupement aminé de cette osamine est acétylé, on obtient l'acide N-acétyl-neuraminique (Figure 17). Les autres acétylations, conduisant à divers acides sialiques, portent sur des hydroxyles (notamment en 4 et en 7). Les acides sialiques sont des constituants de divers glycoprotéines et glycolipides.

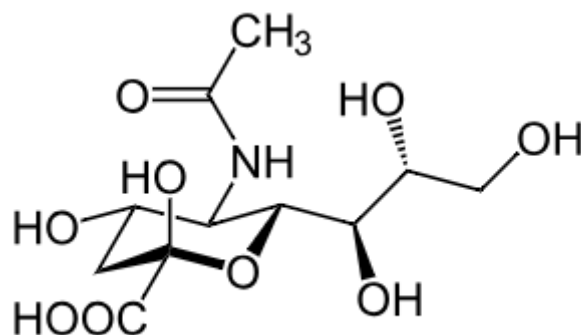


Figure 17: Structure l'acide sialique (ou neuraminique).

IV Composés dérivés des oses

1 Acide L-ascorbique (vitamine C)

L'examen de sa structure (Figure 18) révèle qu'il s'agit de la γ -lactone d'un acide hexonique (lui-même dérivant d'un aldohexose par oxydation de la fonction aldéhyde en acide). Il est en outre caractérisé par l'existence d'une double liaison entre deux atomes de carbone porteurs chacun d'un hydroxyle (ène-diol). C'est une substance qui s'oxyde facilement en acide déhydroascorbique (réaction réversible), ce qui lui permet de participer aux processus d'oxydoréduction cellulaires et d'être un additif alimentaire antioxydant.

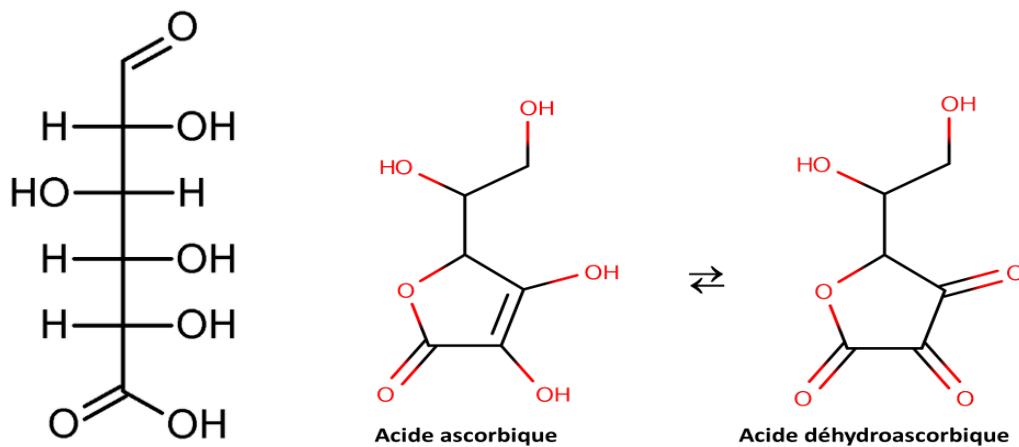


Figure 18: Structure de quelques oses acides et de quelques acides dérivés des oses.

2 Polyalcools (ou polyols)

Par réduction du groupement aldéhyde ou cétone en fonction alcool, on obtient des polyalcools. C'est ainsi que la réduction du D-glucose donne le D-glucitol (plus couramment appelé sorbitol), celle du D-mannose le mannitol, celle du D-ribose donne le ribitol (que l'on trouve dans la molécule de la riboflavine). Le composé à trois atomes de carbone, le glycérol, que l'on peut considérer comme produit de réduction du glycéraldéhyde ou de la dihydroxyacétone (et qui en fait dérive de cette dernière) est un trialcool dont l'importance métabolique est considérable et dont nous aurons l'occasion de reparler dans le chapitre des lipides.

Enfin, on peut mentionner l'existence de polyalcools cycliques, appelés cyclitols. Le représentant de ce groupe le plus fréquemment rencontré dans la nature est le myo-inositol (Figure 19), que l'on trouve soit à l'état libre soit hexa-estérifié par l'acide

phosphorique (c'est l'acide phytique qui existe sous forme de sel complexe de Ca^{2+} et Mg^{2+}).

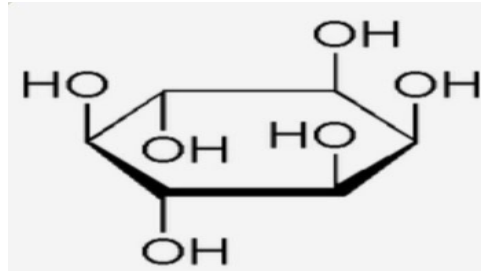


Figure 19: Structure du myo-inositol, un des isomères du méso-inositol (hexa-alcool dérivé du cyclohexane).

V Nomenclature des oses

Des règles internationales régissent actuellement la nomenclature des oses. Généralement, le nom courant du glucide est utilisé en précisant :

- La nature de l'anomérisation (α ou β) ;
- La forme du cycle (pyrane ou furane) ;
- L'appartenance à la série D ou L ;
- Le pouvoir rotatoire. Ex : α -D(+) glucopyranose

VI Conformation spatiale des oses

En réalité le cycle pyrane n'est pas plan. Il présente deux conformations possibles, en bateau ou en chaise voir la figure 20 :



Figure 20 : Forme bateau (1) et la forme chaise (2) du cycle pyrane.

La forme chaise est moins tendue et, elle est donc thermodynamiquement la plus probable, car la forme bateau est moins stable. On admet actuellement que les oses adoptent cette configuration.

VII Propriétés physicochimiques des oses (ou monosaccharides)

La présence dans un ose de deux groupements chimiques différents, permet plusieurs réactions chimiques, cette propriété peut être utilisée dans le dosage des oses.

1 Oxydation des monosaccharides

1.1 Oxydation de la fonction aldéhyde en fonction acide carboxylique

En milieu alcalin (OH^-), et à chaud la fonction aldéhyde des monosaccharides, est oxydée par des ions métalliques (Cu^{+2} ou Ag^+), en fonction acide carboxylique, on obtient ainsi un acide aldonique (Figure 21). L'ose oxydé est appelé, un sucre réducteur.

Ainsi le glucose donne l'acide gluconique, le galactose l'acide galactonique, le mannose l'acide mannonique ...

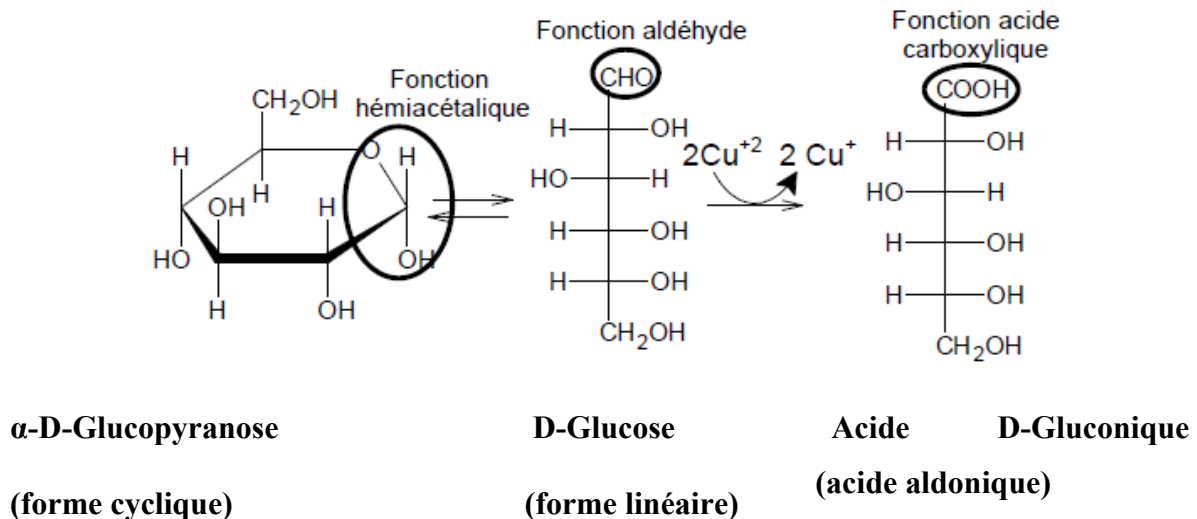


Figure 21: Oxydation du D-glucose en acide D-gluconique.

1.2 Oxydation de la fonction aldéhyde et la fonction alcool primaire en acide carboxylique

A chaud et en présence de l'acide nitrique (HNO_3), un oxydant puissant, deux fonctions du monosaccharide sont oxydées en fonctions carboxyliques, la fonction aldéhyde et la fonction alcool primaire, l'acide obtenu est appelé un acide aldarique (Figure 22). Ainsi, le glucose donne l'acide glucarique, le galactose donne l'acide galactarique...

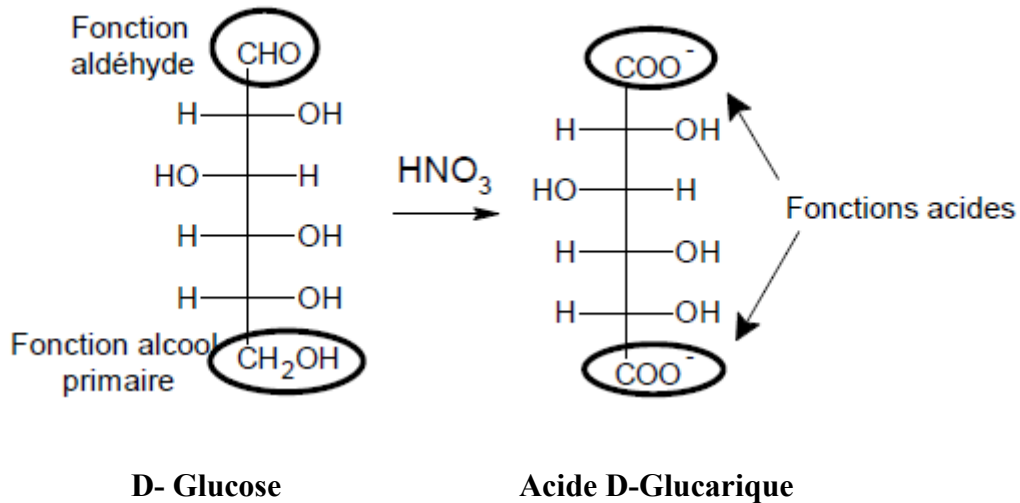


Figure 22 : Oxydation du D-glucose en acide D-glucarique.

1.3 Oxydation de la fonction alcool primaire en fonction acide carboxylique

En présence d'enzyme, la fonction alcool primaire des monosaccharides comme le glucose, le mannose et le galactose sont oxydées, pour former **les acides uroniques** comme l'acide glucuronique (Figure 23), l'acide mannuronique et l'acide galacturonique respectivement. Ces acides sont des constituants des glycolipides et des glycoprotéines animales.

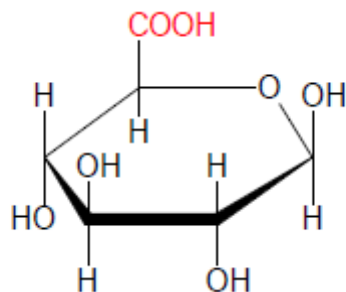


Figure 23 : Acide β -D-glucuronique.

2 Réduction des oses (ou monosaccharides)

La réduction des oses (par hydrogénation catalytique, ou par action de l'hydrure de bore et de sodium ou de Lithium NaBH_4 ou LiBH_4) donne des polyalcools.

- les aldoses donnent un seul polyalcool
- les cétooses donnent 2 polyalcools épimères en C2.

Exemple : la réduction du D-glucose donne le D-glucitol (Figure 24), la réduction du D-fructose donne deux polyalcools épimères en C2 (Figure 25).

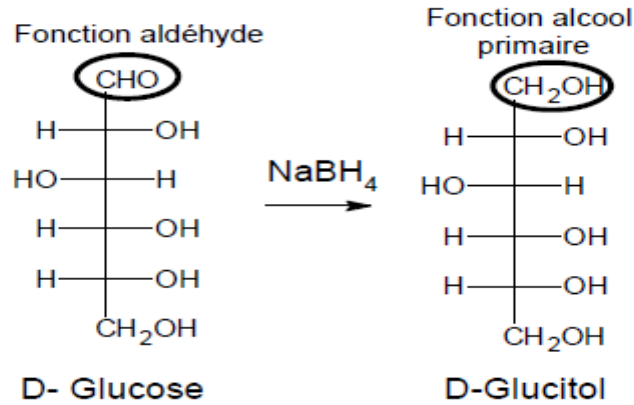


Figure 24 : Réduction de D-glucose (un aldose).

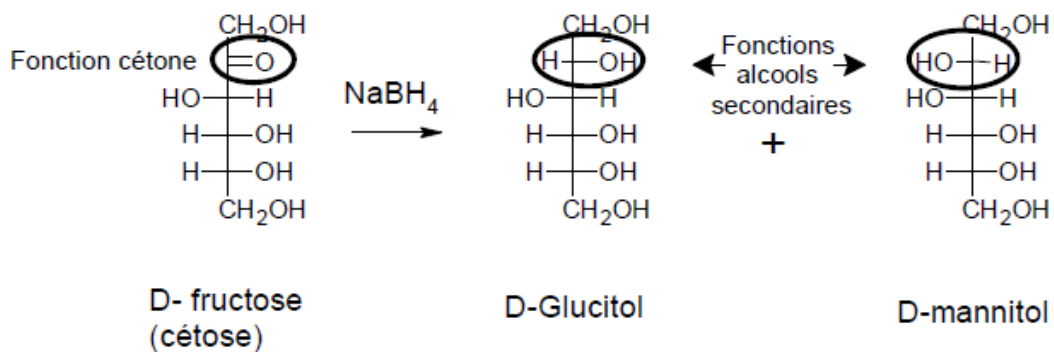


Figure 25: Réduction du fructose en D-glucitol et D-mannitol.

3 Formation d'ester (réaction d'estérification)

Les ester phosphoriques des oses ont une très grande importance dans le métabolisme des glucides. Le plus souvent c'est la fonction alcool primaire qui est estérifiée : on a par exemple le glucose-6-phosphate, le fructose-1-phosphate, le fructose-6-phosphate, le fructose-1, 6-bisphosphate, le ribose-5-phosphate, le ribulose-5-phosphate, le glycéraldéhyde-3-phosphate, le dihydroxyacétone-phosphate, etc.

La fonction semi-acétalique peut également être estérifiée (exemple : le glucose-1-phosphate) et, dans certains cas, l'ose est estérifié à la fois sur sa fonction semi-acétalique et sur fonction alcool primaire (exemple : le 5-phosphoribosyl-1-pyrophosphate).

4 Alkylation

En présence d'agents alcalins (soude, oxyde d'argent, diméthylformamide) et de sulfate ou d'iodure de méthyle, les hydroxyles libres des oses sont remplacés par des groupements méthoxy (OCH₃). L'alkylation ne porte pas sur les OH bloqués, comme celui qui est engagé

dans le pont oxydique ou comme ceux qui sont, dans les molécules d'oligo- ou de polysaccharides, conjugués par une liaison glycosidique. Cette propriété est mise à profit dans la détermination des modalités de la liaison entre les molécules d'oses chez les osides.

Exemple : La perméthylation du glucose par le sulfate de méthyle $[(\text{CH}_3)_2\text{SO}_4]$ ou l'iodure de méthyle (CH_3I) .

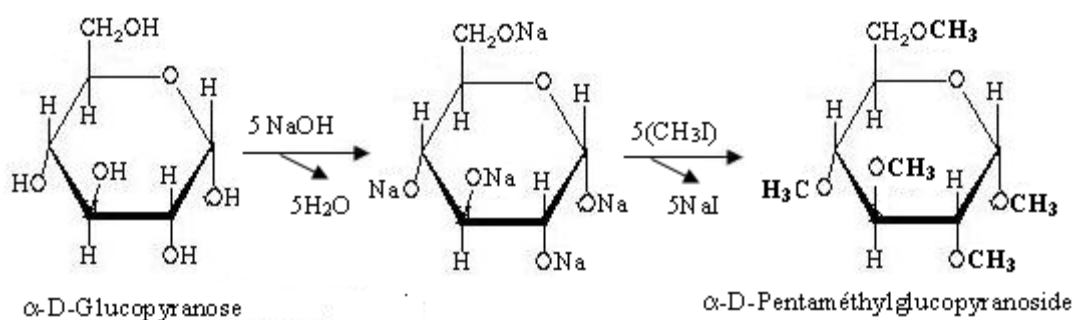


Figure 26: La perméthylation du glucose par le sulfate de méthyle.

5 Action des acides concentrés

Sous l'action d'un milieu acide concentré et de la chaleur, les oses subissent une déshydratation suivie d'une réaction de cyclisation. Ainsi, les pentoses (C_5) donnent naissance à des composés furfuriques (furfurals), tandis que les hexoses (C_6) conduisent à la formation d'hydroxyméthylfurfural (Figure 27).

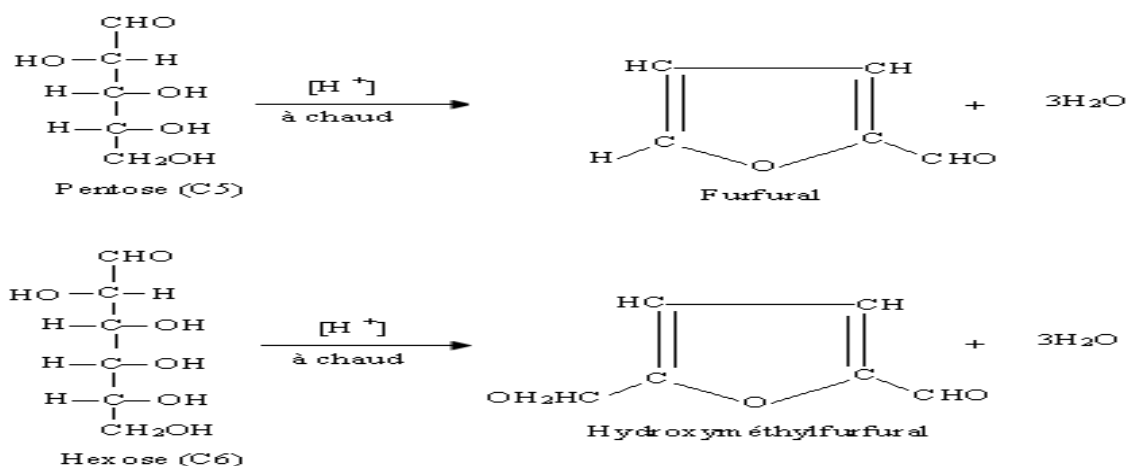


Figure 27: Formation d'un dérivé duhydroxyméthylfurfural et furfurique par l'action d'un acide concentré.

B LES OSIDES

Les osides sont des composés dont l'hydrolyse libère un ou plusieurs oses. On les subdivise en :

- Les **holosides** qui donnent par hydrolyse exclusivement des molécules d'oses liés par des liaisons glycosidiques. Ils comprennent :
 - a. **Les oligosides** : composés de 2 à 10 molécules d'oses
 - b. **Les polysides** : composés de plus de 10 molécules d'oses.
- Les **hétérosides** : dont l'hydrolyse libère, outre des oses, des substances non glucidiques ou aglycones.

I Holosides

Les holosides sont donc constitués exclusivement d'oses. En fonction du nombre de molécules d'oses libérées lors de l'hydrolyse, on distingue les diholosides, triholosides, etc. Dans cette partie, l'attention sera portée principalement sur deux catégories: les diholosides et les polyholosides.

1. Diholosides

On distingue deux types de diholosides naturels, en fonction du mode de liaison entre les deux unités d'oses :

- **Les diholosides réducteurs** : la fonction semi-acétalique de l'un des oses est engagée dans une liaison osidique avec une hydrolyse alcoolique du deuxième ose. Le caractère réducteur du premier a disparu, mais celui du deuxième ose subsiste, ce qui donne un pouvoir réducteur à la molécule de diholoside.
- **Les diholosides non réducteurs** : les deux oses sont liés par leurs fonctions semi-acétaliques ; le diholoside n'a pas de pouvoir réducteur, ce qui indique directement quelle est sa structure.

En revanche, pour déterminer la structure d'un diholoside réducteur, il faut le soumettre à une méthylation, puis à une hydrolyse, et caractériser les tri- et tétra-méthyl-oses obtenus (seuls, les hydroxyles libres auront été méthylés).

Comment nommer un disaccharide ?

- Commencer par le premier monosaccharide, qui est engagé dans la liaison glycosidique.
- Donner sa configuration α ou β .

- Donner son nom, avec la série D ou L.
- Préciser la forme du cycle 'pyrano' ou 'furano'.
- Indiquer entre parenthèse, les numéros des carbones liés par liaison glycosidique, avec une flèche, ex (1→4).
- Donner le nom du deuxième monosaccharide (configuration α ou β , la série D ou L et la forme du cycle).

A. Diholosides réducteurs

- **Maltose** : Il est formé de l'union de deux molécules de D-glucose par une liaison α -1,4-glycosidique. C'est un α -D-glucopyranosyl-(1→4) β -D-glucopyranose ou α -D-glucopyranosido (1→4) α ou β -D-glucopyranose (Figure 28).

La fonction semi-acétalique qui reste libre (à droite sur la figure) peut, en solution exister sous deux configurations qui sont en équilibre : la forme α (maltose α) et la forme β (maltose β). L'autre fonction semi-acétalique, par contre, est figée dans la liaison α -1,4-glycosidique. Cette fonction semi-acétalique restée libre est responsable du pouvoir réducteur du maltose.

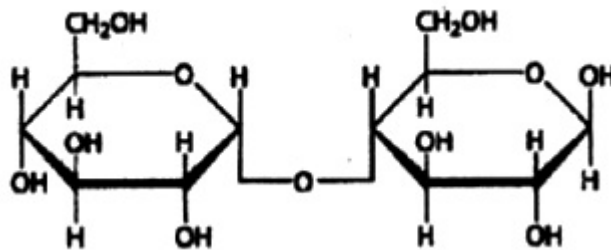


Figure 28 : Structure de maltose ou α -D-glucopyranosyl-(1 4) β -D-glucopyranose ou α -D-glucopyranosido (1 4) β -D-glucopyranose.

- **Lactose** : on le trouve dans le lait des mammifères. Il est formé par la liaison d'une molécule de D-galactose (engagée par sa fonction semi-acétalique) et d'une molécule de D-glucose (engagée par son hydroxyle en position 4) ; c'est une liaison β -1, 4-galactosidique (qui sera hydrolysable par une β -galactosidase) voir la figure 29.

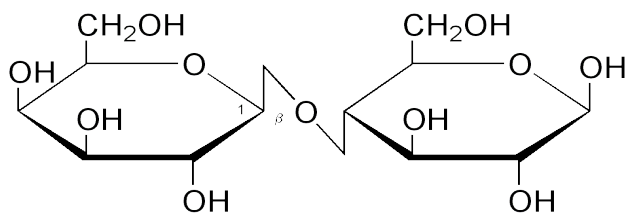


Figure 29 : Structure du lactose.

B. Diholosides non réducteurs

- **Saccharose** : c'est le plus répandu des diholosides non réducteurs, on le trouve dans de plusieurs plantes plus particulièrement dans la betterave et la canne à sucre (Figure 30). Il est formé par la liaison d'une molécule de D-glucose et d'une molécule de D-fructose, toutes deux engagées par leur fonction semi-acétalique dans la liaison osidique, et par conséquent il ne possède pas de pouvoir réducteur. Le saccharose est le : α -D-glucopyranosyl(1,2) β -D-fructofuranose.

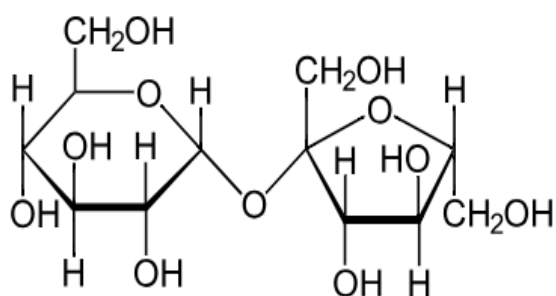


Figure 30: Structure de saccharose.

- **Tréhalose** : c'est un diholoside non réducteur qui donne, par hydrolyse acide ou par action d'une tréhalase, uniquement du glucose. Sa structure est celle α -D-glucopyranosido-glycopyranoside. Il est présent dans de nombreux champignons et algues, dans la levure et dans le sang et les muscles des insectes.

2. Triholosides

Le plus répandu est le raffinose, présent dans de nombreuses plantes et en particulier la betterave où il accompagne le saccharose (on peut l'obtenir à partir des fractions éliminées lors du raffinage du sucre de betterave). Il est formé d'une molécule de α -D-galactose liées par son groupement réducteur à la fonction alcool primaire d'une molécule de α -D-glucose,

laquelle est engagée par son groupement réducteur avec le groupement réducteur d'une molécule de β -D-fructose. Donc il est non réducteur.

Le raffinose est le : α -D-galactopyranosyl(1,6) α -D-glucopyranosyl(1,2) β -D-fructofuranose (Figure 31).

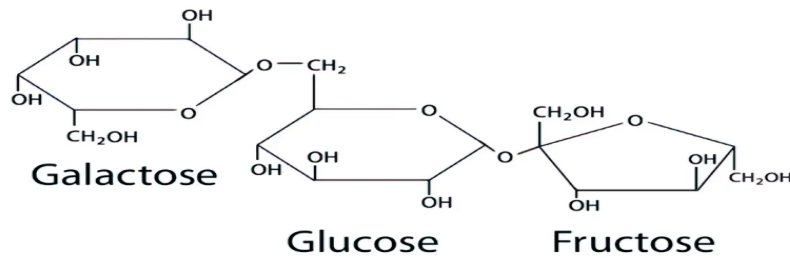


Figure 31: Structure du raffinose.

3. Polyholosides

Les polyholosides ou homopolyosides sont formé par condensation d'un grand nombre de molécules identiques d'oses.

➤ L'amidon

C'est la forme de réserve glucidique chez les végétaux. On le trouve souvent sous forme de grains d'amidon dont la morphologie varie selon l'espèce végétale. Le plus souvent il est formé de deux constituants :

➤ L'amylose

C'est un polyholoside à chaîne linéaire, formé d'unités de D-glucose liées par des liaisons α -(1,4)glucosidiques. Il possède une masse moléculaire qui varie de 150.000 et 600.000. Ces chaînes sont de longueur variable et peuvent s'associer par le jeu de liaisons hydrogènes qui s'établissent entre les hydroxyles, et former ainsi des structures assez compactes (Figure 32).

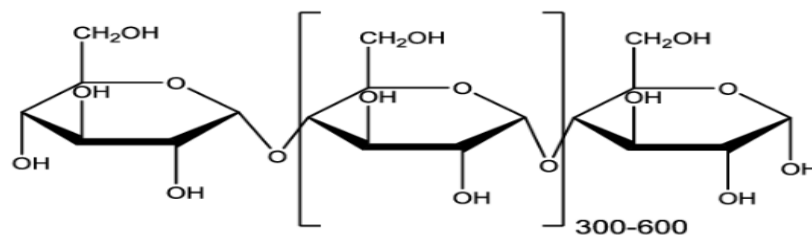


Figure 32 : Structure de l'amylose.

➤ **L'amylopectine (ou isoamylose)**

C'est des polyholosides dont la masse moléculaire peut atteindre plusieurs millions. Leur chaîne est formée d'une chaîne principale identique à celle de l'amylose, sur laquelle viennent s'attacher par des liaisons α -(1,6) glucosidiques des chaînes latérales (ramifications) ayant la même structure que la chaîne principale et dont la longueur varie de 20 à 25 unités de glucose (Figure 33). Il est à noter que certains amidons ne contiennent que l'amylopectine.

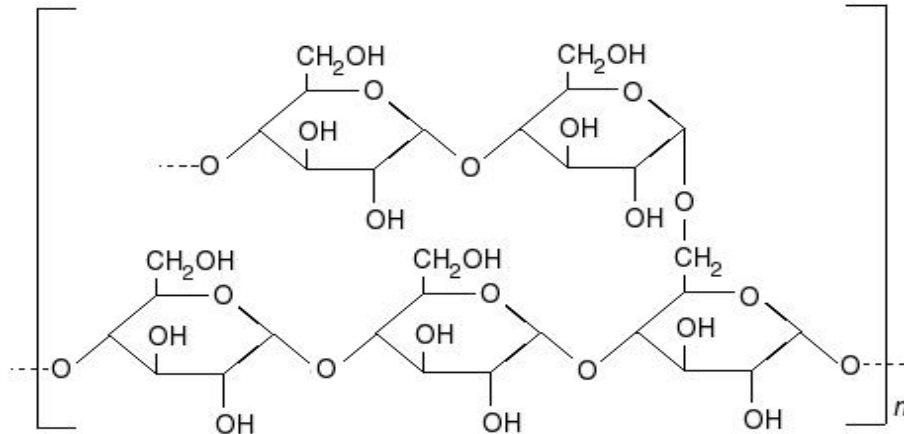


Figure 33: Structure de l'amylopectine.

➤ **Le glycogène**

C'est la forme de stockage du glucose chez les animaux (localisé essentiellement au niveau hépatique et musculaire) et dont la masse moléculaire peut atteindre plusieurs dizaines de millions. La structure du glycogène est la même que celle de l'amylopectine, cependant le glycogène est souvent plus ramifié et comporte donc davantage de liaisons α -(1,6) glucosidiques. La longueur moyenne des chaînes varie de 10 à 15 unités de glucose (Figure 34).

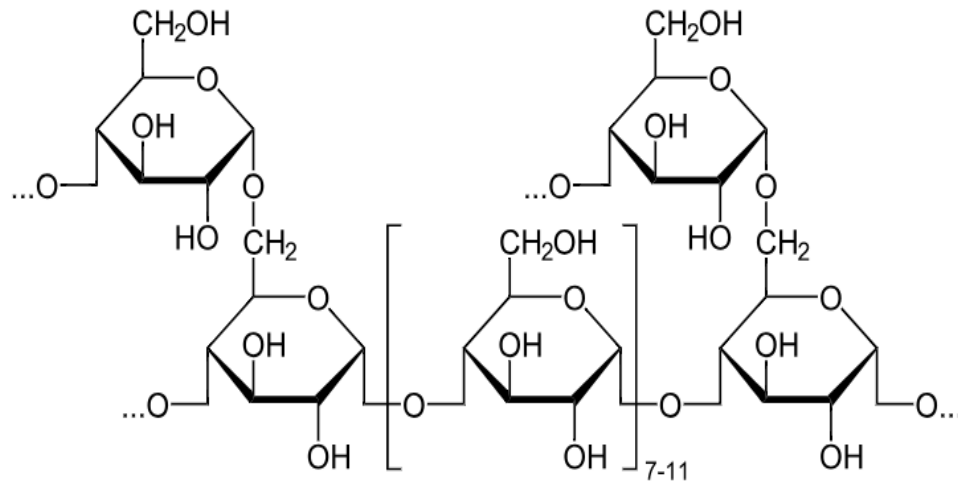


Figure 34 : Structure de glycogène.

➤ **La cellulose**

C'est la substance principale responsable de la structure des parois cellulaires des végétaux. Elle n'est pas hydrolysable par les enzymes présentes dans le tube digestif de l'Homme de sorte qu'elle n'a pas l'importance alimentaire de l'amidon. Cependant, les ruminants et divers insectesxylophages peuvent l'utiliser grâce aux microorganismes présents dans leurs tubes digestifs. La cellulose est constituée par des liaisons β -(1,4) glucosidiques. Ces chaînes s'associent étroitement les unes aux autres par des liaisons hydrogène formant ainsi des structures fibreuses compactes et insolubles. Le poids moléculaire minimum de la cellulose de différentes sources varie de 50.000 à 2.500.000 selon les espèces. Dans les parois des cellules végétales, les fibrilles de cellulose forment autour de la cellule un réseau serré de structures régulières et parallèles. Ces fibrilles sont cimentées par une substance fondamentale comportant trois autres polymères : l'hémicellulose, la pectine et l'extensine (Figure 35).

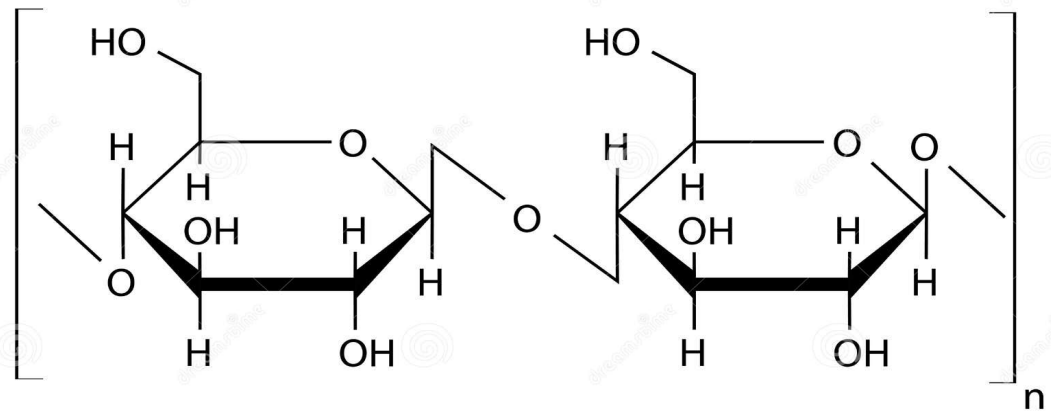


Figure 35 : Structure de cellulose.

➤ **Les dextrines**

Ces polyholosides sont formés d'unités de glucose liées en α -(1,6). Sur cette chaîne principale sont greffées par des liaisons α -(1,4) des chaînes plus courtes (Figure 36). On trouve les dextrines comme formes de réserve de diverses bactéries et levures. Suivant les espèces, les ramifications peuvent s'effectuer par différents types de liaisons : (1,2), (1,3) ou (1,4).

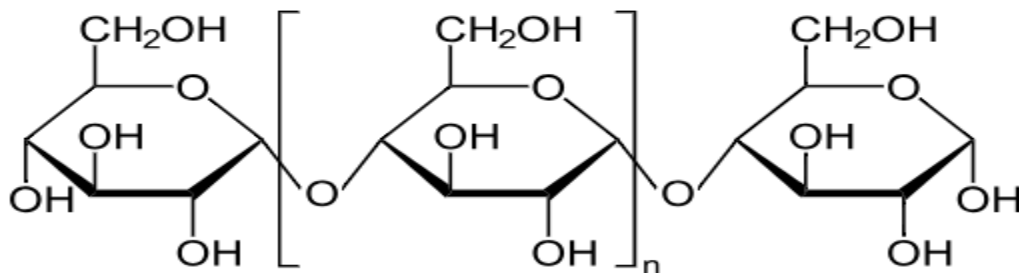


Figure 36: Structure de dextrine.

I. Hétérosides

Sont regroupés sous le terme d'hétérosides des molécules résultant de l'association covalente de glucides avec d'autres types de molécules, sont désignés très souvent sous le terme de glycoconjugués. On peut distinguer :

- **Les glycolipides** : polysides liés à des lipides ;
- **Les protéoglycannes (PG)** : polysides très longs (les glycosaminoglycannes) associés à une protéine en restant très majoritaires (> 90%) ;
- **Les glycoprotéines (GP)** : protéines portant des chaînes glucidiques courtes (1 à 20%);

- **Les peptidoglycannes** : polysides reliés par de nombreux petits peptides ;

- **Les protéines glyquées** : produits de la fixation chimique d'une unité de glucose. L'hyperglycémie du diabète insulinaire favorise la fixation de cet ose sur les protéines plasmatiques (marqueur du diabète).

Chapitre II :

Structure des lipides

Définition

Les lipides forment un groupe très hétérogène de composés, dont les structures sont très différentes, et que l'on a réunis en raison de leur insolubilité dans l'eau et de leur solubilité dans les solvants organiques (éther, acétone, mélange de chloroforme-alcools, etc.). Ces critères de solubilité ne sont pas absolus. Aussi a-t-on défini les lipides comme des composés comportant dans leur molécule une chaîne aliphatique (chaîne formées de $-CH_2-$) d'au moins huit atomes de carbone. Seuls quelques acides gras à courte chaîne (comme l'acide butyrique, en C₄) font exception à cette règle.

I. Acides gras

On les trouve en petites quantités à l'état libre, mais en grandes quantités engagés dans des liaisons *ester* ou *amide*. En règle générale, ces acides sont monocarboxyliques (Tableau I), à chaîne linéaire non ramifiée comprenant un nombre pair d'atome de carbone (entre 4 et 40). Ils peuvent être saturés ou insaturés, et parfois hydroxylés ou ramifiés.

Tableau I : Les acides gras insaturés.

Le nom courant	Abréviation	Formule semi-développée	Symbole + Δ ou ω		
Acide myristoléique		CH ₃ (-CH ₂) ₃ -CH=CH(-CH ₂) ₇ -COOH	14:1	cis-9	5
Acide palmitoléique		CH ₃ (-CH ₂) ₅ -CH=CH(-CH ₂) ₇ -COOH	16:1	cis- Δ 9	7
Acide sapiénique		CH ₃ (-CH ₂) ₈ -CH=CH(-CH ₂) ₄ -COOH	16:1	cis- Δ 6	10
Acide oléique		CH ₃ (-CH ₂) ₇ -CH=CH(-CH ₂) ₇ -COOH	18:1	cis- Δ 9	9
Acide élaïdique		CH ₃ (-CH ₂) ₇ -CH=CH(-CH ₂) ₇ -COOH	18:1	trans- Δ 9	9
Acide trans-vaccénique		CH ₃ (-CH ₂) ₅ -CH=CH(-CH ₂) ₉ -COOH	18:1	trans- Δ 11	7
Acide linoléique	LA	CH ₃ (-CH ₂) ₃ (-CH ₂ -CH=CH) ₂ (-CH ₂) ₇ -COOH	18:2	tout-cis- Δ 9,12	6
Acide linolélaïdique		CH ₃ (-CH ₂) ₃ (-CH ₂ -CH=CH) ₂ (-CH ₂) ₇ -COOH	18:2	tout-trans- Δ 9,12	6
Acide α -linoléinique	ALA	CH ₃ (-CH ₂ -CH=CH) ₃ (-CH ₂) ₇ -COOH	18:3	tout-cis- Δ 9,12,15	3
Acide γ -linoléinique	GLA	CH ₃ (-CH ₂) ₃ (-CH ₂ -CH=CH) ₃ (-CH ₂) ₄ -COOH	18:3	tout-cis- Δ 6,9,12	6
Acide dihomog- γ -linoléinique	DGLA	CH ₃ (-CH ₂) ₃ (-CH ₂ -CH=CH) ₃ (-CH ₂) ₆ -COOH	20:3	tout-cis- Δ 8,11,14	6
Acide arachidonique	AA	CH ₃ (-CH ₂) ₃ (-CH ₂ -CH=CH) ₄ (-CH ₂) ₃ -COOH	20:4	tout-cis- Δ 5,8,11,14	6
Acide eicosapentaénoïque	EPA	CH ₃ (-CH ₂ -CH=CH) ₅ (-CH ₂) ₃ -COOH	20:5	tout-cis- Δ 5,8,11,14,17	3
Acide clupanodonique	DPA	CH ₃ (-CH ₂ -CH=CH) ₅ (-CH ₂) ₅ -COOH	22:5	tout-cis- Δ 7,10,13,16,19	3
Acide docosahexaénoïque	DHA	CH ₃ (-CH ₂ -CH=CH) ₆ (-CH ₂) ₂ -COOH	22:6	tout-cis- Δ 4,7,10,13,16,19	3

I.1 Types d'acides gras

I.1.1 Acides gras saturés

Ils ont pour formule générale : $CH_3 - (CH_2)_n - COOH$. Les plus fréquemment rencontrés sont l'acide palmitique (C₁₆) et l'acide stéarique (C₁₈). En plus faible concentration, on trouve les acides gras ayant 12 et 14 atomes de carbones et de 20 à 24 atomes de carbone. A côté des acides gras à nombre pair d'atomes de carbone, on trouve généralement en faibles quantités des acides gras ayant 15,17 ou 19 atomes de carbone.

I.1.2 Acides gras désaturés (insaturés)

La numérotation des acides gras se fait à partir du carboxyle terminal (carbone 1) vers le groupe CH₃ (carbone n). La double liaison est indiquée par le signe Δ , accompagné du chiffre correspondant au premier atome de carbone participant à la double liaison. On

utilise de plus en plus le signe « : » suivi du nombre de doubles liaisons, la place de celle-ci étant indiqué entre parenthèses.

Il existe aussi une nomenclature biochimique. Le carbone 1 est dans ce cas le méthyle terminal. La place de la dernière double liaison est indiquée par le le signe ω suivi du nombre d'atome du carbone existant jusqu'à cette double liaison.

Pratiquement, dans tous les acides gras désaturés biologiques, la double liaison à l'isomère *cis*. Les principaux acides gras désaturés sont :

A. Acides gras mono-insaturés

Les acides gras mono-insaturés correspondent aux formules générales suivantes :

Formule semi-développée : $\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_m-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_p-\text{COOH}$

Formule moléculaire est la suivante : $\text{C}_n\text{H}_{2n-2}\text{O}_2$

Exemples des acides gras mono-insaturés :

- *Acide oléique* (C_{18}), double liaison entre les C_9 et C_{10} ; on abrège : (C_{18}, Δ^9 , ou $18 : 1 (9)$ ou $18 \omega 9$, sa formule brute: $\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$.

$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_7-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_7-\text{COOH}$

- *Acide palmitoléique* (C_{16}), sa formule brute $\text{C}_{16}\text{H}_{30}\text{O}_2$

$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_5-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_7-\text{COOH}$

B. Acides gras polydésaturés (plusieurs doubles liaisons)

Les plus courants ont les doubles liaisons non conjuguées séparées par un groupe méthylène. Les végétaux peuvent cependant renfermer des acides gras à doubles liaisons conjuguées comme, par exemple, l'acide éléostéarique.

Acide linoléique ($\text{C}_{18}, \Delta^{9,12}$, ou $18 : 2 (9,12)$, ou $18 : 2 \omega 6$).

$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_4-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_7-\text{COOH}$

Acide linoléique ($\text{C}_{18}, \Delta^{9,12,15}$, ou $18 : 3 (9,12,15)$, ou $18 : 3 \omega 3$).

$\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_7-\text{COOH}$

Acide arachidonique ($\text{C}_{20}, \Delta^{5,8,11,14}$).

I.2 Propriétés physico-chimiques des acides gras

I.2.1 Propriétés physiques

- **Solubilité**

Les acides gras à courte chaîne (CC) sont solubles dans l'eau, puis la solubilité des acides gras baisse progressivement et ils sont insolubles à partir de 10C. Plus le nombre d'atome de carbone augmente plus les acides gras sont insolubles dans l'eau. Ils sont par contre solubles dans les solvants organiques apolaires (benzène, chloroforme,...). La solubilité des acides gras insaturés dans l'eau est supérieure à celle des acides gras saturés, surtout s'ils ont une configuration cis.

- **État : point de fusion et point d'ébullition**

Le point de fusion des acides gras augmente avec le nombre d'atomes de carbone et diminue quand le nombre de doubles liaisons augmente. Les acides gras sont liquides à 20°C si $n < 10$ et solides si $n \geq 10$ (Figure 37).

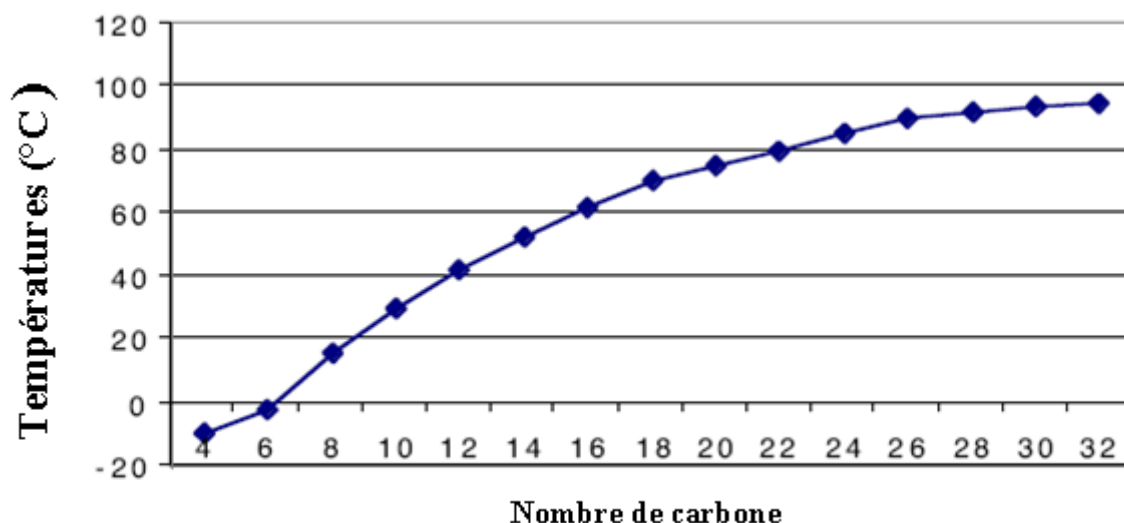


Figure 37: Température de fusion des acides gras.

- **Absorbance dans l'ultraviolet**

À l'état pur, les acides gras sont incolores. Ceux qui possèdent des doubles liaisons conjuguées présentent un spectre d'absorption caractéristique dans l'ultraviolet, dont le maximum dépend du nombre de liaisons : à 232 nm pour deux doubles liaisons conjuguées et à 268 nm pour trois. Les méthodes d'absorbance dans l'UV reposent sur la détermination des coefficients d'extinction spécifiques ($E_{1\% 1cm}$), permettant d'évaluer la présence de systèmes diéniques (hydroperoxydes) et triéniques conjugués (aldéhydes, cétones, etc.).

- **Volatilité**

Les acides gras à courte chaîne sont volatiles à température ambiante ; les acides gras à longue chaîne deviennent volatiles par chauffage.

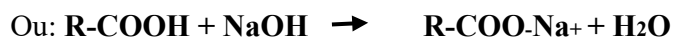
I.2.2 Propriétés chimiques

I.2.2.1. Propriétés dues à la présence du groupement carboxylique (-COOH)

- **Formation de sels (saponification)**

Le mot saponification provient du latin sapo (savon) qui dérivait lui-même du mot d'origine germanique saipon, désignant un mélange de suif et de cendres. Il traduit à la fois l'origine de cette réaction, c'est à dire l'interaction entre corps gras et composés basiques et son intérêt : la fabrication des savons.

La saponification correspond à l'hydrolyse des acides gras en présence d'une base forte (hydroxyde de sodium ou de potassium). Cette réaction conduit à la formation de sels alcalins d'acides gras, appelés savons, qui se caractérisent par leurs propriétés moussantes, mouillantes et émulsifiantes.



Indice de saponification (Is) : c'est la masse (m) de KOH en mg nécessaire pour neutraliser les acides gras libres de 1g de Matière Grasse (MG).

$$\text{Is} = (\text{m KOH} / \text{m MG}) \times 10^3$$

- **Formation d'esters (Estérification)**

En présence d'un alcool tel que le méthanol, les acides gras réagissent pour former des esters et de l'eau. La conversion des acides gras en esters méthyliques les rend plus volatils, ce qui permet leur fractionnement par distillation et leur séparation par chromatographie en phase gazeuse.

I.2.2.2 Propriétés dues à la double liaison

- **Hydrogénation**

L'objectif de cette opération permet de durcir un corps gras par saturation des chaînes insaturées d'acides gras qui le composent. Outre des caractéristiques de fusion modifiées, le corps gras hydrogéné présente une meilleure résistance à l'oxydation. La réaction d'hydrogénation est conduite en présence d'un catalyseur et s'accompagne de la formation d'acides gras trans qui font actuellement l'objet d'une vive polémique au niveau de leurs risques sur la santé humaine. Il faut noter que les industriels fabricants de margarine ont modifié récemment leur formulation afin de minimiser, voire de réduire à zéro, la teneur en acide gras trans de leurs produits.

L'addition de dihydrogène (H₂) à un acide insaturé conduit à un AG saturé.

Ex : Acide oléique (C18 :1) + H₂ = Acide stéarique (C18 :0).

Ce procédé est utilisé pour transformer des huiles comestibles d'acides gras insaturés en margarine.

- **Halogénéation**

Lorsqu'un acide gras mono-insaturé est traité par un halogène (I₂ ou Br) on obtient un dérivé dihalogéné. Ce procédé est utilisé pour évaluer l'insaturation d'un acide gras par addition d'iode.

L'indice d'iode correspond à la quantité, exprimée en grammes d'iode, qui se fixe sur les doubles liaisons contenues dans 100 g de corps gras, dans des conditions déterminées selon la méthode de Wijs. Ce principe repose sur la capacité des composés insaturés à réagir par addition avec le diiode (I₂) selon l'équation : R-CH=CH-R' + I₂ → R-CHI-CHI-R'. *Ex : Acide palmitoléique (C16 :1) en présence d'Iode.*



Toutefois, la réaction avec le diiode étant lente, on utilise à la place le monochlorure d'iode (ICl) dissous dans de l'acide acétique, connu sous le nom de réactif de Wijs. Une quantité connue d'huile, dissoute dans du tétrachlorure de carbone, est alors mise en présence d'un excès de ce réactif, qui se fixe sur toutes les doubles liaisons présentes dans les acides gras.



Après réaction complète, on ajoute un excès d'une solution d'iodure de potassium KI.

L'excès de réactif de Wijs transforme les ions iodure I^- en di iode I_2 selon la réaction :



Le di-iode est dosé avec une solution titrée en ion thiosulfate $S_2O_3^{2-}$. La réaction entre l'iode en excès et le thiosulfate de sodium est donnée ci-dessous :



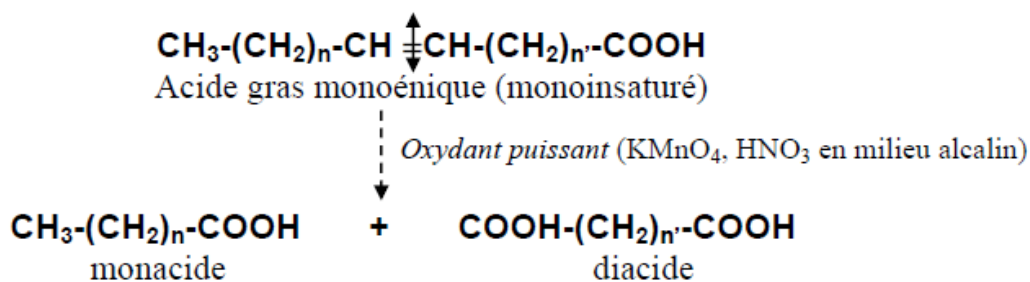
Pour mieux repérer l'équivalence, on verse quelques gouttes d'empois d'amidon qui colorent la solution en bleu foncé (présence de diiode). En fin de réaction, les déchets de réactifs de Wijs sont détruits par ajout d'eau selon la réaction :



Indice d'iode (Ii) : c'est la masse d' I_2 en g nécessaire pour saturer les doubles liaisons contenues dans 100 g de matière grasse. **Ii = (mI₂/m MG) X 100**. (Plus il y a de doubles liaisons, plus l'indice d'iode augmente).

- **Oxydation chimique**

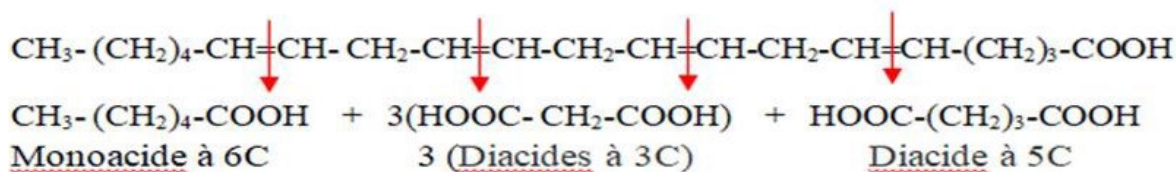
Les oxydants puissants ($KMnO_4$, HNO_3 en milieu alcalin) provoquent la scission de la molécule d'un acide gras insaturé en mono et diacides :



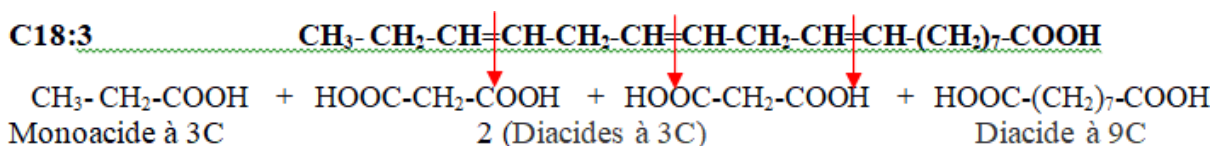
En présence d'un acide gras à **n** doubles liaisons, il y a formation de **n** diacides.

Exemples :

- L'oxydation poussée de l'acide oléique, on obtient :
 - l'acide pélargonique, monoacide en C9 : $\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_7-\text{COOH}$
 - l'acide azélaïdique, diacide en C9 : $\text{HOOC}-(\text{CH}_2)_7-\text{COOH}$
- **C20:4 (acide arachidonique)**



- C18 : 3 (acide linoléique)



- Auto-oxydation des huiles et des graisses insaturées

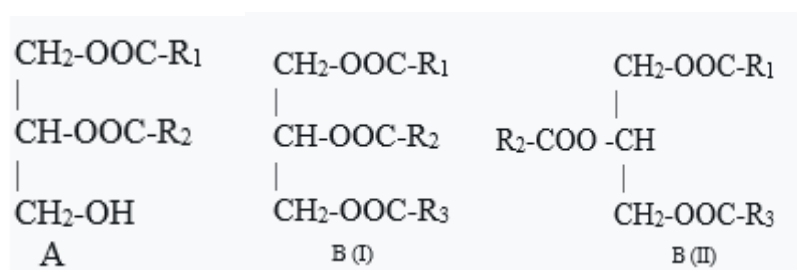
✓ L'oxydation des corps gras est un phénomène naturel qui altère leur qualité chimique, nutritionnelle et sensorielle. Elle se déroule généralement en deux étapes : **l'oxydation primaire** et **l'oxydation secondaire**, que l'on évalue respectivement par la mesure de **l'indice de peroxyde** et du **test TBA (acide thiobarbiturique)**. L'**oxydation primaire** correspond à la formation des premiers produits d'oxydation, principalement les **hydroperoxydes**, résultant de la réaction de l'oxygène avec les acides gras insaturés. Ces composés, bien que incolores et inodores, sont instables et se décomposent rapidement. Leur teneur est déterminée par **l'indice de peroxyde**, qui exprime la quantité d'oxygène actif combiné sous forme de peroxydes dans un échantillon donné. Cet indice constitue ainsi un bon indicateur du stade initial de l'oxydation. L'**oxydation secondaire**, quant à elle, se manifeste par la dégradation des hydroperoxydes en produits volatils tels que les **aldéhydes, cétones, alcools et acides organiques**, responsables du rancissement et de la dégradation organoleptique des huiles et graisses. Elle est évaluée par le **test TBA**, qui mesure la concentration en **malonaldéhyde**, un des principaux produits secondaires de l'oxydation lipidique. Ainsi, la combinaison de ces deux mesures **indice de peroxyde** pour les produits primaires et **test TBA** pour les produits secondaires permet de suivre efficacement l'évolution du processus d'oxydation des corps gras et d'évaluer leur état de conservation.

II. Glycérolipides

1. Glycérides (acyl-glycérols)

Ce sont les composés obtenus par estérification des fonctions alcool du glycérol par des acides gras. On distingue des mono-, des di- et tri acylglycérols (ou mono, di et triglycérides, ancienne nomenclature conservée en nutrition et en pathologie) voir la figure 38. En outre, les acyl-glycérols pourront différer par la nature et la position des acides gras estérifiés. Pour indiquer la position, on désigne les atomes de carbone du glycérol par 1,2 et 3.

Lorsque les acides gras estérifiés en position 1 et 3 sont différents, un centre d'asymétrie apparaît au niveau du carbone 2 et on peut donc avoir les isomères.



R1 : $-(\text{CH}_2)_{14}\text{-CH}_3$

R2 : $-(\text{CH}_2)_7\text{-CH=CH-}(\text{CH}_2)_7\text{-CH=CH-}(\text{CH}_2)_7\text{-COOH}$

R3 : $-(\text{CH}_2)_{16}\text{-CH}_3$

Figure 38: Structure d'un triglycéride.

2. Glycérophospholipides

On les appelle aussi *phosphatides* et ce sont les représentants les plus nombreux de la grande famille des phospholipides.

On les trouve en concentrations importantes dans les membranes cellulaires et subcellulaires de tous les organismes vivants.

A. Diacylphosphatides

❖ **Acides phosphatidiques :** Ils résultent de l'estérification du glycérol par deux acides gras et par l'acide phosphorique ; ce dernier n'ayant que l'une de ses acidités engagées, confère à la molécule un caractère acide (Figure 39).

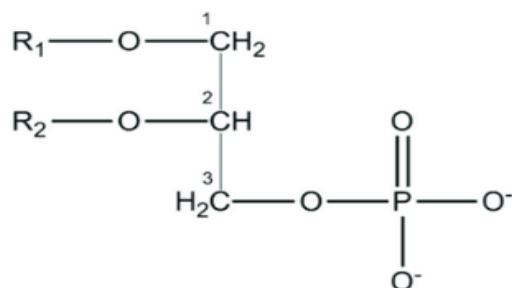


Figure 39: Structure de l'acide phosphatidique.

- ❖ **Phosphatidyl-choline (lécithine)** : comme on le voit sur la figure 40, ces composés comportent une molécule de choline (un composé à ammonium quaternaire ayant une fonction alcool) estérifiée par l'acide phosphorique, lequel est donc engagé dans une liaison phosphodiester.

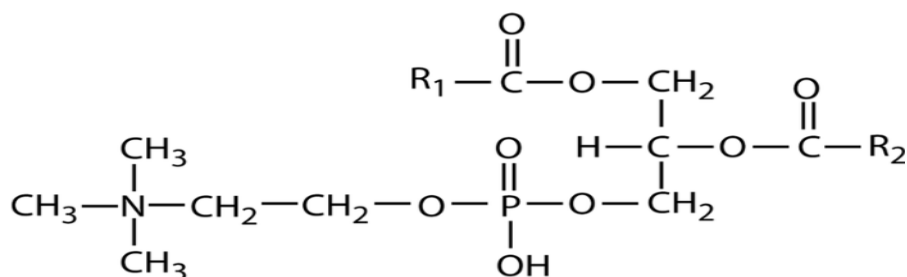


Figure 40: Structure du phosphatidyl-choline.

- ❖ **Autres phosphatides** : ce sont des composés très voisins des phosphatidylcholine, où la choline est remplacée par :
 - L'éthanolamine dans les phosphatidyl-éthanolamines (chez les Mammifères et les végétaux, le $-\text{NH}_2$ de la phosphatidyl-éthanolamine peut être acylé par un acide gras ;
 - la sérine dans les phosphatidyl-sérines.
 Ceux deux types de lipides forment ce que l'on appelait autrefois les « céphalines ».

La choline peut aussi être remplacée par certains alcools, comme le glycérol dans les *phosphatidyl-glycérols*, ou comme l'inositol, un polyalcool-cyclique, dans les *phosphatidyl-inositols*. Des dérivés importants de ces derniers phospholipides sont les phosphatidyl-inositol-4,5-diphosphates.

B. Phosphonolipides

Dans les membranes plasmiques de divers eucaryotes unicellulaires, les phosphatides classiques sont remplacés presque totalement par des phosphonolipides. Ce type de lipide est caractérisé par une liaison

phosphore-carbone. La figure 41 montre la structure du 2-aminoéthyl-phosphonolipides, analogue de la phosphatidyl-éthanolamine.

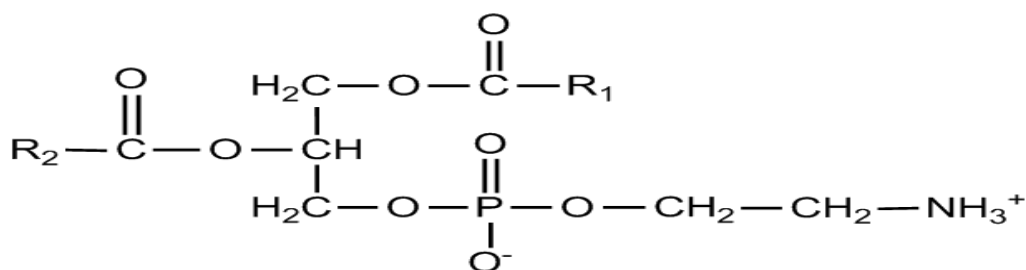


Figure 41: Structure de phosphatidyl-éthanolamine.

III Sphingolipides

L'alcool n'est plus ici le glycérol, mais un amino-alcool à longue chaîne. Le composé le plus fréquent est le *sphingosine* (figure 42) qui a 18 atomes de carbone et une double liaison en 4-5 (la numérotation se fait à partir de l'alcool primaire). On trouve aussi, mais moins fréquemment, la dihydrosphingosine (sphingosine saturée) et la phytosphingosine (la sphingosine saturée avec une fonction alcool supplémentaire en position 4 de la fonction alcool primaire). Cette dernière se retrouve surtout dans les glycolipides des végétaux et des animaux n'appartenant pas au groupe des vertébrés.

La sphingosine est liée à un acide gras par sa fonction amine formant une *céramide*. La liaison est donc une fonction amide, et non une fonction ester comme dans les glycérides, les stérides ou les phospholipides. L'acide gras des sphingolipides peut être un acide gras à longue chaîne, ayant ou non une fonction hydroxyle sur le carbone 2. Les céramides ont été trouvés en petites quantités à l'état libre dans de nombreuses cellules eucaryotes et procaryotes.

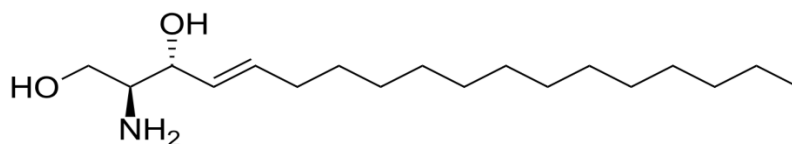


Figure 42 : structure de sphingosine.

1. Sphingomyélines

Le céramide est lié par sa fonction alcool primaire (carbone 1) à une phosphorylcholine (figure 43). Les sphingomyélines ont été trouvées dans la plupart des organismes. Elles sont présentes, comme les phosphatides, dans les membranes cellulaires et plus particulièrement dans la membrane plasmique.

Chez les mammifères, existe un analogue de la sphingomyéline dans laquelle la phosphoryl-choline est remplacée par une phosphoryl-éthanolamine.

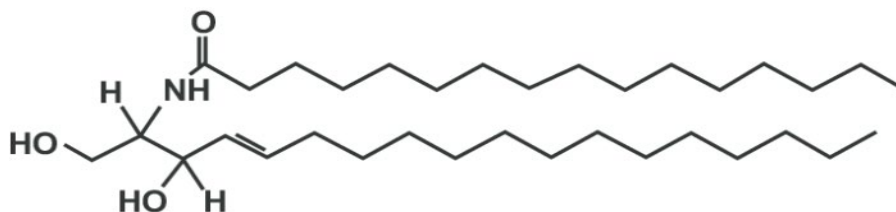


Figure 43: Structure de céramide.

2. Sphingoglycolipides

Ce sont des lipides caractérisés par la présence dans leur molécule d'un ou plusieurs oses liés au carbone 1 d'une céramide. L'ose est toujours fixé sur la céramide par sa fonction réductrice (Figure 44).

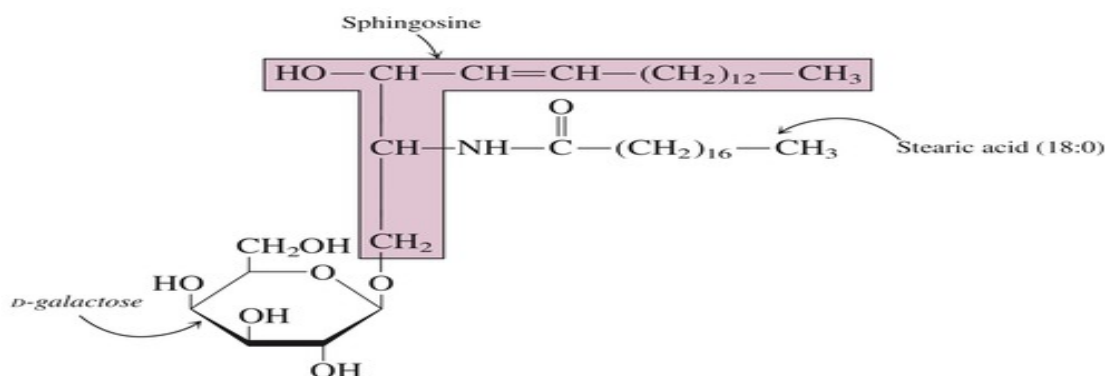


Figure 44 : structure d'un Sphingoglycolipides

IV Cérides

Ce sont les constituants des cires (cires végétales, cuticules des insectes, blanc de baleine, etc.). Ce sont des esters ayant jusqu'à 50 carbones formés par l'union d'acides gras et d'alcools à longue chaîne. Exemple : le palmitate de cétyle

Chapitre III :
Acides aminés, peptides et protéines

III.1. Généralités

Les protéines furent découvertes par le chimiste néerlandais Gerhard Mulder (1802-1880). Le terme protéine vient du grec ancien «*prôtos*» qui signifie *premier, essentiel*. Ceci fait probablement référence au fait que les protéines sont indispensables à la vie et qu'elles constituent souvent la part majoritaire (~60%) du poids sec des cellules. Les protéines adoptent en effet de multiples formes et assurent de multiples fonctions.

Elles sont des macromolécules biologiques et des constituants fondamentaux des organismes vivants. Elles sont des polymères formés de l'enchaînement d'acides aminés liées entre eux par des liaisons peptidiques. Ces protéines sont des molécules de haut poids moléculaire, la plupart sont comprises entre 25000D et 150000D, certaines possèdent des poids moléculaires plus bas ou beaucoup plus élevés.

Les protéines sont des éléments de première importance. En effet, elles remplissent des fonctions très diverses au sein de la cellule et de l'organisme. Elles permettent:

- *La catalyse enzymatique:* les enzymes ont un énorme pouvoir catalytique. Presque toutes les enzymes sont des protéines. Elles augmentent les vitesses de réaction d'au moins un million de fois.
- *Le transport et la mise en réserve:* beaucoup de petites molécules et d'ions sont transportés par des protéines spécifiques. L'hémoglobine transporte l'oxygène dans les érythrocytes, la myoglobine transporte l'oxygène dans les muscles. Le fer est transporté dans le plasma sanguin par la transferrine et mis en réserve dans le foie sous forme de complexe avec la ferritine.
- *Le mouvement coordonné:* les protéines sont les principaux constituants du muscle.
- *Le support mécanique:* la forte résistance élastique de la peau et de l'os est due à la protéine de collagène, qui est une protéine fibreuse.
- *La protection immune:* les anticorps sont des protéines très spécifiques qui reconnaissent et fixent les substances étrangères.
- *La production et la transmission de l'influx nerveux:* la réponse des cellules nerveuses est médiée par des protéines réceptrices. La rhodopsine est la protéine

photoreceptrice des cellules en bâtonnet de l'œil tandis que la propagation de l'influx nerveux se fait grâce à des protéines réceptrices au niveau de la synapse.

- *Le contrôle de la croissance et la différenciation* : Chez les bactéries, des protéines répresseurs, sont des éléments de contrôle qui réduisent au silence des segments spécifiques de l'ADN de la cellule. Dans les organismes supérieurs, la croissance et la différenciation sont contrôlées par des facteurs de croissance protéiques. Les activités des différentes cellules sont coordonnées par des hormones, telles que l'insuline et l'hormone qui stimule la thyroïde.

III.1.1. Acides aminés et peptides

III.1.1.1. Acides aminés

Les protéines sont formées à partir d'un répertoire de 20 acides aminés qui sont donc les éléments de base des protéines. Un acide aminé est constitué d'une fonction amine, d'un groupe carboxylique, d'un atome d'hydrogène et d'un groupe variable: R (Figure 45). Les chaînes latérales se différencient par leur dimension, leur forme, leur charge, leur capacité à contracter des liaisons hydrogène et leur réactivité chimique. En solution à pH neutre, les acides aminés se trouvent essentiellement sous forme d'ions dipolaires.

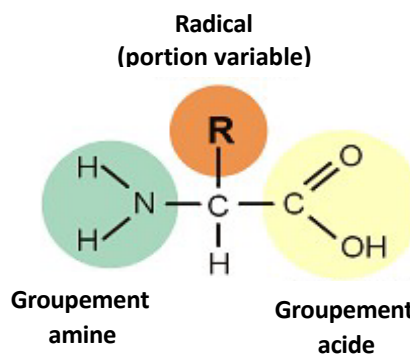
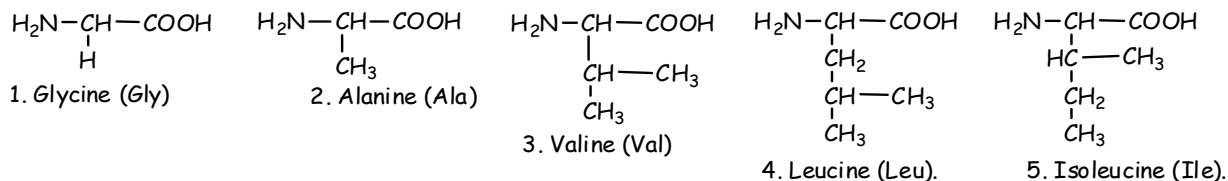


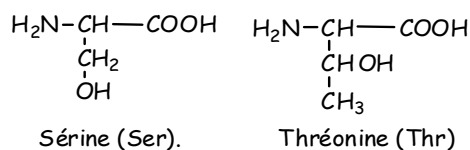
Figure 45: Formule générale d'un acide aminé.

Les acides aminés peuvent être classés d'après la structure et la complexité de leur chaîne latérale R. Parmi les différentes classifications possibles, l'une des plus intéressantes repose sur la polarité et les possibilités d'ionisation de cette chaîne (Figure 46).

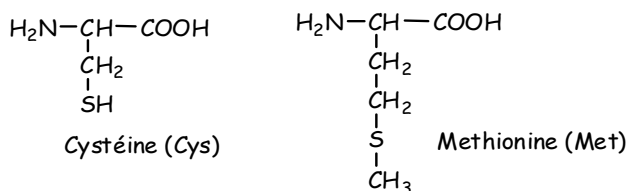
A. Aminoacides aliphatiques à chaîne hydrocarbonée.



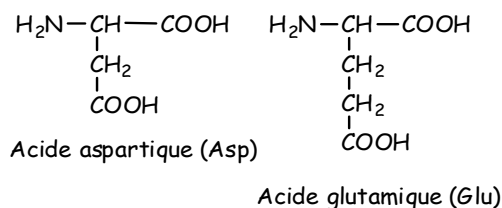
B. Aminoacides hydroxylés.



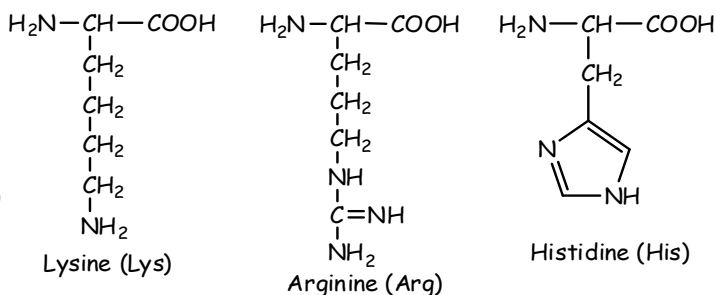
C. Aminoacides soufrés.



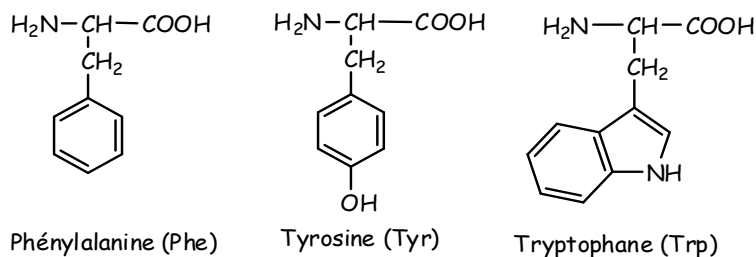
D. Aminoacides dicarboxyliques .



E. Aminoacides basiques



F. Aminoacides aromatiques cycliques



G. Aminoacides hétérocycliques.

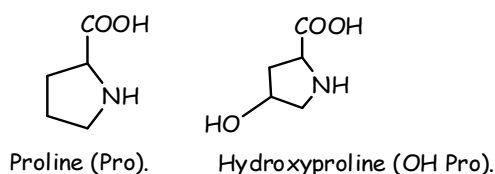


Figure 46 : structures des 20 acides aminés.

III.1.1.2 Propriétés physico-chimiques des acides aminés

a. Propriétés physiques

La détermination de la composition en acides aminés ainsi que leur séquence dans les protéines sont des étapes nécessaires pour déterminer leurs propriétés.

- **Solubilité**

- Tous les acides aminés sont solubles dans l'eau et l'alcool, mais ils sont insolubles dans les solvants non polaires tels que le benzène, l'hexane ou l'éther. Les acides aminés (Sérine, Thréonine, Asparagine, Glutamine, Cystéine et Tyrosine) sont plus solubles dans l'eau que ceux non polaires.

- Leur point de fusion est élevé (au-dessus de 200°C).

- **Propriétés optiques (Stéréochimie)**

A l'exception de la glycine, pour laquelle R est un atome d'H, tous les acides aminés ont au moins un carbone asymétrique. Pour les mêmes raisons, ces molécules sont dotées d'un pouvoir rotatoire et elles possèdent donc une activité optique.

Les acides aminés naturels ont tous la configuration absolue du L-glycéraldéhyde et sont donc définis comme des **acides aminés α-L** (Figure 47).

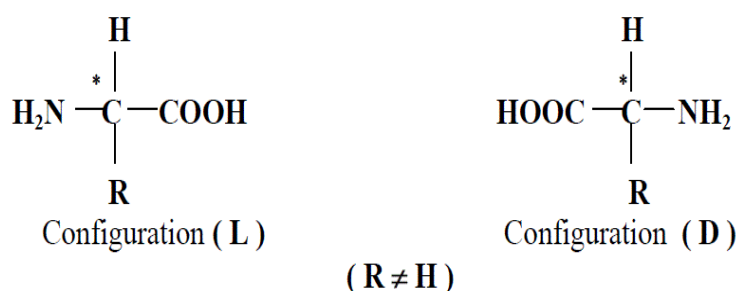


Figure 47: Stéréochimie des acides aminés.

- **Absorption dans l'ultraviolet**

Aucun des 20 acides aminés n'absorbe dans la lumière visible, mais trois (03) acides aminés aromatiques (Figure 48) présentent une absorption importante aux radiations ultraviolettes (UV) tels que le tryptophane, la tyrosine et la phénylalanine, en raison de la

présence, dans leur groupement R, de chromophores tels que le noyau phényl (tyrosine), le noyau indole (tryptophane), permettant ainsi le dosage spectrophotométrique des protéines.

- ✓ Le tryptophane et la tyrosine ont un maximum d'absorption caractéristique vers 280 nm.
- ✓ La phénylalanine absorbe dans la bande des 260 nm.

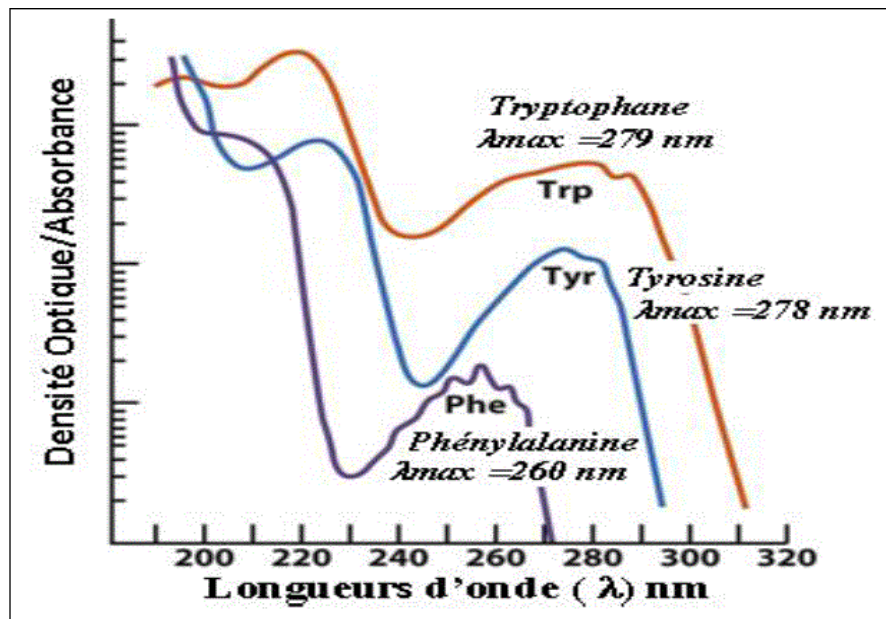


Figure 48: Absorption des acides aminés aromatiques dans l'UV.

• **Propriétés électroélectriques d'ionisation**

En solution aqueuse neutre, les acides aminés sont ionisés et l'état d'ionisation est fonction du pH (Figure 49). Ils possèdent au moins deux groupements acides faiblement ionisables (sous forme dipolaires) : un groupe représenté par le carboxyle et l'autre par l'amine. Ces deux formes sont en équilibre protonique l'une par rapport à l'autre.

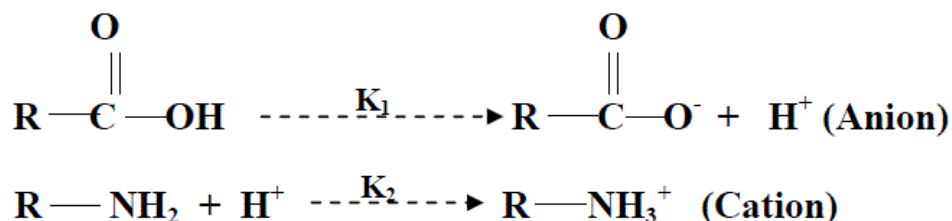


Figure 49: Ionisation des groupements fonctionnels des acides aminés.

Les acides aminés peuvent agir à la fois comme un acide (donneurs de protons COO-), ou

comme une base (accepteurs de protons NH_3^+) ; ils sont dits amphotères (Figure 50).

Le K_1 et K_2 sont les constantes de dissociation des groupements $-\text{COOH}$ (α -carboxyle) et $-\text{NH}_2$ (α -amine), respectivement. Il existe dans ces équations une entité pour laquelle, il n'y a pas de charge électrique nette sur la molécule et la valeur du pH de l'acide aminé est comprise entre $\text{p}K_1$ et $\text{p}K_2$.

Il s'agit de la forme isoélectrique ou Zwitterionique ; c'est-à-dire le pH pour lequel on a les deux associations, on l'appelle point isoélectrique (symbolisé par pHi).

A ce moment-là, la charge positive est égale à la charge négative et l'acide aminé se présente comme un ion dipolaire (zwitterion) ; dans ce cas la molécule ne migre plus sous l'action d'un champ électrique.

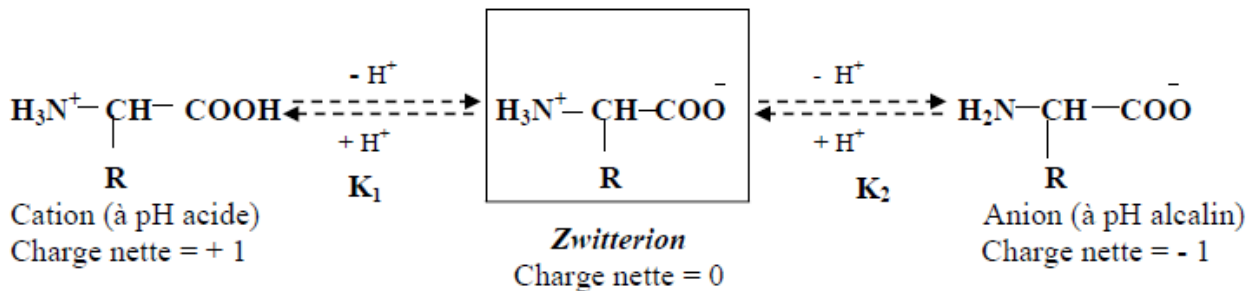


Figure 50 : Etapes de titration d'un acide aminé.

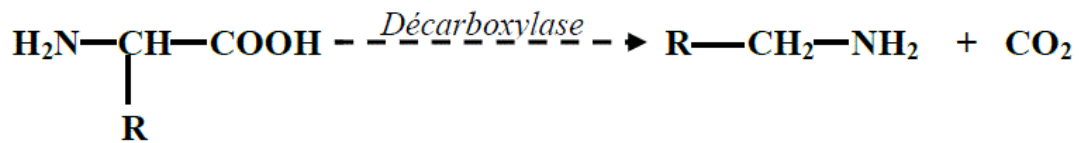
b. Propriétés chimiques

La présence des groupements ($-\text{COOH}$), (NH_2) et le radical (R) confèrent aux acides aminés certaines propriétés.

1. Propriétés dues au groupement carboxylique ($-\text{COOH}$)

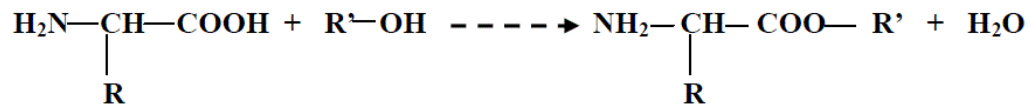
- **Décarboxylation**

En présence de décarboxylase, l'acide aminé se transforme en amine correspondante ayant un rôle physiologique important.



- **Estérification**

L'estérification par un alcool en présence d'un acide fort.



2. Propriétés dues au groupement amine (-NH₂)

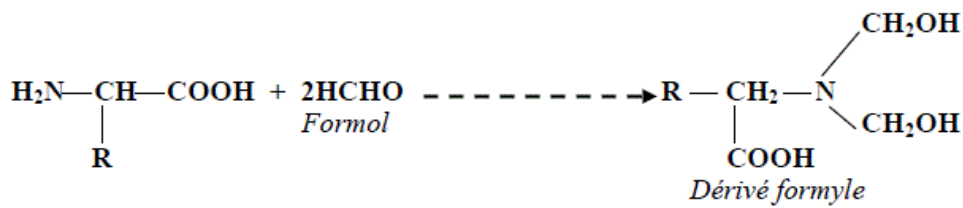
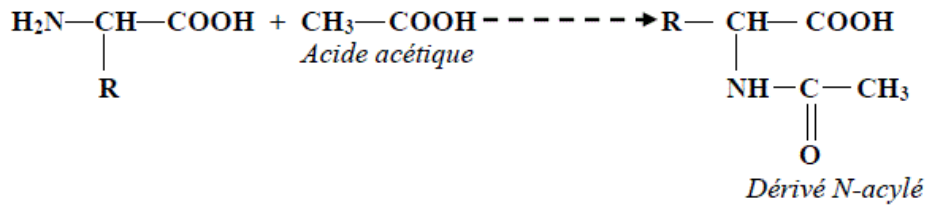
- **N-Alkylation**

Les atomes d'hydrogène du NH₂ peuvent être remplacés par d'autres radicaux :

- ✓ Aliphatiques, tels que (-CH₃) qui donne des dérivés N-méthylés...
- ✓ Aromatiques, tels que les dérivés dinitrophénylés (Exemple : DNFB : dinitrofluorobenzène, utilisé pour la détermination de l'acide aminé N-terminal des protéines).

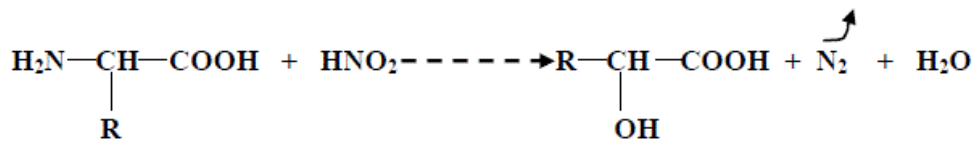
- **N-Acylation**

Les radicaux formyles (Ex. Le formol), acétyles (Ex. l'acide acétique) sont utilisés pour bloquer temporairement la fonction amine.



- **Désamination par l'acide nitreux**

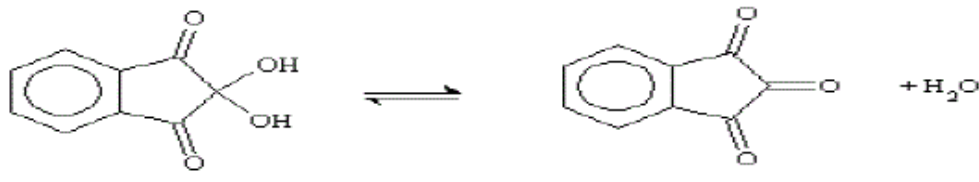
L'acide nitreux (HNO₂) réagit sur le groupement (-NH₂) et donne naissance à des acides-alcools, avec dégagement d'azote.



3. Propriétés dues à la présence simultanée du groupement carboxyle (-COOH) et du groupement amine (-NH₂)

- **Réaction avec la ninhydrine**

Grâce à son pouvoir oxydant, la ninhydrine décarboxyle et désamine l'acide aminé.

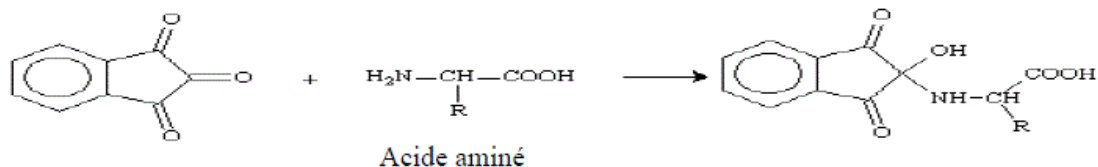


Ninhydrine réduite

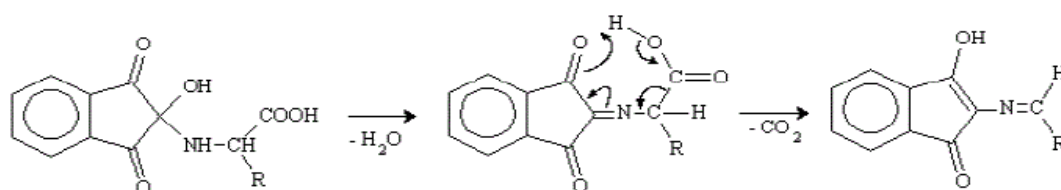
Ninhydrine oxydée

La réaction se fait en 2 étapes :

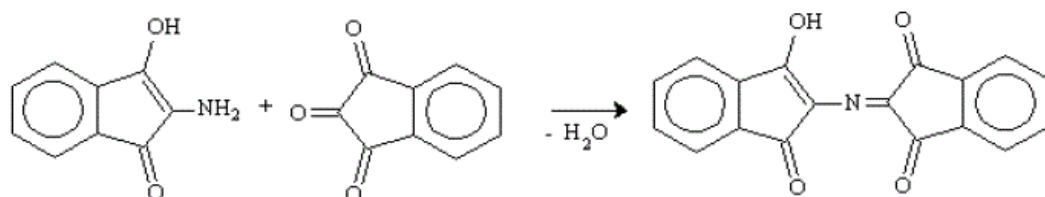
- **1ère étape :** l'acide aminé réagit avec la première molécule de ninhydrine oxydée.



L' α -aminoalcool perd une mole d'eau, puis une mole de CO_2 , en donnant une imine,



- **2ème étape :** l'amine libérée réagit avec une autre mole de ninhydrine pour donner une nouvelle cétimine.



Ce composé (cétimine) fortement délocalisé est coloré en bleu violacé, nommé pourpre de Ruheman. Ce complexe absorbe fortement à 570 nm. Par contre, les iminoacides (Proline) donnent avec la ninhydrine un composé coloré en jaune dont le maximum d'absorption se situe au voisinage de 440 nm. Cette réaction sert au dosage des acides aminés.

III.1.2. Peptides

Les peptides, les polypeptides et les protéines sont formés de l'union des acides aminés, reliés entre eux par une liaison peptidique qui se forme entre l' α -carboxyle ($\alpha\text{-COOH}$) et la fonction α amine ($\alpha\text{-NH}_2$) de l'autre acide aminé (Figure 51).

Cette liaison forme l'arrangement d'atomes caractéristique de la liaison peptidique (figure 49). Cette synthèse s'accompagne de la perte d'une molécule d'eau. Les liaisons

peptidiques se rompent lorsque de l'eau s'y ajoute (hydrolyse des polypeptides).

L'union de deux acides aminés donne un *dipeptide*; celle de trois acides aminés, un *tripeptide*; celle de dix acides aminés ou plus, un *polypeptide*. Les molécules contenant plus de 50 acides aminés sont des *protéines*. La plupart des protéines sont cependant des macromolécules, c'est-à-dire de grosses molécules complexes formées de 100 à 1000 acides aminés.

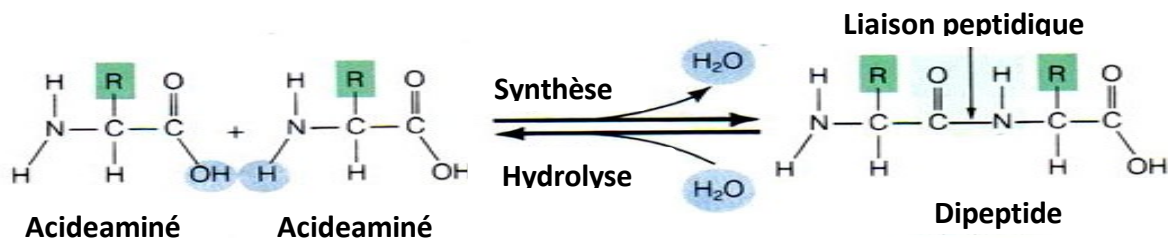


Figure 51: Synthèse d'une liaison peptidique.

Exemple : un dipeptide formé de L- α alanine et L- α -sérine.

Par convention, l'acide aminé porteur de la fonction α amine libre portera le n°1 et s'écrira à gauche du peptide (c'est l'acide aminé N-terminal), et l'acide aminé ayant sa fonction α carboxyle libre s'écrira à droite (c'est l'acide aminé C-terminal) voir la figure 52.

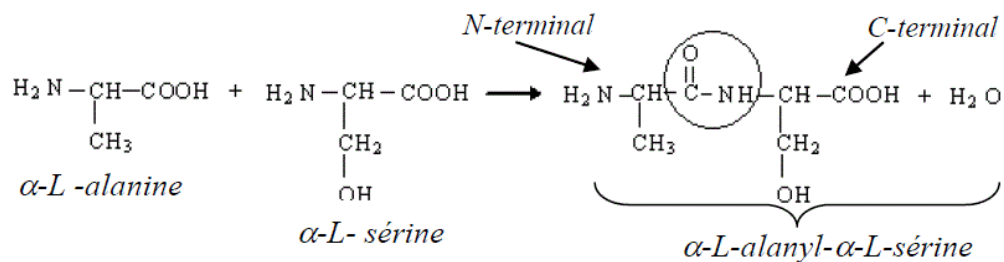


Figure 52: Synthèse d'un dipeptide.

III.2. Protéines

III.2.1. Différents niveaux de structure des protéines

En fonction des différentes interactions entre les acides aminés composant les protéines, on distingue 4 niveaux de structure.

III.2.1.1. Structure primaire

La structure primaire des protéines est représentée par la séquence d'acides aminés (figure 53) qui se lient de manière à former une chaîne polypeptidique. Les propriétés uniques de chaque protéine dépendent des types d'acides aminés qui la composent et de leur séquence. Les êtres vivants renferment des milliers de protéines différentes, aux propriétés fonctionnelles distinctes, toutes construites à partir d'une vingtaine d'acides aminés.

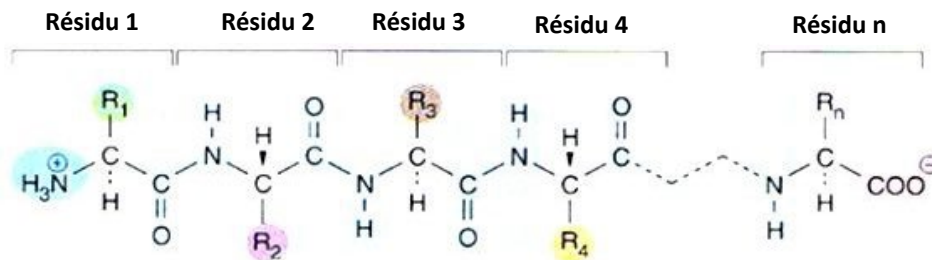
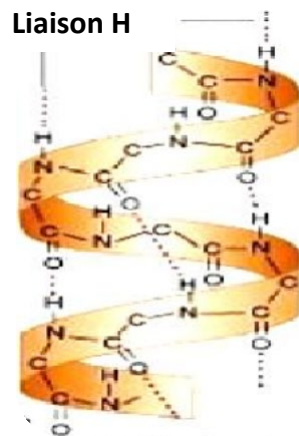


Figure 53: Structure primaire d'une protéine.

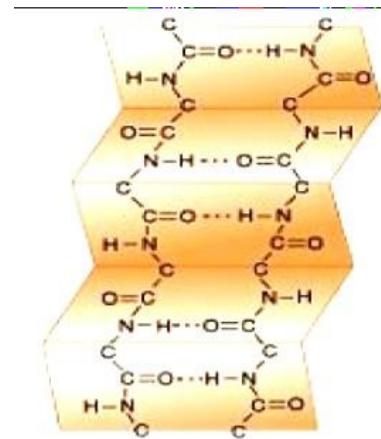
III.2.1.2. Structure secondaire

Les protéines n'existent pas sous forme de chaînes linéaires d'acides aminés; elles se replient sur elles-mêmes conférant à la protéine une structure secondaire. Cette dernière est due à la formation de liaisons hydrogène entre les constituants de la liaison peptidique elle-même. On distingue deux types principaux de structure:

- **Hélice alpha (α):** la chaîne primaire s'enroule sur elle-même puis stabilisée par des liaisons hydrogènes entre les groupes NH et CO, à tous les quatre acides aminés environ (figure 54a). Le groupe CO de chaque AA est lié par liaison hydrogène au groupe NH de l'AA situé 4 résidus plus loin dans la chaîne polypeptidique linéaire. Chaque résidu est disposé par rapport au suivant selon une translation de 1,5 Å le long de l'axe de l'hélice et une rotation de 100° , ce qui donne 3,6 résidus d'AA par tour d'hélice.
- **Feuillet plissé bêta (β):** les chaînes polypeptidiques primaires ne s'enroulent pas mais se lient côte à côte au moyen de liaisons hydrogènes et forment une sorte d'échelle pliante (figure 54b) et la distance axiale entre les AA adjacents est de 3,5 Å. Dans ce type de structure secondaire, les chaînes peptidiques sont disposées soit de façon parallèle soit de façon anti-parallèle.



(a) Hélice α



(b) Feuillet plissé β

Figure 54: Structures secondaires d'une protéine.

III.2.1.3. Structure tertiaire

Dans une protéine, la structure tertiaire décrit l'arrangement tridimensionnel de tous les acides aminés situés dans la chaîne polypeptidique. Il s'agit d'une conformation native, biologiquement active, maintenue par de multiples liaisons et principalement construites à partir des radicaux des amino-acides (Figure 55). Citons par ordre de stabilité décroissante:

- Des liaisons covalentes par pont disulfure entre deux résidus cystéines;
- Des interactions électrostatiques entre groupements de charges opposées ($-\text{NH}_3^+$ et $-\text{COO}^-$);
- Des liaisons hydrogène;
- Des interactions de Van Der Waals entre radicaux hydrophobes (Figure 56).

La structure tertiaire permet à la protéine de former dans l'espace des « *domaines* » indispensables à sa fonction (par exemple un site actif pour une enzyme).

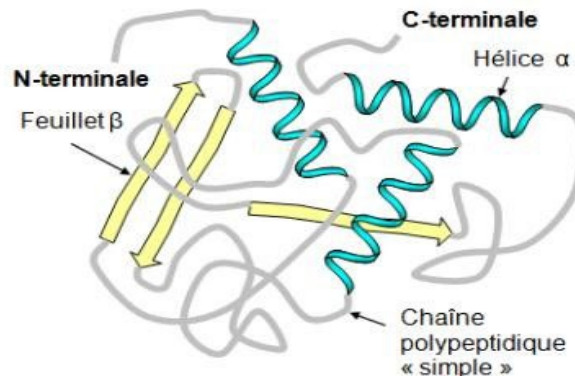


Figure 55: Structure tertiaire d'une protéine.

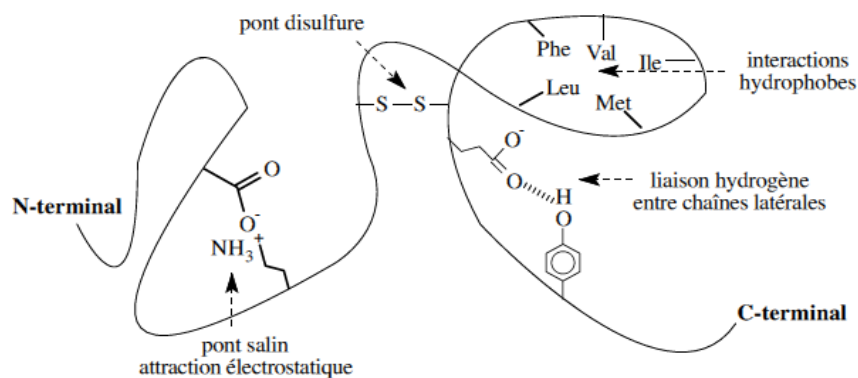


Figure 56: Stabilisation de la structure tertiaire.

III.2.1.4. Structure quaternaire

Il est possible de distinguer un quatrième niveau de structure protéique pour les protéines contenant plus d'une chaîne polypeptidique. La structure quaternaire est l'arrangement spatial des différentes sous unités polypeptidique (protomères) avec la description des interactions qui les lient. Les interactions entre les sous-unités sont de même nature que les interactions à l'intérieur des chaînes (covalente ou non). La dissociation de ces assemblages est réversible. L'hémoglobine est un exemple de protéines possédant une structure quaternaire: elle est composée de quatre chaînes polypeptidiques (Figure 57) dont chacune possède une structure tridimensionnelle. Les chaînes polypeptidiques sont identiques deux à deux: deux chaînes α comportant 141 AA et deux chaînes β comportant 146 AA; Chaque chaîne contient un groupement prosthétique hème. La structure secondaire est composée uniquement d'hélice α . C'est la structure quaternaire qui détermine la fonction de la protéine.

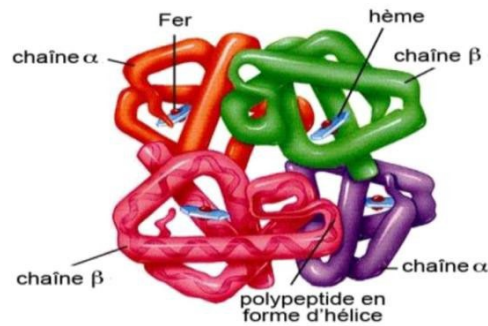


Figure 57: Structure quaternaire de l'hémoglobine.

III.2.2. Classification

Selon leur composition, les protéines peuvent appartenir à deux groupes différents: les *holoprotéines* et les *hétéroprotéines*.

- **Holoprotéines** sont des protéines composées exclusivement d'acides-amino. Elles sont divisées en protamines, histones, gluténines, albumines, prolamines, globulines et scléroprotéines.
- **Hétéroprotéines**, quant à elles, elles sont composées d'une partie protéique et d'une partie non protéique appelée groupement prosthétique qui peut être soit:
 - Un groupe métallique (chromoprotéines) ou organique (phosphoprotéines);
 - Une partie glucidique liée de manière covalente: glycoprotéines;
 - Une partie lipidique liée de manière covalente: lipoprotéines.

III.2.3. Propriétés physiques des protéines

III.2.3.1. Solubilité

La solubilité se définit par la quantité maximale de protéines pouvant se dissoudre dans un litre de solvant. Les protéines sont insolubles dans des solvants organiques et leur solubilité dans l'eau dépend de plusieurs facteurs:

- De la taille, la forme et la masse de la molécule protéique;
- De la répartition et la proportion des acides aminés polaires et apolaires;
- De la solution (force ionique; pH; solvant...).

➤ **Effet de la force ionique de la solution:** la figure 58 montre que la courbe de solubilité d'une protéine, en fonction de la concentration en sel, est sous forme de cloche propre à chaque protéine:

- **A faible force ionique:** les sels neutres ont un effet dissolvant (*Salting-in*) (partie I). Les ions provenant de la dissociation du sel diminuent les interactions électrostatiques entre les groupes chargés des protéines. Ils favorisent l'hydratation des groupes polaires donc la solubilisation des protéines.

- **A force ionique élevée:** les sels neutres ont un effet insolubilisant, précipitant ou relargage (*Salting-out*) (partie III). A une concentration élevée, les ions fixent l'eau aux dépens des groupes polaires de la surface protéique. Ils favorisent donc la déshydratation des protéines et leur insolubilité ce qui est appelé encore le *relargage des protéines*.

- Entre ces 2 zones, il y'a une zone de solubilité maximale de la protéine (partie II)

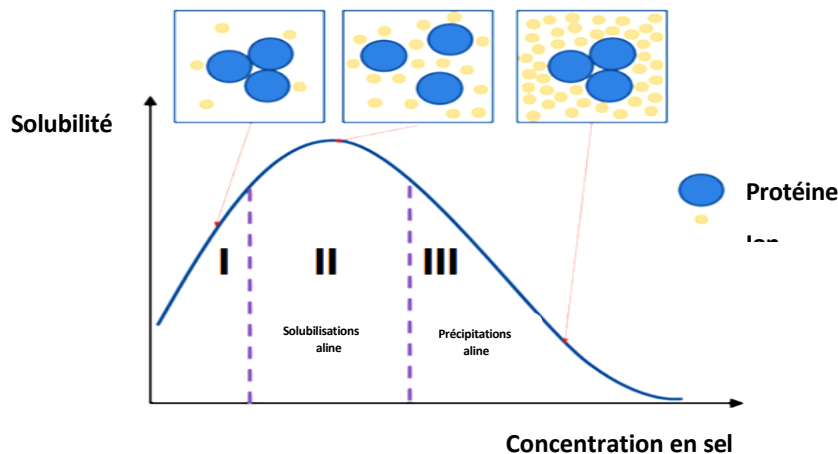


Figure 58: Courbe de solubilité d'une protéine en fonction de la concentration en sel.

➤ **Effet des solvants organiques:** les solvants organiques miscibles à l'eau (éthanol, acétone, méthanol,...) diminuent la constante diélectrique, ce qui réduit les forces de répulsion des protéines et favorise la déshydratation des protéines et donc leur agrégation, d'où leur précipitation.

➤ **Effet du pH:** la courbe de solubilité en fonction du pH du milieu a une forme en "U" (Figure 59). Une protéine présente une solubilité minimale lorsque sa charge globale est nulle, donc lorsque $pH=pH_i$ (pH isoélectrique). Il n'existe pas de répulsion électrostatique entre les molécules protéiques voisines et elles ont tendance à s'agréger et à précipiter. La solubilité est minimale du fait d'un maximum d'attractions

électrostatiques entre les groupes chargés des protéines formant ainsi des agrégats. La solubilité est toujours plus basse au pH_i qu'aux valeurs au-dessus (charge négative) ou au-dessous (charge positive); certaines protéines sont pratiquement insolubles au pH_i .

Remarque: les protéines précipitées au voisinage du pH_i conservent leur conformation (structure tertiaire) et peuvent être redissoutes dans un milieu approprié: il n'y a pas donc de dénaturation.

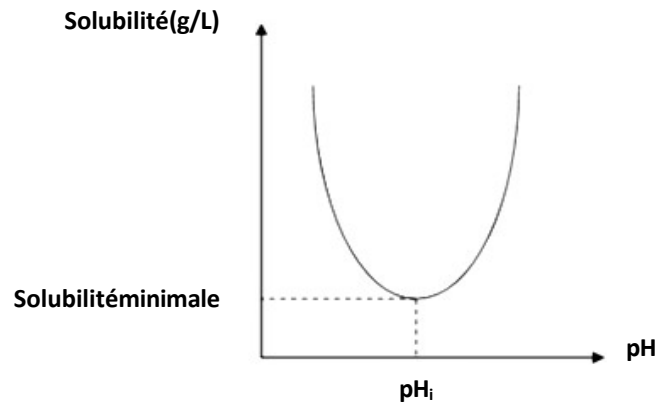


Figure 59: Courbe de solubilité d'une protéine en fonction du pH du milieu.

III.2.3.1.1. Propriétés optiques

Les solutions protéiques sont opalescentes: elles absorbent et diffusent la lumière. Les propriétés optiques sont en rapport avec la concentration de la solution, avec la taille et la forme des molécules. Ces propriétés sont importantes pour l'étude et le dosage des protéines et également pour la détermination des caractéristiques géométriques d'une protéine par diffusion de la lumière.

III.2.3.2. Propriétés osmotiques

Les protéines ne sont pas ultra-filtrables, ni dialysables car elles ne diffusent pas à travers de membrane perméable grâce à leur taille. Une solution protéique placée dans un compartiment limité par une membrane, développe une pression osmotique appelée pression oncotique qui intervient dans les échanges cellulaires et les échanges entre les secteurs hydriques de l'organisme (cas des protéines plasmatiques).

III.2.3.3. Propriétés d'ionisation

Toute protéine possède un nombre important de groupements ionisables caractérisés par leur pK. Ces propriétés sont la base des techniques de séparation et de caractérisation des protéines (électrophorèse ou chromatographie).

III.2.4. Extraction des protéines (méthodes, propriétés et utilisation des concentrations et isolats protéiques)

L'extraction des protéines est une étape fondamentale dans l'étude des systèmes biologiques et alimentaires. Elle consiste à isoler les protéines présentes dans une cellule, un tissu ou une matrice alimentaire afin de pouvoir les analyser, les identifier ou les purifier. Cette opération permet d'obtenir les protéines sous forme soluble tout en préservant, autant que possible, leur structure et leur activité biologique.

Le processus d'extraction repose généralement sur la rupture des structures cellulaires et la solubilisation des protéines dans un milieu approprié, appelé tampon d'extraction. Les méthodes utilisées peuvent être physiques, chimiques ou enzymatiques, et leur choix dépend de la nature de l'échantillon, du type de protéines recherché et de l'objectif de l'analyse. Une extraction efficace est essentielle pour garantir la fiabilité des étapes ultérieures telles que la purification, la séparation ou la caractérisation des protéines.

III.2.4.1. Chromatographie

Le terme chromatographie désigne un ensemble de techniques de séparation qui reposent sur l'affinité différentielle des molécules d'un mélange pour une phase stationnaire ou matrice, solide et une phase mobile, liquide ou gazeuse.

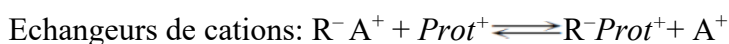
Dans le cas des protéines, le mélange est déposé au sommet de la phase stationnaire contenue dans une colonne. La phase mobile, un éluant, traverse la phase stationnaire et entraîne progressivement les molécules vers le bas de la colonne où l'effluent est collecté en différentes fractions qui sont ensuite analysées. Selon le type de matrice, les molécules de protéines sont retenues et retardées par la colonne en fonction de paramètres physico-chimiques variés : taille, charge électrique, hydrophobicité de la surface ou affinité pour des ligands déterminés.

III.2.4.1.1. Chromatographie par filtration sur gel

Cette technique chromatographique est également nommée chromatographie par exclusion ou chromatographie par tamisage moléculaire. Dans cette technique, les molécules sont séparées selon leur taille et leur forme. L'échantillon est déposé au sommet d'une colonne de gel constitué de billes de porosité définie. Ces billes sont constituées de dextran (polymère de glucose), d'agarose (polymère de dérivés du galactose) ou de polyacrylamide. Les molécules de petite taille (petites protéines et polypeptides) pénètrent dans les billes et sont donc retardées, alors que les molécules de taille supérieure à celle des pores ne pénètrent pas dans les billes et traversent donc plus rapidement la colonne.

III.2.4.1.2. Chromatographie par échange d'ions

Dans cette chromatographie, la matrice (cellulose, polystyrène, agarose, dextran) contient des groupes ionisés qui fixent des ions de charge opposée (A^+ , B^-) présents dans la solution; ces ions pourront être échangés avec des protéines. On distingue les échangeurs d'anions (matrice R chargée positivement) et les échangeurs de cations (matrice chargée négativement):



Les protéines se fixent à la matrice en fonction de leur affinité pour les groupes ionisés. La colonne est ensuite lavée avec un tampon (tampon d'élution), qui entraîne en premier lieu les protéines les plus faiblement liées à l'échangeur. Les protéines les plus fortement liées seront libérées en dernier ou resteront fixées sur la matrice. On réussit en général à libérer l'ensemble des protéines fixées en faisant varier le pH du tampon d'élution ou en augmentant progressivement sa force ionique (figure 60).

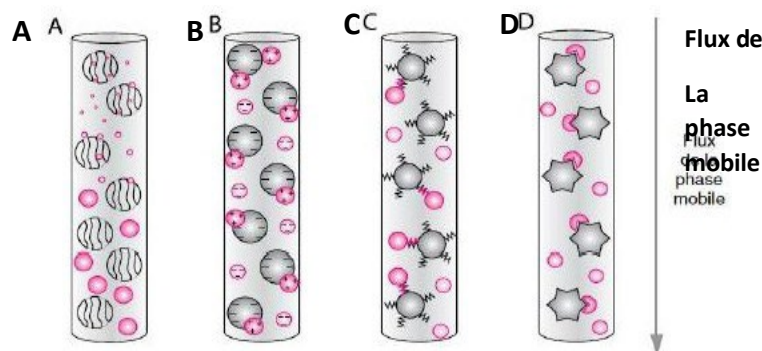


Figure 60: Différent type de chromatographie.

- (A) **Chromatographie par filtration sur gel.** Les protéines (disques roses) de taille supérieure au diamètre des pores ne sont pas retardées par la matrice (disques gris).
- (B) **Chromatographie par échange d'ions.** Les protéines (disques roses) chargées positivement sont retenues par la matrice (disques gris) chargée négativement.
- (C) **Chromatographie par interactions hydrophobes.** Les protéines (disques roses) les plus hydrophobes sont retenues par la matrice (disques gris), elle-même hydrophobe.
- (D) **Chromatographie par affinité.** Les protéines (disques roses) les plus affines sont retenues par la matrice (disques gris) sur laquelle est greffé le ligand spécifique de la protéine d'intérêt.

III.2.4.1.3. Chromatographie par interactions hydrophobes

Cette méthode met à profit l'existence de zones hydrophobes discrètes à la surface des protéines. La matrice contenue dans la colonne contient des groupes apolaires (groupes phényle) qui peuvent retenir les protéines en s'associant à leurs régions hydrophobes. Cette interaction est d'autant plus forte que la force ionique est élevée. Aussi, et à l'inverse de la chromatographie d'échange d'ions, la colonne hydrophobe est éluée par un tampon de force ionique décroissante, ce qui a pour effet d'affaiblir progressivement l'interaction hydrophobe entre les protéines et la matrice. En principe, les protéines contenant peu de zones hydrophobes à leur périphérie sont éluées en premier, les protéines les plus hydrophobes sont éluées en dernier.

III.2.4.1.4. Chromatographie par affinité

Dans cette technique, les protéines sont séparées en fonction de leur affinité pour un groupement (analogue de substrat, anticorps spécifique, lectine...etc.) greffé sur la matrice. La protéine d'intérêt est éluée de la colonne par déplacement avec un analogue de la structure ou molécule reconnue par le groupement lié.

III.2.4.2. Electrophorèse

L'électrophorèse est une technique d'analyse permettant de séparer les molécules électriquement chargées par migration dans un champ électrique. Les acides aminés en milieu aqueux sont présents sous forme d'espèces ioniques chargées différemment selon le pH du tampon dans lequel ils sont solubilisés. Si on dépose au milieu d'une bande de papier un mélange d'acides aminés et si on applique un champ électrique aux extrémités. Selon leurs charges, au pH du tampon considéré, ils migreront vers le pôle positif ou vers le pôle négatif (Figure 61).

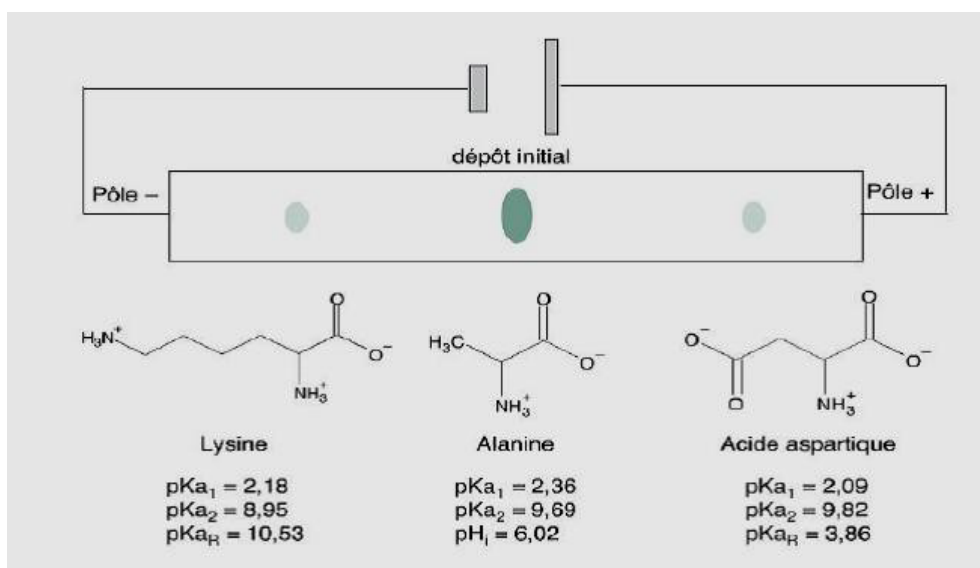


Figure 61: Exemple de l'électrophorèse d'un mélange d'acides aminés.

III.2.5 Détermination du nombre des chaînes polypeptidiques (sous unités)

La détermination du nombre des chaînes polypeptidiques constitutives de la protéine, consiste à la détermination du nombre des résidus terminaux, puisque chaque chaîne possède un seul résidu N-terminal et un seul résidu C-terminal. Par exemple si on trouve qu'une protéine possède deux résidu N-terminal, c'est-à-dire qu'elle est composée de deux chaînes polypeptidiques.

III.2.5.1 Identification du résidu N-terminal

➤ Identification du résidu N-terminal par la méthode de Sanger

Dans la méthode de Sanger, le 1-fluoro-2,4 – dinitrobenzene (FDNB) est utilisé, ce réactif peut former une liaison chimique uniquement avec le résidu N-terminal, qui après

hydrolyse des liaisons peptidiques, est libéré sous forme d'un dérivé du dinitrophényl, facile à identifier (Figure 62).

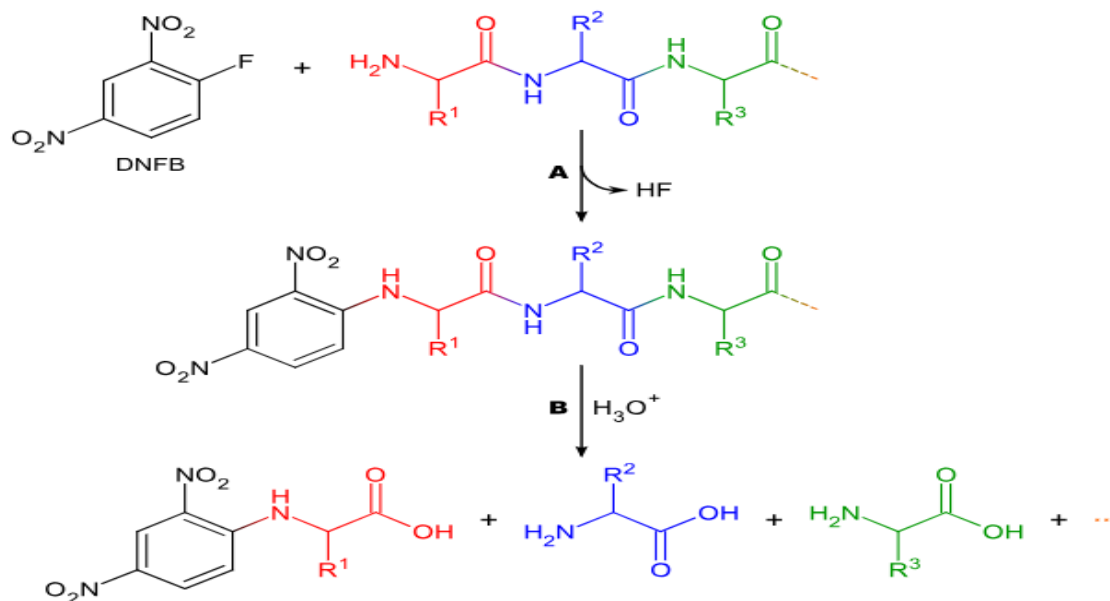


Figure 62 : Identification de l'acide aminé N-terminal par la méthode de Sanger.

A noter également que le chlorure de dansyl, réagit aussi avec le résidu N-terminal, pour donner un dérivé fluorescent de l'acide aminé N-terminal, facile à identifier.

➤ **Identification du résidu N-terminal par la méthode d'EDMAN**

Le phénylisothiocyanate (PITC) réagit avec la fonction amine N-terminal d'un polypeptide pour former un complexe intermédiaire. Après traitement en conditions acides douces, ce complexe libère une phénylthiohydantoïne-acide aminé (PTH-aa), un dérivé facilement identifiable par chromatographie ou par spectrophotométrie à 269 nm (Figure 63).

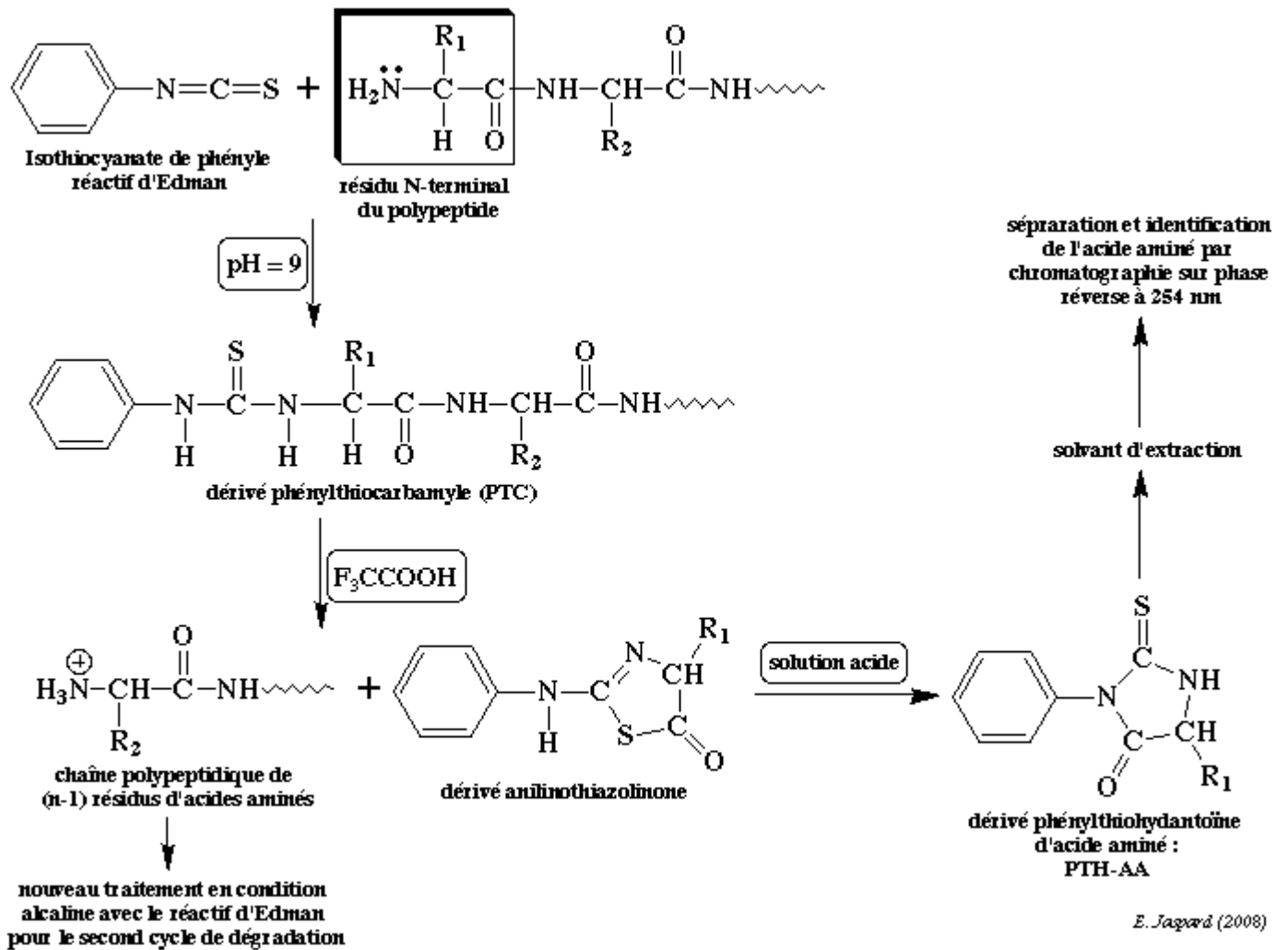


Figure 63: Identification de l'acide aminé N-terminal par la méthode d'EDMAN.

➤ Identification du résidu N-terminal par la méthode de dansylation

Le chlorure de dansyl (chlorure de l'acide 1-diméthylaminonaphtalène-5-sulfonique) réagit avec les fonctions amines des acides aminés pour former des dérivés sulfonamides fortement fluorescents. Ces dérivés peuvent être facilement détectés et identifiés par chromatographie sur couche mince, grâce à leur fluorescence sous UV (figure 64).

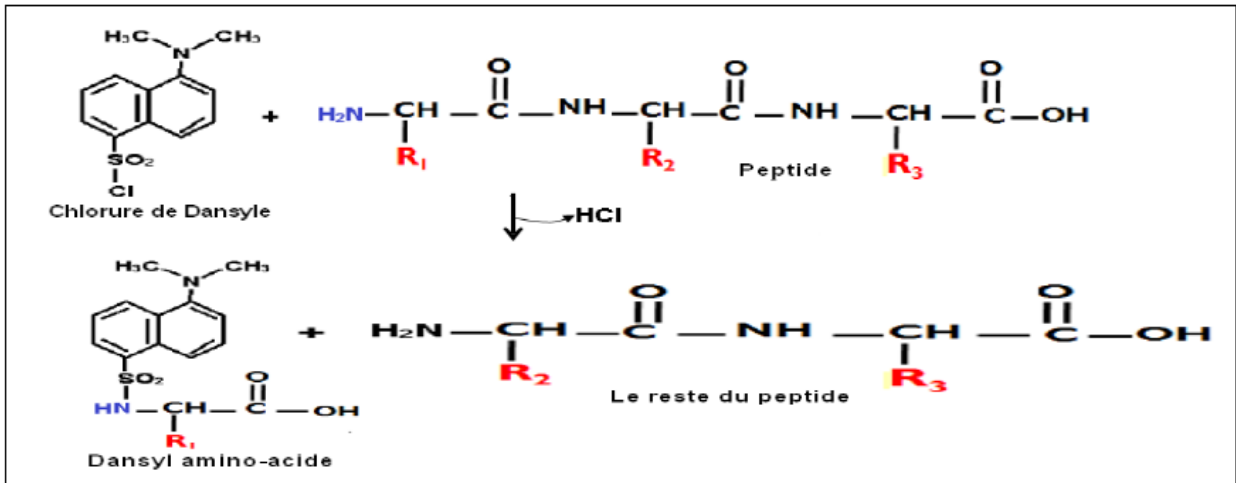


Figure 64 : Identification de l'acide aminé N-terminal par la méthode de dansylation.

➤ **Identification du résidu N-terminal par les méthodes enzymatiques**

- Action de l'amminopeptidase: enzyme qui catalyse l'enlèvement successif des résidus N-terminal.
- Thermolysine: elle est spécifique, car elle permet la coupure au niveau de l'extrémité N-terminal de la leucine, de l'isoleucine et de la valine, sauf si l'acide aminé à droite est la proline.
- La Pepsine : moins spécifique, elle permet la coupure du côté N-terminal des acides aminés aromatiques et aussi la leucine, l'acide aspartique, l'acide glutamique, sauf si l'acide aminé à droite est la proline.

III.2.5.2 détermination de l'extrémité C-terminal

➤ **Identification du résidu C-terminal par la méthode hydrazinolyse**

Sous l'action de l'hydrazine à 100 °C, toutes les liaisons peptidiques sont clivées et l'ensemble des résidus d'acides aminés est converti en hydrazides, à l'exception du résidu C-terminal, qui demeure sous forme d'acide aminé libre, facilement isolable et identifiable (Figure 65).

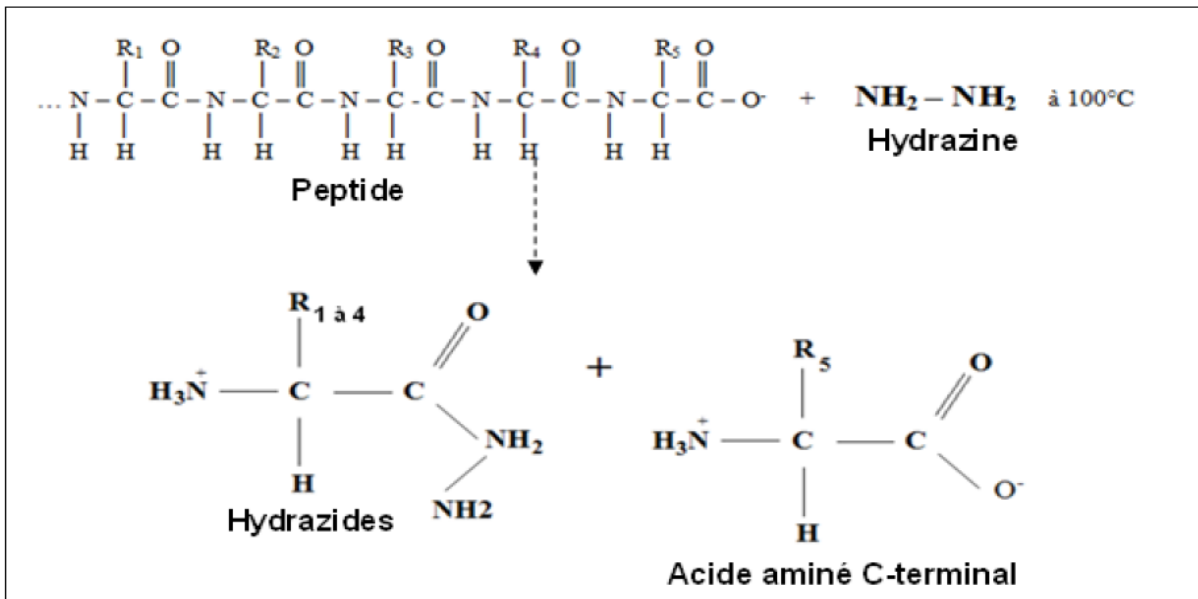


Figure 65: Identification de l'acide aminé C-terminal par la méthode de hydrazinolysé.

➤ **Identification du résidu C-terminal par la méthode du bromure de cyanogène (CNBr)**

Le CNBr coupe l'extrémité C-terminal de la méthionine, qui le transforme en reste homoseryl lactone (Figure 66).

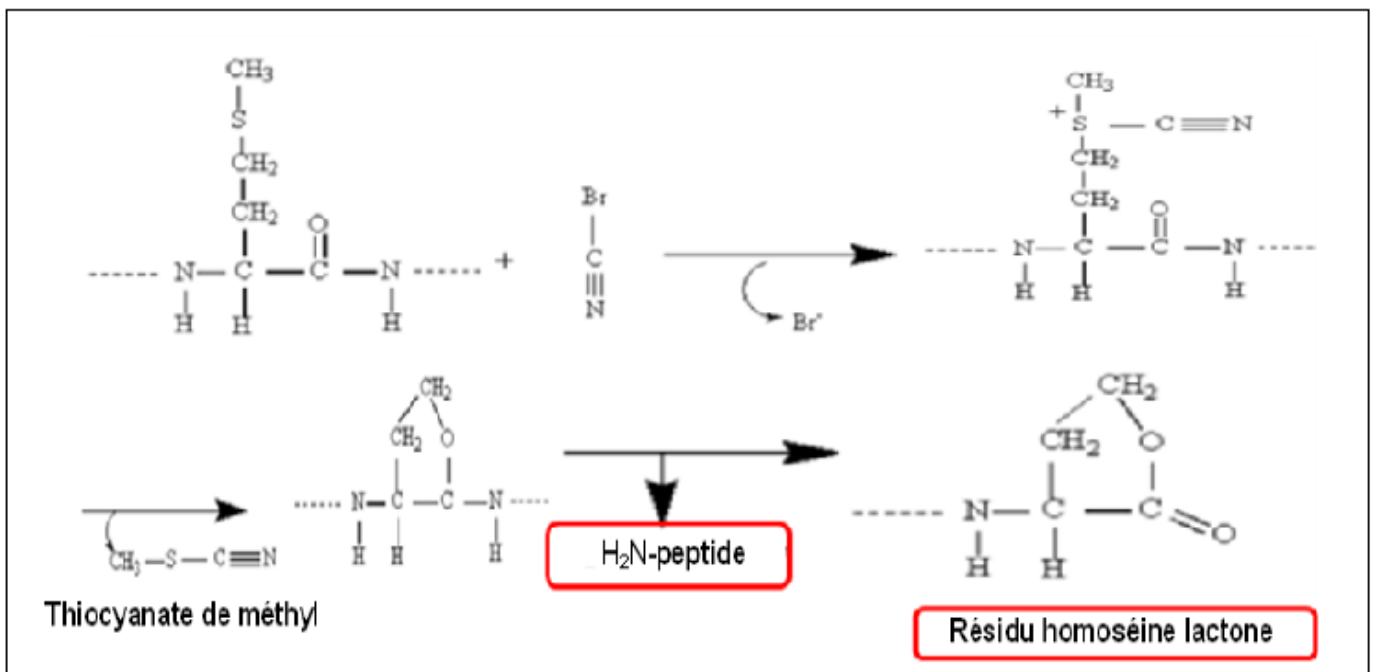


Figure 66 : Identification du résidu C-terminal par la méthode du bromure de cyanogène (CNBr).

➤ **Identification du résidu C-terminal par les méthodes enzymatiques**

- La carboxypeptidase: hydrolyse la liaison peptidique où est engagé l'acide aminé terminal.
- La trypsine : (spécifique), catalyse l'hydrolyse de la liaison peptidique dans lesquelles les fonctions carboxyles sont fournies par la lysine ou l'arginine, sauf si l'acide aminé à droite est la proline.
- La chymotrypsine : spécifique, elle permet la coupure du côté C-terminal des 3 acides aminés aromatiques (phénylalanine, tryptophane et tyrosine), sauf si l'acide aminé à droite est la proline.

Conclusion

L'étude de la biochimie structurale des glucides, des lipides et des protéines met en évidence l'importance fondamentale de la structure moléculaire dans la compréhension du fonctionnement du vivant. Ces trois grandes familles de biomolécules possèdent des architectures chimiques spécifiques qui déterminent leurs propriétés physico-chimiques et leurs rôles biologiques.

Les glucides, par leur diversité structurale, assurent des fonctions énergétiques, structurales et de stockage. Les lipides, caractérisés par leur hydrophobicité, sont essentiels à l'intégrité des membranes, au stockage de l'énergie et à la signalisation cellulaire. Quant aux protéines, leur organisation tridimensionnelle complexe conditionne leur grande variété de fonctions, allant de la catalyse enzymatique aux rôles structuraux et régulateurs.

Ainsi, la biochimie structurale permet de relier la forme à la fonction, en montrant que toute activité biologique dépend d'interactions moléculaires précises. Cette compréhension constitue un socle essentiel pour l'analyse des mécanismes cellulaires, l'identification des anomalies à l'origine des pathologies et le développement d'approches biotechnologiques et thérapeutiques innovantes.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Alais, C. & G. Linden. Abrégé de biochimie alimentaire. (1997). Ed. Masson, Paris. p 257.

Alais, C., Linden, G. & Miclo, L. Biochimie alimentaire. (2004). Ed. Dunod (5^{ème} édition). p264.

Audigié, C. & Zonszain, F. Biochimie structurale. (1991). Ed. Doin. p264.

Beaumont, S. Biochimie UE1-PACES: Manuel, cours + QCM corrigés. (2015). Ed. Ediscience. (4^{ème} édition).

Belkacem, Structure et propriétés des lipides complexes. (2017). http://univ.ency-education.com/uploads/1/3/1/0/13102001/biochimie_lipides_complexes2017belkacem.pdf. p 8.

Benchikh, N. Biochimie structurale: Les lipides. (2014-2015). <http://univ.ency-education.com/uploads/1/3/1/0/13102001/biochimie27-lipides.pdf>. p 53.

Benchoucha, R. Biochimie. (2011). <https://eddirasa.com/wp-content/uploads/univ/medecine-dentaire/medecine-biochimie-1an.pdf>. p 107.

Berrada, S. Biochimie appliquée dans les filières SBSSA: Les protéines: Structure, propriétés et applications technologiques. (2009). <http://biotec.ac-dijon.fr/IMG/pdf/Proteines.pdf>. p13.

Biochimie structurale: Les lipides. <https://www.phpage.fr/bioenergies/doc/hvc-lipides.pdf>. p 37.

Biochimie structurale: Les protéines. <https://www.coursdebio.fr/biochimie-structurale/partie-bs1-les-protides/prot12-propri%C3%A9t%C3%A9s-des-prot%C3%A9ines/>.

Borel, J. P., Maquart, F. X., Le Peuch, C., Randoux, A., Gillery, P., Bellon, G. & Monboisse, J. C. Biochimie dynamique. (1997). Ed. De Boeck & Larciens. a., Brussels, Belgium. p942

Bourbonnais, G. Les molécules de la vie: les protéines. https://babel.cegep-ste-foy.qc.ca/profs/gbourbonnais/pascal/fya/chimcell/notes_molecules/proteines_1.html.

Branden, C. Introduction à la structure des protéines. (1996). Ed. De Boeck. p320.
Chp5-3: Structure des osides. http://biotech.spip.ac-rouen.fr/IMG/pdf/structure_osides.pdf.
Cours de biochimie: Les lipides. (2016-

2017). https://ousmaal.puzl.com/files/1613847/download/les_lipides.pdf. p 26

Cours Protéines 8: La structure primaire des protéines. <https://www.Coursdebio.fr/biochimie-structurale/partie-bs1-les-protides/prot8-structure-primaire-des-prot%C3%A9ines/>.

Daroui-Mokaddem, H. Les protéines. <http://univ.ency-education.com/uploads/1/3/1/0>

[/13102001/bioch23_03-proteines.pdf](#). p 21.

Djarmouni, M. Cours de biochimie structurale. (2017).

https://fsnv.univsetif.dz/telecharger/EDT2017/Biochimie_structurale.pdf.

ElAtyqy, M. Lipides: Acides gras, lipides simples et complexes. (2018). <http://www.scientecal.com/cours/lipides-acides-gras-lipides-simples-et-complexes>.

Fanny, D. Les lipides. (2019). <http://fdanieau.free.fr/cours/bts/A1/biochimie/chapitre6/LesLipides.pdf>.

Fergani, I. Propriétés physico-chimiques des protéines. (2017). http://univ.ency-education.com/uploads/1/3/1/0/13102001/bioch1an_polyproprietes_proteines2017fergani.pdf. p8.

François, R. Les industries des corps gras: biochimie, extraction, raffinage, nuisances et réglementation. (1974). *Ed. Tec et Doc, Lavoisier Paris*. p 132.

Frénot, M. & Vierling, E. Biochimie des aliments: diététique du sujet bien portant. (2002). *Ed. Doin (2^{ème} édition)*. p 304.

Gillet, S. Chapitre 4: La chromatographie et l'électrophorèse. (2008). <http://perso.latribu.com/shagar/steve/pdf/ch42BBM.pdf>.

Horton, H. R., Laurence A. M., Raymond, S. O., Rawn, J. D., & Scrimgeour, K. G. Principes de biochimie. (1994). *Ed. De Boeck Wesmael, Bruxelles*. p 720.

Isabelle Claverie, Mireille Panet, *biochimie*. (2008). 2^eed: Wolters Kluwer, 2008. p : 22-23

Jacques-Henry Weil et al., biochimie générale. (2021, 2005). 10^e édition : Dunod, Paris. p : 274-293

Les protéines: structures et propriétés. <http://fdanieau.free.fr/cours/bts/A1/biochimie/chapitre4/Proteines.pdf>.

Les protéines. <https://docplayer.fr/amp/6014489-Classification-a-les-acides-amines-a-chaine-aliphatique-glycine-alanine-valine-leucine-isoleucine.html>.

Meharzy, M. *Electrophorèse*. <https://cours-examens.org/images/An-2018/Etudes-superieures/Veto/Physiologie/Constantine/4-electrophorese.pdf>.

Moussard C. Biochimie et biologie moléculaire. Bruxelles. (2010). Groupe De Boeck s.a.

Nelson D.L., Lehninger M.M. Cox., principes de biochimie. (2008). 5^{ème} édition. New York: W.H. Freeman.

Protéines: Techniques d'extractions et de caractérisations d'une protéine. <http://fdanieau.free.fr/cours/bts/A1/biochimie/chapitre4/ProteineTechniques.pdf>.

Quentin, F., Gallet, P. F., Guilloton, M. & Quintard, B. Biochimie en 84 fiches. (2015). *Ed. Dunod (2^{ème} édition)*.

Ronsin, C. L'histoire de la biologie moléculaire: pionniers & héros. (2005). *Ed. De*

Boeck. p 106.

Touitou, Y. Biochimie: structure des glucides et lipides. (2005). <http://www.chups.jussieu.fr/po-lys/biochimie/SGLbioch/SGLbioch.pdf>. p 48.

Valentini, F. L'indispensable en biochimie. (2005). Ed. Bréal. p 112.

Voet, Donald, et al. Fundamentals of Biochemistry. (2016). 5th ed., John Wiley & Sons.

Weinman, S. & Méhul, P. Toute la biochimie. (2004). Ed. Dunod. p 452.

Weinman, S. & Méhul, P. Toute la Biochimie. (2013). Ed. Dunod. p 464.

Zennouhi, A. Biochimie structurale: Lipides. (2013-2014). <https://f2school.com/wp-content/uploads/2019/12/Lipides-Cours-03.pdf>. p 10.