

Ce chapitre est consacré aux bases de la physiologie nécessaires à la compréhension de la physiologie de l'exercice. Il aborde l'organisation, la composition et le fonctionnement de notre organisme. Il permet notamment de comprendre l'importance de notre alimentation et apporte les connaissances indispensables sur les deux grands systèmes physiologiques impliqués dans le bon fonctionnement de notre corps : le système nerveux et le système endocrinien. Ces deux systèmes sont impliqués dans le maintien de l'homéostasie qui correspond à la stabilité de notre milieu intérieur malgré l'activité des cellules de l'organisme et les fluctuations du milieu extérieur. Lorsqu'une variable physiologique est modifiée, comme par exemple la température corporelle, des mécanismes compensateurs interviennent pour qu'elle redevienne normale c'est-à-dire comprise dans certaines limites physiologiques. La restauration de l'homéostasie est indispensable car, dans le cas contraire, les dysfonctionnements induits seront à l'origine de pathologies.

## 1 Niveaux d'organisation

### 1.1. Atome

Les plus petits composants chimiques de toutes les formes de matière (vivante ou inerte) sont les atomes. Il existe 115 éléments chimiques dont 90 sont naturels (les autres sont créés artificiellement). Ils sont représentés sous la forme de symboles (habituellement la première ou les deux premières lettres de leur nom français ou latin). Exemple : sodium = Na (natrium) ; potassium = K (Kalium). Notre corps contient 26 atomes différents dont les quatre principaux représentent 96 % de notre poids corporel : l'oxygène (O) = 65 %, le carbone (C) = 18,5 %, l'hydrogène (H) = 9,5 % et l'azote (N) = 3 %. Sept autres éléments, appelés macro-éléments (30 à 1300 g dans l'organisme), constituent 3 % de notre poids : calcium, phosphore, potassium, soufre, sodium, chlore et magnésium. Le reste (1 %) sont les oligo-éléments (chrome, iode, fer, cobalt, cuivre, fluor, manganèse, molybdène, sélénium, zinc). D'autres éléments, apportés par l'alimentation, sont présents en très faible quantité (silicium, étain, vanadium, nickel, arsenic).

Les atomes sont formés :

- **d'un noyau** qui contient des protons (particules chargées positivement) et des neutrons (particules non chargées),
- **d'électrons** (chargés négativement) qui gravitent autour du noyau sur une ou plusieurs couches énergétiques.

Ces couches modélisent l'espace d'évolution des électrons autour du noyau : elles dépendent de leur énergie. Chaque couche ne peut contenir qu'un certain nombre d'électrons. La première (la plus proche du noyau) en contient au maximum 2, la deuxième et la troisième en contiennent 8 et la quatrième en contient 18. Les couches suivantes (jusqu'à sept) peuvent en contenir beaucoup plus.

Dans un atome, le nombre d'électrons est égal au nombre de protons : il est donc électriquement neutre. **La dernière couche d'électrons (couche de valence)**, la plus externe, possède les électrons les plus réactifs. Les atomes tendent à vider ou à remplir au maximum cette couche externe pour parvenir à la stabilité. Ils peuvent soit céder, soit prendre, soit partager des électrons avec d'autres atomes. Les atomes dont la dernière couche n'est pas complètement remplie s'associent donc dans une **réaction chimique**. Quand au moins deux atomes s'unissent, une molécule est formée.

## 1.2. Molécule (ou composée)

L'association de deux ou plusieurs atomes liés par des liaisons chimiques forme une molécule (ou un composé si les atomes sont différents). L'association d'au moins deux molécules forme un agrégat de matière plus important appelé substance. Cette substance peut exister sous forme de gaz, de liquide ou de solide selon la nature des forces qui s'exercent entre les molécules. Les **liaisons chimiques** correspondent donc à une mise en commun d'électrons entre atomes. Par exemple, deux atomes d'hydrogène et un atome d'oxygène s'associent pour former une molécule d'eau. Il existe deux grands types de liaison chimique :

**La liaison covalente est une liaison forte qui correspond à un partage d'électrons.** C'est la liaison la plus fréquente entre les atomes composant les molécules de l'organisme. Cette liaison peut être simple, double ou triple.

**La liaison covalente simple** est un partage d'une paire d'électrons entre deux atomes. Par exemple, l'atome d'hydrogène possède 1 électron : l'union de 2 atomes d'hydrogène (H) forme la molécule d'hydrogène ( $H_2$ ). L'atome d'hydrogène remplit ainsi sa couche de valence (deux électrons sur la couche de valence).

**La liaison covalente double** est un partage de deux paires d'électrons entre deux atomes. Par exemple, l'union de deux atomes d'oxygène (O) forme la molécule d'oxygène ( $O_2$ ). L'atome d'oxygène, qui a 8 électrons et donc 6 sur la couche externe, remplit ainsi sa couche de valence (mise en commun de 2 électrons pour avoir 8 électrons sur la deuxième couche) (**figure I-1.1a**).

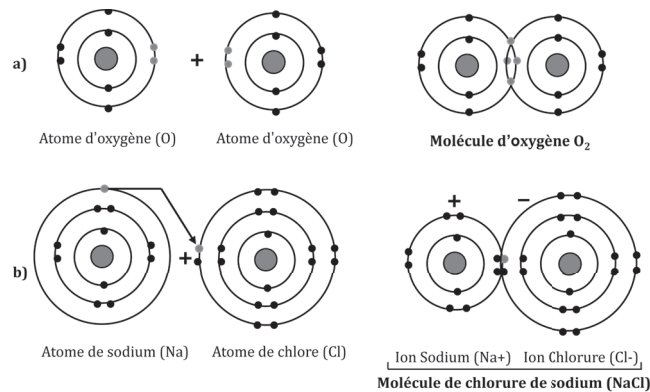


Figure I-1.1. Liaisons chimiques: covalente ou ionique. a) Formation de la molécule d'oxygène par une liaison covalente double; b) Formation de la molécule de chlorure de sodium par une liaison ionique.

**La liaison covalente triple** est un partage de trois paires d'électrons entre deux atomes. Par exemple, l'union de 2 atomes d'azote (N) forme la molécule d'azote (N<sub>2</sub>). L'atome d'azote (7 électrons) remplit ainsi sa couche de valence (mise en commun de 3 électrons pour avoir 8 électrons sur la deuxième couche).

**La liaison ionique est une liaison faible qui correspond à un transfert d'électrons.**

Les électrons de la dernière couche sont transférés d'un atome à un autre : il y a donc un donneur et un accepteur d'électrons. Les atomes sont électriquement neutres mais quand un atome gagne ou perd un électron, cet équilibre est détruit. Le transfert d'électrons forme donc des ions dont les charges opposées s'attirent. Cette attraction forme la liaison ionique. Si la couche de valence est moins qu'à moitié remplie, l'atome perd des électrons et forme un ion chargé positivement appelé **cation** tel que l'ion sodium (Na<sup>+</sup>). Si la couche de valence est plus qu'à moitié remplie, l'atome prend des électrons et forme un ion chargé négativement appelé **anion** tel que l'ion chlorure (Cl<sup>-</sup>). L'ion sodium (Na<sup>+</sup>) et l'ion chlorure (Cl<sup>-</sup>) s'attirent du fait de leurs charges opposées et cette attraction qui maintient ensemble les 2 ions forme la molécule de chlorure de sodium (NaCl) ou sel fin (**figure I-1.1b**).

Notre corps est formé de deux grandes classes de composés :

- **les composés organiques**, ainsi appelés car ils possèdent du carbone : glucides, lipides, protéines et nucléotides)
- **les composés inorganiques**, qui ne contiennent pas de carbone (eau et minéraux) (voir I-2).

### 1.3. Cellule

La cellule est la plus petite unité structurelle et fonctionnelle de l'organisme. Elle est formée des deux grandes classes de composés : organiques (glucides, lipides, protéines et nucléotides) et inorganiques (eau et minéraux). L'organisme provient d'une seule cellule, l'œuf, c'est-à-dire l'ovule fécondé par le spermatozoïde. Cette cellule va se diviser pour former deux puis quatre puis huit cellules, etc. Notre corps comporte environ 10<sup>14</sup> cellules (100 000 milliards). Cette phase de **division** (mitose) et de **croissance** sera ensuite suivie d'une phase de **différenciation cellulaire** pendant laquelle les cellules se spécialisent dans l'accomplissement d'une fonction particulière. Ce processus est lié à la régulation de la

synthèse des protéines (voir I-2.1.4). Toutes les cellules de l'organisme contiennent les mêmes gènes et sont donc capables, en théorie, de synthétiser toutes les protéines du corps. Or, une cellule spécialisée dans une fonction synthétise spécifiquement les protéines associées à cette fonction. La différenciation cellulaire est donc liée à l'expression sélective des gènes associés aux fonctions spécialisées de la cellule (gènes actifs). Ces mêmes gènes sont présents dans les autres cellules mais ne sont pas exprimés (gènes inactifs). Les cellules différenciées ayant des propriétés semblables (même type cellulaire) se lient pour former des tissus, ces tissus se combinent à d'autres tissus pour former des organes et différents organes se lient pour former des systèmes (figure I-1.2).

### 1.3.1. Différents types de cellules

Il existe plus de 200 types différents de cellules dans l'organisme mais elles sont toutes regroupées en quatre grandes catégories :

1. **Les cellules musculaires** sont spécialisées pour produire les forces mécaniques qui sont à l'origine du mouvement. Pour effectuer cette fonction, elles sont capables de se contracter et de se relâcher. Il en existe trois types : les cellules squelettiques qui sont ancrées sur les os et produisent les mouvements du corps, les cellules cardiaques qui forment les parois du cœur et sont à l'origine de l'éjection du sang, et les cellules musculaires lisses qui bordent des cavités creuses et permettent d'expulser le contenu d'une cavité (vessie, etc.) ou de modifier le diamètre (vaisseaux sanguins).
2. **Les cellules nerveuses** (ou neurones) sont spécialisées pour initier et propager des signaux électriques (potentiel d'action). Elles possèdent un corps cellulaire et des prolongements (axone et dendrites). Un signal peut déclencher de nouveaux signaux électriques dans d'autres cellules nerveuses ou stimuler la sécrétion d'une cellule glandulaire ou la contraction d'une cellule musculaire.
3. **Les cellules épithéliales** sont spécialisées dans la protection ainsi que dans la sécrétion et l'absorption sélectives d'ions et de molécules organiques. Elles sont disposées en couches continues simples ou multiples et sont situées essentiellement sur les surfaces qui recouvrent le corps ou les organes ou qui tapissent les parois des diverses structures tubulaires ou creuses à l'intérieur du corps.
4. **Les cellules conjonctives** sont spécialisées dans la connexion, la fixation et le soutien des structures de l'organisme. Ces cellules sont les plus abondantes dans l'organisme car il en existe de nombreux types. Par exemple, les fibroblastes (cellules du tendon) ou les ostéocytes (cellules de l'os) sont des cellules conjonctives.

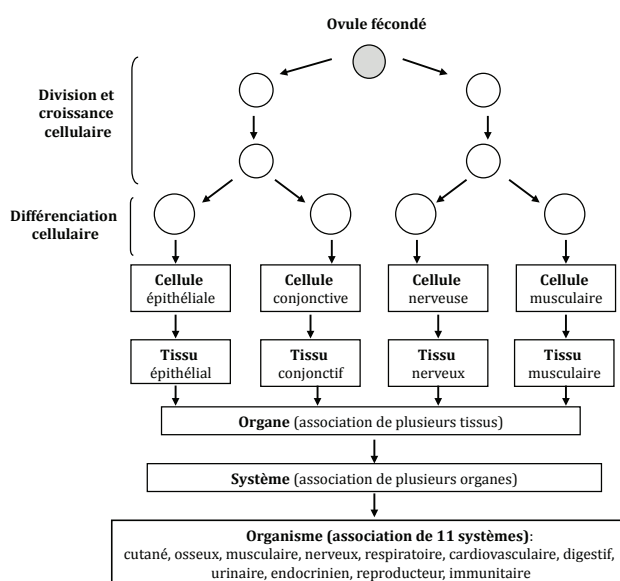
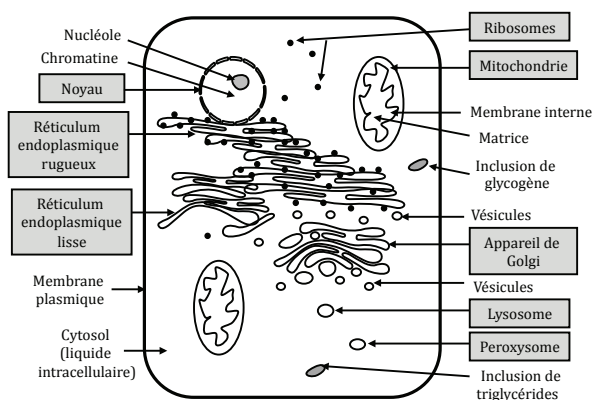


Figure I-1.2. Niveaux d'organisation du corps humain.

### 1.3.2. Structure des cellules

Toutes nos cellules comportent : 1. une membrane plasmique (cellulaire) qui sépare les composants internes de la cellule du milieu extracellulaire, 2. un noyau qui contient le matériel génétique qui contrôle le fonctionnement de la cellule, et 3. un cytoplasme formé du cytosol (liquide intracellulaire) dans lequel baignent les organites (structures spécialisées dans des activités cellulaires précises). On peut également y retrouver des inclusions, structures temporaires, qui contiennent des sécrétions et des produits stockés par la cellule (**figure I-1.3**).

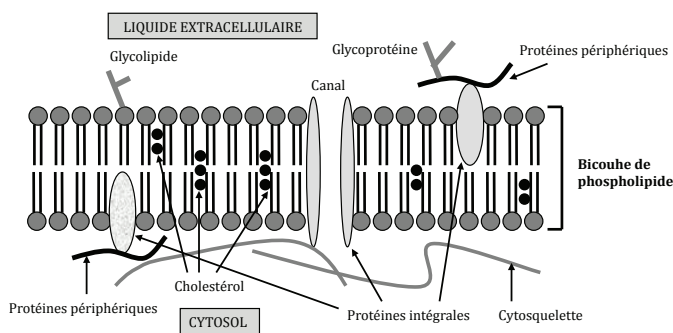


**Figure I-1.3. Structure d'une cellule.** Elle est entourée d'une membrane et contient des organites qui baignent dans le cytosol.

#### a. Membrane plasmique

La membrane plasmique sert de barrière, régule les échanges avec le milieu extracellulaire et permet la communication cellulaire. Elle est constituée de lipides (majoritaires) et de protéines (**figure I-1.4**).

Près de 75 % des lipides de la membrane sont des **phospholipides** formés d'un glycérol, de deux acides gras et d'un groupement phosphate. Ils sont disposés en deux rangées parallèles du fait qu'ils possèdent une partie hydrophile (tête contenant la molécule de glycérol et le groupement phosphate) et une partie hydrophobe (les deux acides gras) (**figure I-1.5**).



**Figure I-1.4. Structure de la membrane des cellules.**

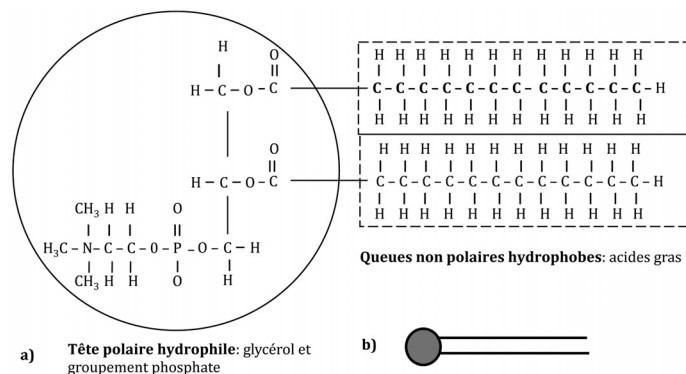


Figure I-1.5. Structure des phospholipides. a) Structure moléculaire. b) Schématisation d'un phospholipide

Dans la double couche, les phospholipides sont orientés de façon à ce que les têtes hydrophiles soient en contact avec l'eau (cytosol à l'intérieur et liquide extracellulaire à l'extérieur) alors que les queues hydrophobes se trouvent à l'intérieur de la membrane (figure I-1.4). Des molécules de **cholestérol** (20 % des lipides membranaires) se trouvent entre les phospholipides : le cholestérol augmente l'étanchéité de la membrane mais diminue sa fluidité. Les 5 % restants des lipides sont des **glycolipides** (glucide fixé à un lipide) qui se trouvent sur la face externe et qui jouent un rôle dans l'adhésion, la reconnaissance et la communication cellulaire.

Les **protéines** de la membrane sont intégrées dans la bicouche de lipides (protéines intégrales) ou sont situées en périphérie sur la face externe ou interne (protéines périphériques).

Les protéines intégrales, dont la plupart sont des **glycoprotéines** (glucide fixé à la protéine), forment :

1. des canaux (pores) par lesquels des substances entrent ou sortent de la cellule,
2. des transporteurs qui déplacent une substance d'un côté de la membrane à un autre,
3. des récepteurs qui peuvent reconnaître spécifiquement une molécule (hormone) se fixer à elle et modifier le fonctionnement de la cellule (voir I-3.3).

Les protéines périphériques peuvent être du côté du cytoplasme ou du côté du milieu extracellulaire. Du côté du cytoplasme, elles forment des points d'attache aux filaments et tubules du cytosquelette qui donne la stabilité et la forme à la cellule et qui participe à son mouvement. Du côté du milieu extracellulaire, elles forment des points d'attache aux protéines de la matrice extracellulaire (voir I-2.1.3). Les glycoprotéines peuvent également être des marqueurs de l'identité cellulaire (protéines du complexe majeur d'histocompatibilité ou CMH).

La membrane plasmique régule l'entrée et la sortie des substances de la cellule grâce à sa perméabilité sélective. Il existe deux grands types de transports : **le transport passif qui se fait sans énergie et le transport actif qui s'effectue avec énergie.**

**Le transport passif** se fait selon le gradient de concentration de la substance c'est-à-dire du côté où sa concentration est la plus élevée vers le côté où sa concentration est la plus faible. Les quatre types de transport passif sont la diffusion simple, la diffusion facilitée, l'osmose et la filtration/réabsorption.

**La diffusion simple** est un déplacement de petites molécules, soit entre les phospholipides pour les petites molécules liposolubles ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $O_2$ ), soit par des canaux protéiques pour les petites molécules hydrosolubles ( $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Cl^-$ ).

**La diffusion facilitée** s'effectue par l'intermédiaire d'un transporteur (perméase) qui facilite le transfert de composés non liposolubles comme les ions  $H^+$ , le  $Ca^{2+}$ , le glucose ou les acides aminés.

**L'osmose** est une diffusion d'eau selon le gradient de concentration c'est-à-dire du côté hypotonique (le plus dilué) vers le côté hypertonique (le plus concentré) jusqu'à équilibre des concentrations (deux côtés isotoniques). Ce mécanisme passif distribue l'eau dans tous les compartiments liquidiens de l'organisme (intracellulaire, extracellulaire et plasmique).

**La filtration et la réabsorption** correspondent à une diffusion d'eau et de petites molécules selon le gradient de pression hydrostatique à travers les cellules endothéliales (capillaires, corpuscules et tubules rénaux). Lors de la filtration, l'eau sort et lors de la réabsorption, l'eau entre. Ce mécanisme permet au liquide plasmique et à ses solutés de traverser la membrane des capillaires pour baigner les tissus (liquide interstitiel). La filtration et la réabsorption ont également lieu au niveau des reins lors de la formation de l'urine.

**Le transport actif** est un mécanisme qui peut s'effectuer contre le gradient de concentration et qui nécessite de l'énergie. Il entre en jeu lorsqu'une substance ne peut traverser la membrane par un des quatre mécanismes de transport passif. Il permet notamment aux cellules de conserver un milieu intérieur différent du milieu extérieur.

Ce type de transport peut faire intervenir des pompes liées à une enzyme ATPase telle la **pompe sodium/potassium**. En effet, la membrane est perméable aux ions potassium ( $K^+$ ) et ceux-ci sont plus concentrés à l'intérieur qu'à l'extérieur de la cellule : ils diffusent donc vers l'extérieur selon leur gradient de concentration (transport passif). Le sodium ( $Na^+$ ) est plus concentré à l'extérieur qu'à l'intérieur : il va donc entrer dans la cellule. La présence de ces pompes, qui fait sortir 3  $Na^+$  et entrer 2  $K^+$ , permet donc de maintenir leur différence de concentration de part et d'autre de la membrane. La pompe  $Na^+/K^+$ -ATPase s'oppose à la tendance normale de ces ions à diffuser passivement et permet de maintenir les gradients électrochimiques nécessaires à la stimulation de certaines cellules (cellules nerveuses et musculaires) (voir I-3.2.5 et II-1.2.2).

Le transport actif peut également s'effectuer par l'intermédiaire de vésicules comme l'**exocytose** et l'**endocytose**. L'exocytose permet l'excrétion de substances par la cellule via des vésicules qui fusionnent avec la membrane plasmique : le contenu de la vésicule est alors expulsé hors de la cellule. Par exemple, la libération de neuromédiateurs (acétylcholine) par les terminaisons synaptiques des neurones se fait par exocytose (voir II-1.2.2). L'endocytose est un transport de molécules du milieu extracellulaire vers le milieu intracellulaire : les substances sont entourées par une portion de membrane cellulaire, un sac membranaire se forme puis se referme avant de se détacher et de se déplacer vers l'intérieur de la cellule. Les cellules phagocytaires (macrophage et neutrophile) du système immunitaire utilisent ce mécanisme pour ingérer les pathogènes.

#### b. Noyau

Le noyau, structure sphérique ou ovale, contient le matériel génétique, l'**acide désoxyribonucléique (ADN)** qui détermine la structure et le fonctionnement de la cellule. Il est séparé du cytoplasme par une enveloppe nucléaire similaire à la membrane plasmique, excepté qu'elle possède des pores ayant un diamètre près de dix fois plus gros. Toutes

les cellules du corps possèdent un (la plupart des cellules) ou plusieurs (cellules musculaires squelettiques) noyaux excepté les globules rouges. Dans le noyau, on retrouve un ou plusieurs nucléoles qui contiennent de l'acide ribonucléique ribosomal (ARNr). Il constitue le lieu d'assemblage des ribosomes (voir les organites). Dans une cellule qui n'est pas en phase de division cellulaire (mitose), l'ADN qui est lié à des **protéines (histones)** est sous forme relâché et constitue un réseau appelé **chromatine**. Pendant la division cellulaire, l'ADN se condense et forme les **chromosomes**.

### c. Organites

Les cellules contiennent des structures spécialisées appelées organites (petits organes) (figure I-1.3). Ces structures assurent les différentes activités de la cellule.

#### **Les ribosomes**

Les ribosomes sont de petits granules constitués de deux sous-unités. Ils sont formés d'acide ribonucléique (ARN) et de protéines. Leur nom vient du fait qu'ils contiennent beaucoup d'ARN. Les ribosomes sont spécialisés dans l'assemblage des différents acides aminés des protéines conformément au code génétique (voir I-2.1.4). Il existe deux sortes de ribosomes : les ribosomes libres, en suspension dans le cytosol, et les ribosomes liés, fixés sur le réseau membranaire formant le réticulum endoplasmique. Les ribosomes libres produisent surtout des protéines qui agissent à l'intérieur du cytosol. Les ribosomes liés synthétisent des protéines destinées à la membrane plasmique ou à des vésicules (lysosomes ou vésicules d'exportation).

#### **Le réticulum endoplasmique**

Le réticulum endoplasmique (RE) forme un labyrinthe membranaire étendu qui représente un volume important dans la plupart des cellules. Il comprend un réseau de tubules et de sacs appelés citernes. Il existe deux types de RE : **le réticulum endoplasmique rugueux (RER)** et **le réticulum endoplasmique lisse (REL)**. Le RER doit son aspect granulaire aux ribosomes se trouvant sur sa membrane qui est en continuité avec la membrane du noyau.

**Le REL**, qui ne porte pas de ribosomes, est en continuité avec le RER. Le REL est impliqué dans la synthèse de certains lipides (hormones sexuelles et hormones stéroïdes sécrétées par les corticosurrénales), la détoxification de la cellule (médicaments, drogues) et le stockage du calcium (réticulum sarcoplasmique des cellules musculaires) (voir II-1.1).

**Le RER**, grâce aux ribosomes attachés à sa membrane, synthétise les protéines destinées à devenir des produits de sécrétion. Les protéines de sécrétion formées, destinées à être insérées dans la membrane ou exportées hors de la cellule, quittent le réticulum, emballées dans des vésicules de transport.

#### **L'appareil de Golgi**

L'appareil de Golgi est constitué de sacs aplatis (sacculles) empilés les uns sur les autres avec des extensions à leurs extrémités. Son fonctionnement est lié à celui du RER : les vésicules de transport contenant les protéines synthétisées dans le RE se déplacent jusqu'à l'appareil de Golgi et fusionnent avec ses membranes. Lors de leur passage dans les sacculles, les protéines sont modifiées (rajout d'un peptide signal qui indique leur destination définitive) puis emballées dans des vésicules qui se détachent de l'autre côté de l'appareil de Golgi. Les lipides destinés à former la membrane passent également par l'appareil de Golgi. Il existe trois types de vésicules en fonction des protéines qu'elles contiennent : vésicules membranaires, de sécrétion ou de stockage (lysosomes).