

Partie II. Physiologie des vertébrés

1. Physiologie des glandes endocrines
2. Les compartiments liquidiens de l'organisme
3. La respiration
4. La circulation sanguine
5. L'Excrétion rénale
6. La digestion
7. La thermorégulation

Chapitre 1. Physiologie des glandes endocrines.

1. Introduction

La transmission de l'information est essentielle à la coordination et la régulation des fonctions physiologiques. Chez les animaux, la transmission et l'intégration des informations s'effectuent par voie nerveuse et par voie chimique. C'est ainsi que le système endocrinien (endo : à l'intérieur et krinien : sécrété) constitue le 2^{ème} grand système de communication de l'organisme après le SN avec lequel il travaille en synergie pour coordonner les fonctions de tous les systèmes du corps.

Le système endocrinien agit sur les cellules de l'organisme par l'intermédiaire d'hormones déversées dans le sang. Son mode d'action est plus lent que l'influx nerveux. Il est constitué de glandes disséminées dans l'organisme.

2. Les glandes endocrines

Les glandes sont des organes constitués de cellules glandulaires dont le fonctionnement permet d'assurer la synthèse, le stockage et la libération d'une ou de plusieurs substances chimiques appelés hormones qui sont déversées directement dans le sang.

2.1. Les types de glandes

On différencie les glandes endocrines, les glandes exocrines et les glandes mixtes (figure 01).

Les glandes exocrines déversent leurs sécrétions à l'extérieur (dans un organe ou hors du corps), en dehors de la circulation sanguine, par l'intermédiaire d'un canal excréteur (Ex : les glandes Sudoripares).

Les glandes endocrines sécrètent des hormones et les déversent directement dans le sang. Elles ne possèdent pas de canal excréteur. (Ex : la thyroïde, les surrénales).

Les glandes sont dites **mixtes** lorsque la sécrétion est double exocrine et endocrine. (Ex : le pancréas).

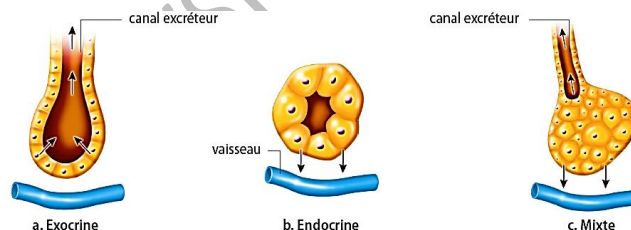


Figure 01 : les différents types de glandes.

2.2. Les principales glandes endocrines

2.2.1. Hypothalamus : organe du SNC situé au-dessus de l'hypophyse et en contact avec le cervelet. En connexion avec l'hypophyse il sécrète des neuro-hormones et intervient dans la régulation endocrinienne et du système nerveux autonome. Ainsi, il intervient dans la régulation des fonctions comportementales sexuelle, alimentaire, de défense, de stress, de thermorégulation.

L'hypothalamus sécrète des hormones qui contrôlent toutes les sécrétions de l'hypophyse, soit en les inhibant, soit en les stimulant : les releasing hormones (TRH, GnRH, CRF), l'ADH et l'ocytocine.

2.2.2. Hypophyse : glande de petite taille (0,5 g), située à la base de l'encéphale, reliée à l'hypothalamus par une tige pituitaire, appelée aussi glande pituitaire et est divisée en 2 lobes.

Le lobe antérieur (adénohypophyse) sécrète de très nombreuses hormones : GH, prolactine, ACTH, TSH, LH, FSH, MSH.

Le lobe postérieur (neurohypophyse) libère deux hormones secrétées par l'hypothalamus : L'ADH et l'ocytocine.

L'hypophyse est le chef d'orchestre du système endocrinien car elle régule les autres glandes endocrines.

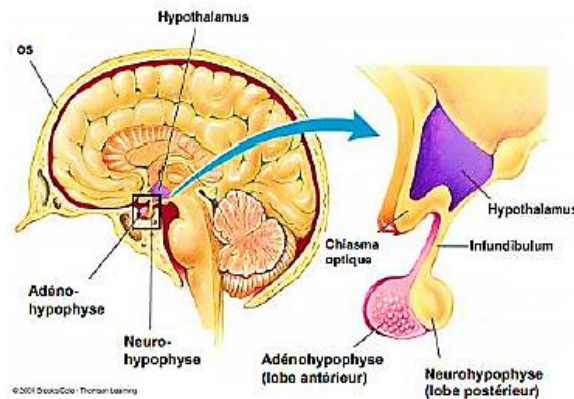


Figure 02 : Localisation de l'hypothalamus et de l'hypophyse.

2.2.3. Le thymus : Localisé dans le thorax, en arrière du sternum, il est volumineux à la naissance puis régresse pour disparaître à l'âge adulte. Il sécrète 2 hormones : la thymopoïétine et la thymosine.

2.2.4. La thyroïde : Glande volumineuse située à la face antérieure du cou, elle a une forme de papillon dont les ailes entourent la trachée. Elle accumule 20 % de l'iode contenu dans l'organisme.

Elle fabrique les hormones thyroïdiennes : la thyroxine (T4) et la triiodothyronine (T3). La thyroïde sécrète aussi la calcitonine qui a un effet hypocalcémiant.

2.2.5. Les glandes parathyroïdes : Elles sont, le plus souvent, au nombre de quatre et sont accolées à l'arrière de la thyroïde. Les glandes parathyroïdes régulent le taux de calcium et de phosphore sanguin. Elles fabriquent la parathormone (PTH) qui, avec la vitamine D, maintient un taux stable de calcium dans le sang. Elles sont vitales, sans leurs présences, c'est la mort par arrêt respiratoire.

2.2.6. Les glandes surrénales : Placées sur les reins, elles sont au nombre de deux et ont une forme de triangle. Elles sont composées de deux structures différentes qui se superposent :

- La médullosurrénale, au centre, très vascularisée ;
- La corticosurrénale, indispensable à la vie, qui l'entoure.

La corticosurrénale : Elle synthétise une trentaine d'hormones appelées corticostéroïdes ou corticoïdes, divisée en trois groupes :

- les minéralo-corticoïdes : L'hormone principale est l'aldostérone ;
- les glucocorticoïdes : L'hormone essentielle est le cortisol ;
- et les hormones androgènes (hormones sexuelles).

La médullosurrénale : elle fabrique les catécholamines, 2 hormones : l'adrénaline et la noradrénaline.

Les glandes surrénales sécrètent en permanence faiblement mais réagissent rapidement en cas d'agression contre l'organisme. Les facteurs déclenchants sont l'hypotension artérielle, l'effort musculaire, le froid, les émotions, la douleur et l'hypoglycémie.

2.2.7. Le pancréas endocrine : situé dans le cadre duodénal (abdomen), en arrière de l'estomac, c'est une glande mixte. Sa fonction endocrine est assurée par des cellules spécialisées, disséminées au sein de la glande et appelées îlots de Langerhans.

Le pancréas sécrète plusieurs hormones dont les 2 principales sont antagonistes, l'insuline et le glucagon.

2.2.8. Les gonades : ce sont les ovaires chez la femelle et les testicules chez le mâle. Ce sont des glandes mixtes. Elles produisent les hormones sexuelles qui, à la puberté, sont responsables du développement des caractères sexuels secondaires.

Les ovaires : se situent au niveau de l'utérus. Ils sont au nombre de deux. Leur fonction endocrine est cyclique et la sécrétion des hormones s'effectuant selon un rythme qui se superpose au cycle utérin : les œstrogènes et la progestérone. Elles débutent à la puberté et s'arrêtent à la ménopause.

Les testicules : au nombre de deux, ils sont situés dans le scrotum. Leur volume est relativement réduit jusqu'à la puberté puis atteint leur taille normale chez l'adulte. Les testicules produisent les androgènes dont l'hormone principale est la testostérone.

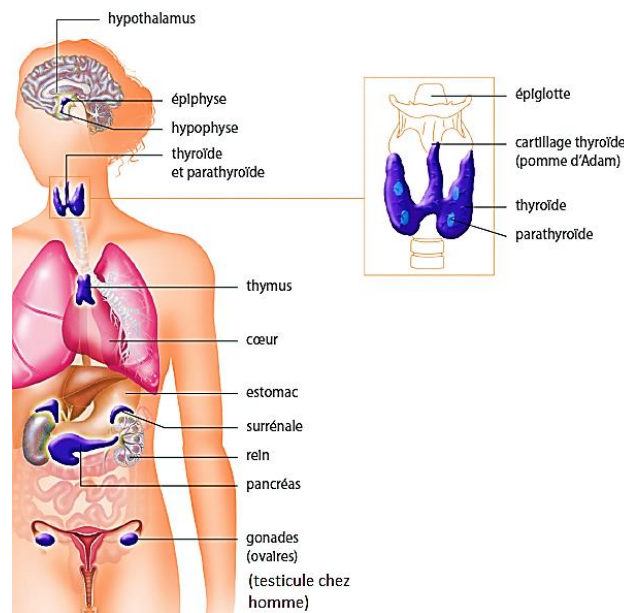


Figure 03 : Localisation des glandes endocrines dans le corps.

3. Les hormones

Les hormones sont des substances chimiques sécrétées par des cellules spécialisées (endocrines). Elles sont déversées dans le sang et jouent le rôle de messagers qui assurent la transmission de l'information d'une glande à une autre glande, à un tissu ou à un organe en exerçant leur action sur les cellules de ce dernier (cellules cibles).

La synthèse hormonale est continue mais sa libération est variable voire cyclique selon les besoins de l'organisme.

3.1. Nature des hormones

Les hormones appartiennent à trois catégories selon leurs propriétés chimiques :

3.1.1. Les hormones stéroïdes

Ce sont des lipides synthétisés dans le cytosol à partir du cholestérol. Au contact des cellules cibles, elles franchissent la membrane plasmique et interagissent avec des récepteurs intracellulaires.

3.1.2. Les hormones peptidiques

Elles forment le plus grand groupe d'hormones dans l'organisme. Après synthèse, elles sont stockées dans des vésicules sécrétoires. Ces vésicules de stockage leur permettent de franchir la membrane cellulaire par phénomène d'exocytose. Elles agissent sur les cellules cibles par l'intermédiaire de récepteurs de la membrane plasmique.

3.1.3. Les hormones monoaminées

Elles dérivent presque toutes d'un acide aminé, la tyrosine. Il s'agit des hormones thyroïdiennes et des catécholamines.

Deux autres acides aminés servent à la synthèse d'hormones, ce sont le tryptophane qui se transforme en sérotonine puis en mélatonine et le glutamate dont dérive l'histamine.

3.2. Modes d'action des hormones

Seules les cellules cibles de l'hormone sont sensibles à celle-ci car elles seules possèdent des récepteurs spécifiques de l'hormone. C'est la présence du récepteur hormonal qui confère à la cellule cible sa sensibilité vis à vis de l'hormone.

Les récepteurs sont spécifiques pour une hormone donnée mais une hormone peut avoir plusieurs types de récepteurs membranaires.

Les hormones à récepteur intracellulaire : les hormones liposolubles (H. thyroïdienne et H. stéroïdes) traversent la membrane phospholipidique de la cellule cible et forment un complexe H-R cytosolique (ou nucléaire) spécifique. Ce complexe migre dans le noyau et interagit avec l'ADN : active l'expression des gènes codant pour la synthèse d'une protéine (souvent une enzyme).

Les hormones à récepteur membranaire : les hormones peptidiques se fixent aux récepteurs membranaires. La formation du complexe H-R entraîne une cascade de réactions intracellulaires qui aboutit à la formation d'un Second Message. Ce dernier induit une réponse de la cellule cible : il s'agit le plus souvent de l'activation d'enzymes inactives (protéines kinases) en enzymes actives.

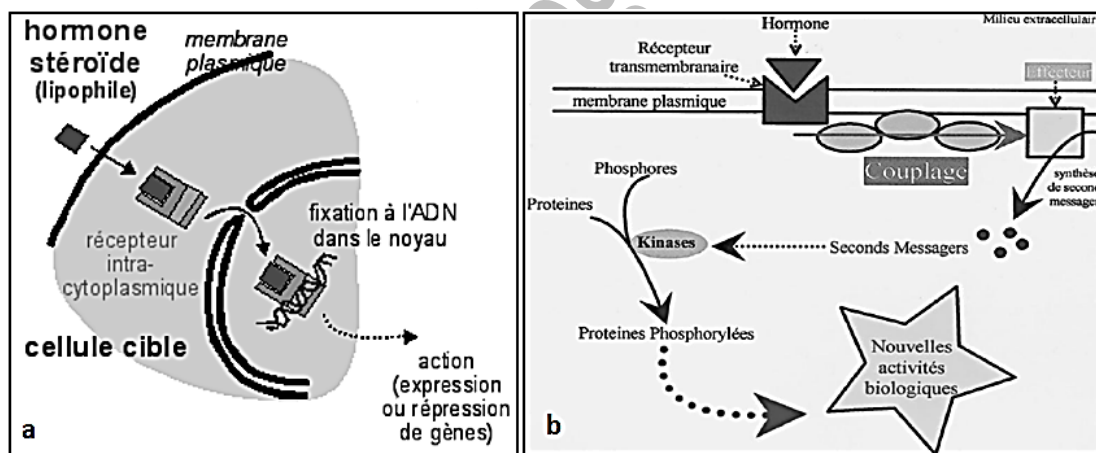


Figure 04 : Modes d'action des hormones (a : hormone stéroïde ; b : hormone peptidique).

3.3. Régulation de la sécrétion des hormones et notion de rétrocontrôle

Comme beaucoup de systèmes biologiques, les sécrétions hormonales sont régulées par des mécanismes de rétrocontrôle (feed-back) négatif. Ceci signifie que les molécules produites par les cellules cibles sous l'effet de l'hormone originale, passant dans la circulation générale, vont influencer l'activité des cellules glandulaires ce qui en retour induit une réduction de la sécrétion de l'hormone.

Le second type de régulation est le rétrocontrôle positif. Ce type est plus rare. Dans ce cas, l'élévation de la concentration de la molécule sécrétée par les cellules cibles va induire une sécrétion encore plus importante de l'hormone originale. Exemple pendant le cycle ovarien, le pic préovulatoire des gonadotrophines est déclenché le feed-back positif des oestrogènes sur le l'hypophyse antérieur.

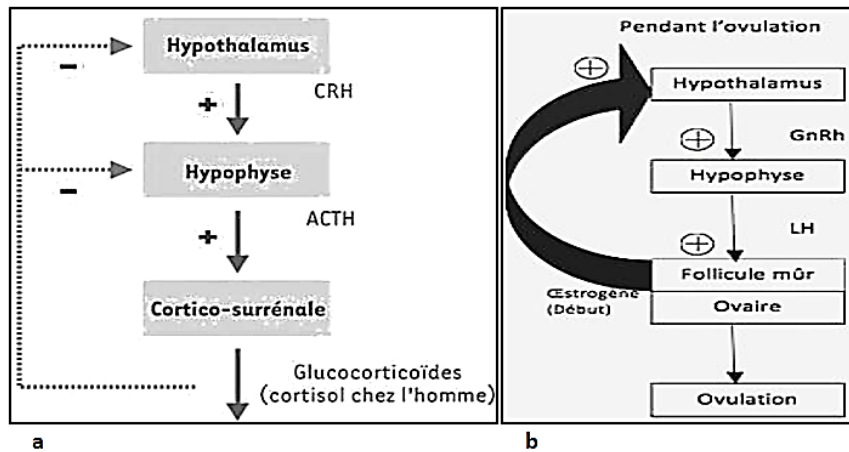


Figure 05 : Régulation hormonale (a : par rétrocontrôle négatif de la sécrétion des glucocorticoïdes ; b : provocation de l'ovulation par rétrocontrôle positif).

Résumé sur l'essentiel des hormones, origine (glande sécrétrice), rôle essentiel et tissu ou organe cible

Hormone	Glande sécrétrice	Rôle essentiel	Tissu ou organe cible
TRH (hormone de libération)	Hypothalamus	Centre de régulation du SN Contrôle des sécrétions hormonales hypophysaires	Sur l'hypophyse et contrôle les grandes fonctions de l'organisme (faim, soif, éveil, régulation de la température, système cardio respiratoire, viscères, etc.).
Thyréostimuline (TSH) Folliculostimuline (FSH) Hormone de croissance (GH)	Hypophyse	Action par l'intermédiaire d'autres hormones, les stimulines, qui régulent l'ensemble des glandes endocrines de l'organisme	Tous les tissus
Parathormone (PTH)	Parathyroïdes	Régulation de la calcémie et de la phosphorémie	Os, rein, intestin
T3, T4	Thyroïde	Accélère les « combustions » ou les réactions biochimiques, maintien de la T° du corps	Tous les tissus
Calcitonine		Abaisse la calcémie	Os et rein
Cortisol ou hydrocortisone Adrénaline	Glandes Surrénales	Assure le renouvellement des stocks de sucre Lutte contre l'inflammation et contre les agressions	Tous les tissus Hormone du « stress »
Aldostérone		Épargne le sel	Reins, glandes salivaires, Muscles
Androgènes surrénaliens		Rôle dans l'apparition des caractères sexuels secondaires et fonctionnement des gonades	Peau, phanères, muscles, graisses, organes génitaux et seins
Insuline	Pancréas	Pénétration du glucose dans les tissus Consommation et mise en réserve du glucose	Cellules musculaires et graisseuses Cellules hépatiques
Glucagon		Élévation de la glycémie	Foie et muscles
OEstrogènes Progestérone	Ovaires	Régulation des sécrétions hormonales des gonades	Ovaires
Testostérone	Testicules	Développement des spermatozoïdes, des caractères sexuels secondaires (qui différencient les hommes des femmes)	Testicules

Chapitre 2. Les compartiments liquidiens de l'organisme.

1. Introduction

L'eau est le constituant moléculaire le plus abondant dans l'organisme : environ 60% du poids corporel d'un adulte. Elle est répartie en compartiments ou secteurs ou volumes liquidiens.

Le volume, la composition en solutés et les propriétés physico-chimiques des différents compartiments sont stables. Cette stabilité constitue l'équilibre hydro électrolytique.

Différents mécanismes nerveux et hormonaux, concourent à cet équilibre en assurant l'annulation des bilans journaliers de l'eau et des électrolytes, c'est-à-dire l'égalité des entrées (ou gains ou absorptions) et des sorties (ou pertes ou excrétions).

Cette stabilité et les mécanismes qui la maintiennent constituent l'homéostasie¹. Elle est particulièrement importante pour le secteur interstitiel comme qui est le milieu ambiant de la vie cellulaire qu'on appelle « milieu intérieur² ».

2. Teneur en eau de l'organisme

L'organisme (humain par exemple) est constitué de 60 % d'eau et 40 % de substances organiques. La teneur en eau de l'organisme varie en fonction :

- de l'importance de la matière grasse : inversement proportionnelle à la teneur en MG (Plus le sujet est maigre plus la proportion de l'organisme en eau augmente.),
- de l'âge (plus les tissus vieillissent plus ils se déshydratent : nourrisson=75 % du PC ; l'adulte=65% du PC ; âgé=56% du PC.) (tableau 01),
- et du sexe (50% du poids de la femme) (tableau 01).

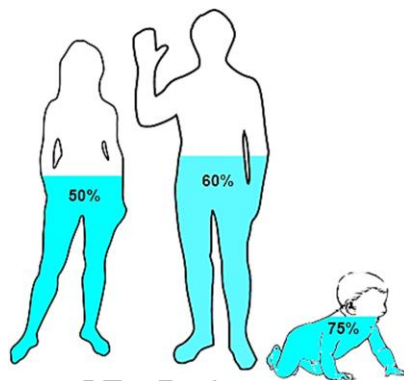


Figure 01 : Contenu corporel en eau.

Tableau 01 : Contenu corporel en eau.

Tranche d'âge	sexe	% du PC
0 à 6 mois	/	74
6 à 12 ans	/	60
12 à 18 ans	♂	59
	♀	56
19 à 50 ans	♂	59
	♀	50
+ de 50 ans	♂	56
	♀	47

3. Répartition de l'eau dans l'organisme (les compartiments liquidiens)

L'eau de l'organisme est répartie dans deux grands types de compartiments liquidiens :

- ✓ le compartiment intracellulaire : l'eau du cytosol (40% du PC) ;
- ✓ et le compartiment extracellulaire ou milieu intérieur (20% du PC) comprenant l'eau du plasma (5% du PC) et du liquide interstitielle (15% du PC).

¹ L'homéostasie est la tendance de l'organisme à maintenir ses différentes constantes à des valeurs ne s'écartant pas de la normale.

² Le milieu intérieur d'un organisme multicellulaire, comme l'Homme, correspond au liquide extracellulaire contenu dans le corps et séparé du milieu extérieur par le tissu cutané.

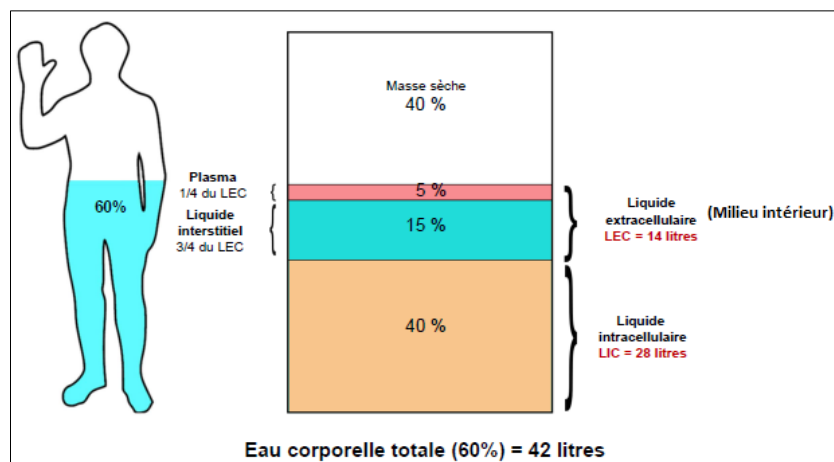


Figure 02 : répartition de l'eau dans l'organisme.

3.1. Le compartiment intracellulaire

Le liquide intracellulaire ou cytosol, est la substance semi liquide du cytoplasme, ayant un aspect visqueux, transparent et gélatineux, il contient :

- 75-90% d'eau ;
- enzymes et co-enzymes ; protéine solubles ; ions et nutriments (participent au métabolisme).

3.2. Le compartiment extracellulaire

3.2.1. Le liquide interstitiel a une composition proche de celle du plasma, il est situé dans l'espace entre capillaire sanguin et cellule.

3.2.2. La lymphe canalisée : C'est un liquide organique de couleur jaune pâle, constitué essentiellement d'eau. Elle circule dans le système lymphatique qui rejoint la circulation sanguine et présente la même composition biochimique que le liquide interstitiel.

3.2.3. Le plasma : Si on retire les éléments figurés du sang ; il existe un liquide jaune pâle dit plasma. Le plasma est composé de :

- 91-92% eau ;
- substances azotées (urée, créatinine, acide urique) ; glucose, lipides ; protéines.

A côté de ces deux compartiments, il existe un 3^{ème} compartiment désigné par l'expression : eau transcellulaire. Son contenu en eau est de 7,5% du poids du corps.

4. Détermination du volume des différents compartiments liquidiens

4.1. Eau totale

Le capital hydrique total est mesuré à l'aide de traceurs qui traversent les parois capillaires et les membranes cellulaires (urée, antipyrine, eau tritiée, eau lourde).

Dans la pratique médicale, une méthode très simple et très utile pour évaluer les modifications de l'hydratation totale consiste à suivre les variations rapides de la courbe de poids.

Chez un adulte de morphologie standard, l'eau représente 60% du poids.

4.2. VOLUME EXTRA-CELLULAIRE

C'est l'addition du volume plasmatique et du volume interstitiel. Il est mesuré à l'aide de traceurs traversant la paroi des capillaires mais non les membranes cellulaires. Il représente environ 20% du PC.

4.2.1. Volume plasmatique

En pratique, c'est le volume le plus intéressant pour deux raisons :

- Il peut être aisément prélevé et étudié.
- Ses caractéristiques fournissent des informations indirectes sur l'état d'autres volumes liquidiens.

a – mesures et index

La mesure directe du volume plasmatique (VP) utilise des traceurs comme l'iode 131. Le VP représente environ 5% du PC.

La mesure indirecte passe par celle du volume sanguin total (VST), mesuré aussi par des traceurs comme le chrome 151. Il représente environ 7% du PC.

Le volume plasmatique est ensuite calculé à partir du VST et de l'hématocrite (Hct %).

$$VP = (VST/100) \times (100 - Hct)$$

L'hématocrite représente entre 40 et 45% et le plasma entre 55 à 60%.

b – composition

Le plasma sanguin est le surnageant obtenu par centrifugation de sang anti coagulé. C'est un liquide jaune clair, environ 2,2 fois plus visqueux que l'eau et limpide.

Il est constitué de 92% d'eau, de 70 à 72 g/L de protéines, d'autres organiques (azotées, glucidiques et lipidiques) et de constituants minéraux.

La composition minérale est exprimée en charge anioniques et cationiques dont l'ensemble constitue l'ionogramme plasmatique.

Le plasma est avant tout une solution de chlorures et de bicarbonates de sodium, on considère en pratique que la quantité de sodium détermine le volume du plasma et globalement, des liquides extracellulaires.

c – pression osmotique (PO)

Mesurée par cryoscopie, le point de congélation du plasma est inférieur de 0,54°C à celui de l'eau pure et le point de congélation d'une solution dont la PO est 1 Osm/kg étant inférieur de 1,86°C.

Selon la loi de Raoult : La PO totale du plasma est : $0,54/1,86 = 0,290$ Osm/kg ou 290 mOsm /kg

En pratique médicale, une valeur approchée de la POT peut être obtenue par la formule :

$$POT = 2 \cdot \text{Natrémie} + \text{azotémie} + \text{glycémie}$$

$$= 2(140 \text{ mmol/L}) + 5 \text{ mmol/L} + 5,5 \text{ mmol/L} \approx 290 \text{ mOsm/kg}$$

La pression osmotique efficace ne tient pas compte du glucose ni de l'urée qui sont des solutés très diffusibles dont les variations ne sont pas à l'origine de gradients osmotiques entre les compartiments.

La PO totale du plasma est :

$$POT = 0,54/1,86 = 0,290 \text{ Osm/kg ou } 290 \text{ mOsm /kg}$$

$$POE = 2 \cdot \text{Natrémie} \approx 280 \text{ mosm/kg}$$

La simple valeur de la natrémie renseigne sur l'état osmotique du plasma. La concentration du sodium détermine la pression osmotique du plasma et globalement des liquides extracellulaires.

4.2.2. Volume interstitiel

a – Mesure

Elle est indirecte, par différence entre le volume extracellulaire et le volume plasmatique.

Chez un adulte, le volume interstitiel représente environ 16% du PC. Il comprend 3 fractions inégales :

- Le liquide interstitiel proprement dit ou lymphe non canalisée, véritable « milieu intérieur » compris entre les capillaires de la grande circulation et les cellules.
- la lymphe canalisée.
- les liquides Transcellulaires : liquide céphalorachidien (LCR), de l'œil, de l'oreille, des séreuses, des néphrons et du tube digestif.

b – composition de la lymphe non canalisée

Sa détermination est difficile parce que les méthodes de prélèvement sont imparfaites.

La lymphe non canalisée a la structure d'un gel relativement déshydraté : l'eau, les solutés et les cellules sont enfermés dans un réseau maillé de protéines fibrillaires. Il peut être considéré comme un ultrafiltrat plasmatique presque dépourvu de protéines (2 à 5 g/L à la périphérie).

Sa composition électrolytique est proche de celle du plasma avec de faibles différences (absence d'anions protéiques, concentration des anions Cl^- un peu supérieure à celle du plasma, et celle des cations Na^+ un peu inférieure).

c – pression osmotique

Elle est inférieure à celle du plasma : La pression oncotique ou pression colloïde osmotique **Π_c des protéines plasmatiques** représente environ 1,5 mOsm/kg ou **25 mmHg**. La pression oncotique **Π_i des protéines interstitielles** ne représente qu'**environ 4 mmHg**.

Cette différence joue un rôle important dans les échanges capillaires.

4.3. VOLUME INTRACELLULAIRE

C'est le volume liquidien enfermé dans les cellules. Sa mesure est indirecte, par différence entre l'eau totale et le volume extracellulaire. Il représente environ 40% du PC d'un adulte.

En fait, la proportion d'eau est très différente selon les types cellulaires : 70% dans les hépatocytes, 10% dans les adipocytes...

En moyenne, les anions principaux sont les phosphates et les protéinates ; les cations principaux sont le potassium et le magnésium.

La composition électrolytique cellulaire est donc complètement différente de la composition extracellulaire.

Ce liquide est une solution peu idéale dans laquelle beaucoup d'électrolytes sont incomplètement dissociés et beaucoup d'ions liés aux protéines.

La pression osmotique semble un peu supérieure à la pression osmotique extracellulaire.

Cette composition et cette pression osmotique différente de celles du milieu extracellulaire impliquent pour être préservées, des transports actifs cellulaires permanents.

Chapitre 3. Respiration.

1. Introduction

La respiration permet aux organismes d'obtenir de l' O_2 et d'éliminer du CO_2 . Les cellules animales réalisent en effet l'oxydation des nutriments et obtiennent ainsi l'énergie nécessaire à leur fonctionnement. Ces réactions nécessitent de l' O_2 et produisent du CO_2 . L'approvisionnement en O_2 et l'évacuation du CO_2 sont effectués grâce à l'appareil respiratoire.

Cet appareil (respiratoire) a pour fonction l'hématose (apport d' O_2 au sang qui le distribue dans tout l'organisme et rejet du CO_2). Aussi :

- Il participe à la défense de l'organisme.
- Il possède des vertus endocriniennes : sérotonine...etc.
- Il intervient dans l'homéostasie de l'équilibre acido-basique.

2. Les différents types de respirations chez les vertébrés

Selon leur milieu environnant, les vertébrés sont dotés de différents organes respiratoires :

- les poumons alvéolaires chez les mammifères ;
- les poumons tubulaires chez les oiseaux ;
- les branchies chez les poissons (milieu aquatique).

Il existe aussi des organes respiratoires particuliers tels que la peau (respiration tégumentaire) chez l'anguille et certains amphibiens et la cavité buccale chez certains poissons et amphibiens.

Il suffit que ces organes soient bien vascularisés (bon apport sanguin, car c'est le sang qui transporte l' O_2 reste du corps), qu'ils puissent demeurer humides, et qu'ils viennent en contact renouvelé avec l'air.

2.1. Les poumons alvéolaires des mammifères (cas de l'homme)

Le poumon humain présente une structure complexe. Il contient de très nombreux vaisseaux capillaires, qui constituent un réseau d'une longueur totale de 2400 km. Aussi, il est muni de minuscules structures, les alvéoles pulmonaires, petits sacs microscopiques regroupés en amas (les sacs alvéolaires), au niveau desquelles passent des capillaires sanguins, et qui sont le lieu des échanges gazeux respiratoires. Chaque poumon contient pas moins de 300 millions de ces alvéoles pulmonaires.

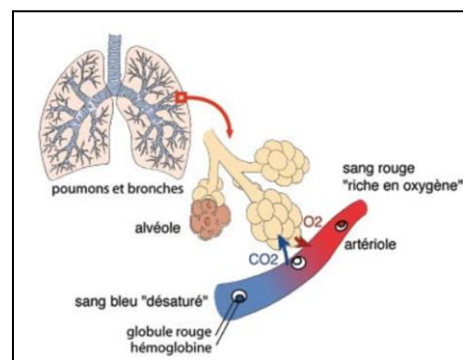


Figure 01 : Poumons alvéolaires humains.

2.2. Les poumons tubulaires des oiseaux

Chez les oiseaux, l'échangeur respiratoire est représenté par deux poumons rigides, inextensibles dont les unités fonctionnelles sont des parabronches tubulaires au niveau desquels l'air passe toujours dans le même sens (unidirectionnel). La ventilation est assurée par de volumineux sacs aériens extrapulmonaires. Ces sacs n'interviennent pas directement dans les échanges gazeux. Ils fonctionnent comme des soufflets assurant une circulation continue de l'air dans les parabronches.

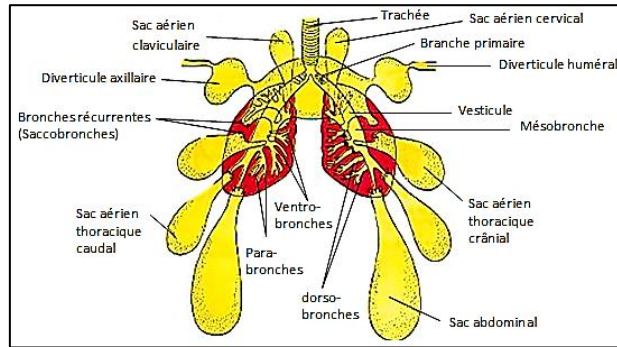


Figure 02 : Poumons tubulaires et sacs aériens chez les oiseaux.

Ce système assure une surface d'échange 10 fois supérieure à celle obtenue chez les mammifères, à taille comparable. Il assure un meilleur rendement par un renouvellement total de l'air. Le rendement est aussi amélioré par une disposition à "courants croisés" des flots de sang et d'air au niveau des parabronches.

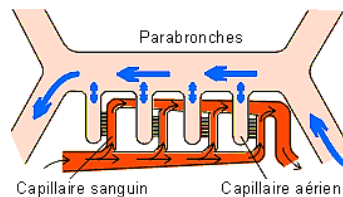


Figure 03 : Disposition à "courants croisés" air/sang au niveau des parabronches (Piiper et Scheid., 1992).

2.3. Les Branchies des poissons

En comparaison avec l'air, l'eau ne représente pas un milieu facile pour la respiration : Le milieu aquatique est 800 fois plus dense, 100 fois plus visqueuse et 30 fois plus pauvre en O_2 que le milieu aérien (et donc plus difficile à le déplacer dans les organes respiratoires).

L'organe respiratoire des organismes aquatiques est la branchie. Typiquement, les branchies présentent une structure lamellée (pour augmenter la surface d'échange) et une cuticule mince (pour faciliter la diffusion). Le sang y circule pour y recevoir l'oxygène de l'eau et y décharger le CO_2 . Le patron de circulation entre sang et eau est à contre-courant pour maximiser les échanges gazeux.

Les poissons, pompent l'eau de façon active. À chaque cycle, la circulation de l'eau au travers des branchies est continue et unidirectionnelle, ce qui permet l'établissement du système à contre-courant entre le sang et l'eau. L'excellente extraction d'oxygène par ce système d'échange, réussit à compenser les désavantages respiratoires de l'eau.

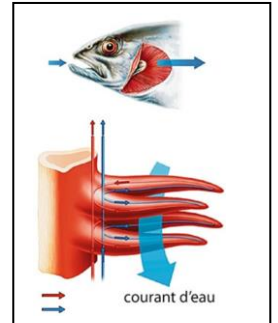


Figure 04 : Branchies des poissons et disposition à "contre courants".

3. Structure et fonctions du système respiratoire humain

3.1. Fosses nasales et pharynx

L'air pénètre par le nez. Au niveau de la région naso-pharyngée, il est humidifié, chauffé à la température du corps, et privé de grosses particules qu'il peut contenir. L'épithélium nasal peut aussi métaboliser certains xénobiotiques.

3.2. Trachée- artère et bronches

La trachée, les artères et les bronches sont recouvertes d'un épithélium présentant des **cellules ciliées** et deux types de cellules non ciliées les cellules **muqueuses** et **séreuses**.

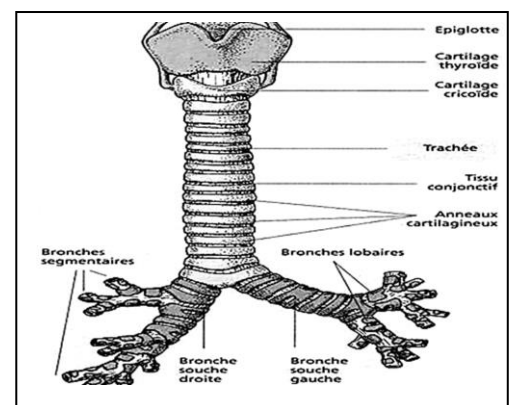


Figure 06 : larynx, trachée et arbre bronchique.

Les cellules muqueuses sécrètent le mucus du tractus respiratoire, les cellules séreuses produisent un liquide dans lequel le mucus peut dissoudre. Par action conjuguée des cils vibratiles et du mucus, les particules superficielles sont remontées jusqu'à la bouche ou elles seront soit rejetées par expectoration, soit dégluties et avalées. Le mucus joue aussi un rôle antioxydant, neutralisant de l'acidité.

3.3. Lobules, bronchioles, alvéoles

Les poumons humains comprennent 5 lobes, 2 pour le poumon gauche, 3 pour le poumon droit. A l'intérieur, les bronches se ramifient pour aboutir aux lobes pulmonaires ; les plus fines constituent alors les **bronchioles** qui sont tapissées par un épithélium renfermant des cellules ciliées.

Les bronchioles conduisent aux **alvéoles**, dont le nombre avoisine 300 million chez l'homme, séparés entre eux par une fine cloison occupée en grande partie par les capillaires pulmonaires.

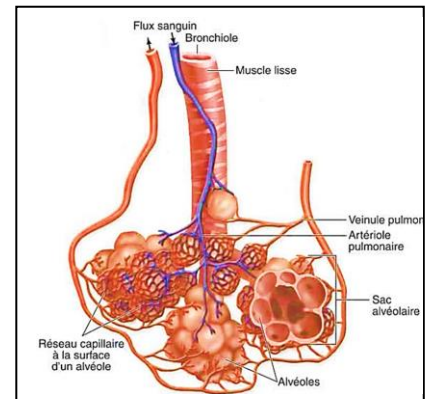


Figure 07 : bronchiole et alvéole.

La minceur de l'espace séparant l'air alvéolaire du sang enrichi en CO_2 permet à l'**hématose** (échange d' O_2 et CO_2 entre sang et air) de s'effectuer. Les alvéoles constituent aussi les principaux sites d'absorption des toxiques gazeux ou volatiles. L'épithélium alvéolaire est composé de trois types de cellules :

- Des **pneumocytes de type I**, petites cellules au niveau desquelles se fait la diffusion des gaz et des petites molécules non ionisées.
- Des **pneumocytes de type II**, grandes cellules considérées comme des précurseurs des pneumocytes I, qui autorisent le passage de grosses molécules par transport actif.
- Des **cellules épithéliales de type III**, cellules « en brosse », plus rares tout au moins chez l'homme.

Au niveau des alvéoles, il y a aussi des fibroblastes (P° de collagène et élastine) et des macrophages assurent une fonction épuratrice (phagocytose de microorganismes et de cellules altérées) et des fonctions métaboliques.

4. La contractilité bronchique

A la surface du muscle lisse bronchique se trouvent des récepteurs du système sympathique / parasympathique : **α_1** et **β_2** .

La stimulation des récepteurs **β_2** par l'adrénaline (messager du système sympathique) entraîne une bronchodilatation.

La stimulation des récepteurs **α_1** par l'acétylcholine (messager du système parasympathique) entraîne une bronchoconstriction.

Il existe des médicaments mimant l'action du système sympathique : **β_2 -mimétiques (salbutamol)**.

5. Les muscles respiratoires

5.1. Muscle inspiratoire principale

5.1.1. Le diaphragme : formé de 2 coupes (D > G) à cause du foie, innervé par le nerf phrénique. Sa contraction entraîne :

- Abaissement des viscères abdominaux ;
- Augmentation du volume de la cage thoracique.

L'ensemble des deux phénomènes produit une dépression intra-thoracique d'où appel d'air.

5.1.2. Muscles intercostaux externes (situés entre 2 côtes) : en se contractant ils comblent les espaces intercostaux. Ces muscles interviennent essentiellement dans l'inspiration forcée.

5.2. Muscles expiratoires : Relâchement des muscles inspiratoires.

Dans l'expiration forcée, relâchement des muscles intercostaux.

A l'inspiration de repos on inhale en moyenne 500ml d'air ; 350 ml parviennent aux alvéoles. 150 ml ne participe pas aux échanges alvéolo-capillaires. On dit alors qu'il existe un espace mort qui ne participe pas aux échanges.

6. Processus de la respiration

6.1. Transport des gaz

97% d'O₂ est lié à l'hémoglobine et 3% dissous dans le sang.

Pour le CO₂, 25% lié à l'hémoglobine, 5% dissous dans le sang et 70% liée au bicarbonate (régulation de l'équilibre acide-base).

6.2. Échanges gazeux au niveau pulmonaire

Les gaz diffusent de la pression la plus élevée vers la plus basse.

6.3. Échanges au niveau des alvéolaires

Les différentes pressions au niveau de l'alvéole et des capillaires organisent le mouvement des gaz. Le sang désoxygéné qui arrive dans les capillaires, présente une pression en CO₂ supérieure à la pression alvéolaire provoque la sortie du CO₂, et une pression en O₂ plus faible que la pression alvéolaire se traduit par l'entrée de l'O₂ dans les capillaires.

6.4. Échanges au niveau tissulaires

Les échanges au niveau des tissus fonctionnent suivant le même principe de gradient de pression. L'O₂ sort en direction des cellules et le CO₂ produit par les tissus rentre dans les capillaires.

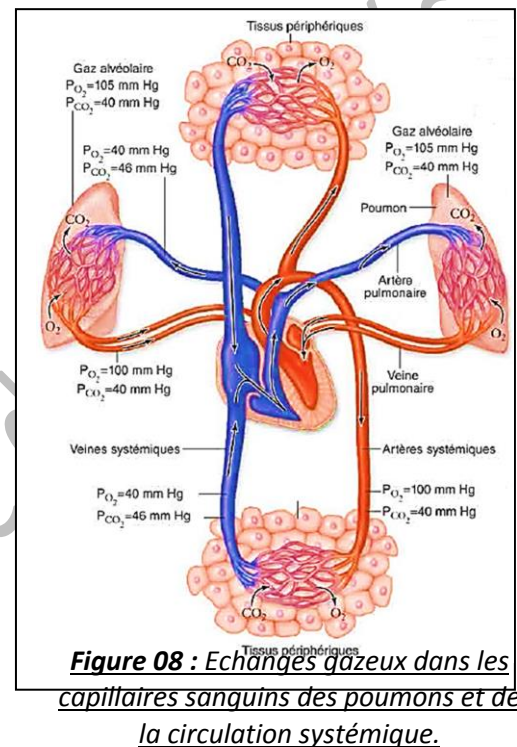
6- Régulation de la respiration :

Au repos, on ventile peu mais à l'exercice on ventile plus. Cette hyperventilation est due à trois éléments de base qui entre en jeu dans la régulation de la ventilation :

- **Les récepteurs** : ils recueillent l'information (stimuli) et la transmet.
- **Les centres respiratoires** : ils coordonnent les informations reçues par les récepteurs et envoient des impulsions aux muscles respiratoires.
- et **les effecteurs** : ce sont les muscles respiratoires (contraction, décontraction, respiration).

Il existe un contrôle nerveux de la respiration, provient des centres respiratoires. Il existe trois centres respiratoires au niveau du tronc cérébral :

- ▶ Le centre bulbaire.
- ▶ Le centre apneustique.
- ▶ Le centre pneumo taxique.



Chapitre 4. Circulation sanguine.

1. Le sang

Le sang est un tissu conjonctif liquide composé d'une matrice fluide, le **plasma**, dans lequel plusieurs types **de cellules et d'éléments figurés** circulent. Le sang est pompé par le cœur et propulsé dans les vaisseaux du système cardiovasculaire (artères, artérioles, capillaires, veinules, veines).

1.1. Les fonctions du sang :

- **Transport** : Il amène l'O₂, les nutriments et les hormones, jusqu'aux tissus. Il transporte le CO₂ et permet l'excrétion hors de l'organisme des déchets produits par les tissus.
- **Régulation acido-basique** : Par le système tampon bicarbonate, il contrôle l'acidose (pH bas) et l'alcalose (pH élevé) respiratoires.
- **Thermorégulation** : Dans le cas d'une hyperthermie, l'excès de chaleur est transporté jusqu'à la surface du corps.
- **Immunité** : Les leucocytes (cellules blanches) sont transportés jusqu'aux sites de blessures ou d'infection.
- **Hémostase** : Les thrombocytes (plaquettes) et les protéines de la coagulation contribuent à réduire les pertes de sang lorsqu'un vaisseau sanguin est endommagé.

1.2. Composition du sang

Le sang est formé de cellules mobiles, les globules ou éléments figurés, baignant dans un milieu intermédiaire liquide et également mobile, le plasma.

1.2.1. Le plasma

Le plasma est la composante liquide du sang dans laquelle baignent les éléments figurés. Il est constitué de 90 % d'eau, 10 % d'ions et de différentes molécules qui sont ainsi transportées à travers l'organisme. Il représente 55 % du sang.

Les principales molécules du plasma sont : le glucose, les lipides, les protéines (albumine, immunoglobulines et facteurs de coagulations). Certains de ces éléments sont des hormones comme les prostaglandines et les thromboxanes.

1.2.2. Les éléments figurés

Les éléments figurés regroupent les globules rouges, les globules blancs et les plaquettes sanguines. Ils représentent 45 % du sang. Leur morphologie peut être étudiée sur un frottis coloré au May Grünwald Giemsa (MGG).

1.2.2.1. Les globules rouges ou hématies

- Femmes : 4 à 5 millions globules rouges dans 1mm³ de sang.
- Hommes : 5 à 6 millions globules rouges dans 1mm³ de sang.

Les globules rouges (ou hématies ou encore érythrocytes) sont des cellules anucléées dont le constituant essentiel est une hémoprotéine de liaison de l'oxygène : l'hémoglobine (environ 14,5 g/100 ml). Le rôle principal de ces cellules est d'assurer le transport de l'O₂ et du CO₂ entre les alvéoles pulmonaires et les tissus.

1.2.2.2. Les globules blancs ou leucocytes

Il y a environ 5 000 à 7 000 globules blancs (ou leucocytes) dans 1mm³ de sang sain. Les leucocytes dépassent les érythrocytes en taille et sont nucléés. De plus, ils ne sont pas confinés dans le sang comme les érythrocytes mais peuvent sortir des capillaires pour gagner le liquide interstitiel tissulaire.

Il existe différents types leucocytaires, chacun d'eux jouant un rôle spécifique dans la défense de l'organisme :

- **Les leucocytes granuleux** ou polynucléaires ou granulocytes (40 à 80 % des leucocytes) comprennent les *neutrophiles*, les *éosinophiles* et les *basophiles*.

- **Les leucocytes non granuleux** comprennent les *monocytes* (2 à 10% des leucocytes) et les *lymphocytes* (20 à 40 % des leucocytes).

1.2.2.3. Les plaquettes

Des fragments de cellules provenant des *mégacaryocytes* de la moelle osseuse (200 000 à 400 000 / mm³). Elles contiennent de l'actine et de la myosine. Elles sont nécessaires au processus de coagulation.

1.3. L'érythropoïèse

C'est la formation des globules rouges, s'effectue au niveau de la moelle osseuse, il existe dans la moelle osseuse un ensemble de cellules souches non différenciées et dont les potentialités évolutives sont multiples.

Ces cellules souches vont après division donner naissance à des cellules capables de se différencier et qui, sous l'influence de stimuli spécifiques, vont donner naissance aux différentes lignées :

La **lignée érythroblastique** donne naissance aux **hématies**, grâce à une hormone sécrétée par le rein, l'**érythropoïétine**.

La **lignée granuleuse** donne naissance aux différentes variétés de **polynucléaires** grâce à l'action d'un facteur spécial appelé **CSF** (colony stimulating factor).

La **lignée plaquettaire** donne naissance aux plaquettes grâce à une hormone, la **thrombopoïétine** et une cellule appelée **mégacaryocyte**.

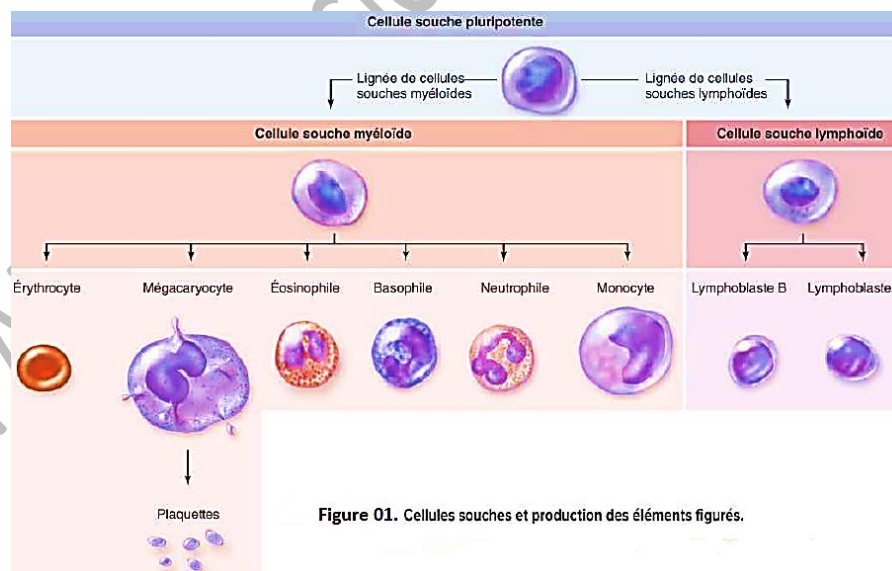


Figure 01. Cellules souches et production des éléments figurés.

2. La circulation sanguine

La caractéristique essentielle de l'appareil circulatoire est d'être divisé en 2 grands systèmes indépendants mais complémentaires :

- La grande circulation ou circulation systémique ;
- et la petite circulation ou circulation pulmonaire.

Le centre de c'est deux circulation est le cœur, qui consiste en une véritable pompe à fonctionnement alternatif (systole et diastole) qui fait circuler le sang dans le réseau de distribution formé des vaisseaux sanguins (les artères, les artérioles, les capillaires, les veinules et les veines).

2.1. La grande circulation ou circulation systémique

Du ventricule gauche, le sang oxygéné est éjecté dans l'aorte d'où vont naître toutes les artères destinées à vasculariser tous les organes, toutes les cellules dans les tissus, au niveau capillaire sanguins, le sang libère son O_2 et se charge en CO_2 . Par l'intermédiaire du réseau veineux, le sang revient par la veine cave inférieure à l'oreillette droite et passe dans le ventricule droit.

2.2. La petite circulation ou circulation pulmonaire

La petite circulation, ou circulation pulmonaire, est entièrement consacrée à l'oxygénation du sang et à l'élimination du CO_2 . Du ventricule droit, le sang est éjecté vers les poumons par l'intermédiaire de l'artère pulmonaire. Dans les poumons, au niveau des capillaires pulmonaires, le sang se décharge de son CO_2 et se charge de nouveau en O_2 . Le sang revient alors au cœur par les veines pulmonaires, aboutit à l'oreillette gauche.

2.3. La circulation sanguine dans le cœur

L'oreillette droite reçoit du sang désoxygéné (sang qui a cédé une partie de son oxygène aux cellules) de diverses parties de l'organisme par trois veines.

- a) la veine cave supérieure apporte le sang provenant des parties du corps situées au-dessus du cœur.
- b) la veine cave inférieure transporte le sang provenant des parties du corps situées au-dessous du diaphragme.
- c) le sinus coronaire draine le sang de la plupart des vaisseaux qui alimentent les parois du cœur.

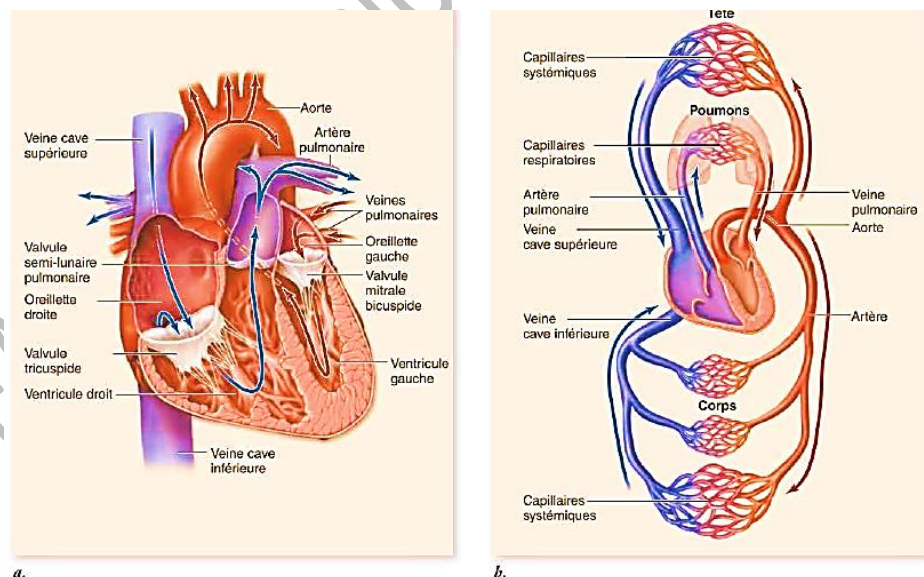


Figure 2. Le cœur et la circulation chez les mammifères et les oiseaux. *a.* Passage du sang à travers le cœur à quatre chambres. *b.* La partie droite du cœur reçoit le sang désoxygéné et le pompe vers les poumons; la partie gauche du cœur reçoit le sang oxygéné et le pompe vers le corps. De cette manière, les circulations pulmonaire et systémique sont maintenues complètement séparées.

3. Structure des parois vasculaires

3.1. Les parois des capillaires sanguins

Elles sont formées que de cellules endothéliales (constituent un endothélium ou tunique interne \Rightarrow une seule couche de cellules).

3.2. Les parois des artères et des veines

Elles sont composées de 3 couches :

3.2.1. INTIMA (Tunique interne)

C'est un épithélium simple (tapisse la lumière des vaisseaux) appelé endothélium.

Les vaisseaux de diamètre supérieur à 1 mm présentent une couche sous-endothéliale constituée de tissu conjonctif lâche.

3.2.2. MEDIA (Tunique moyenne)

Elle est constituée de :

Cellules musculaires lisses, de feuillets d'élastine.

Le muscle lisse vasculaire est sous le contrôle des neurofibres vasomotrices du SNA sympathique; selon les besoins de l'organisme, elles provoquent :

- Soit, la vasoconstriction (\downarrow du calibre due à la contraction du muscle lisse),
- Soit, la vasodilatation (\uparrow du calibre due au relâchement du muscle lisse).

La tunique moyenne régit ainsi le débit et la pression du sang (rôle important dans la régulation de la circulation).

3.2.3. ADVENTICE (Tunique externe)

Elle est composée de :

- ▶ Fibres de collagène dont les rôles sont de protéger les vaisseaux, d'attacher ceux-ci aux structures environnantes ;
- ▶ de neurofibres ;
- ▶ de vaisseaux lymphatiques ;
- ▶ de minuscules vaisseaux sanguins (vasa vasorum) qui nourrissent les tissus externes de la paroi des gros vaisseaux.

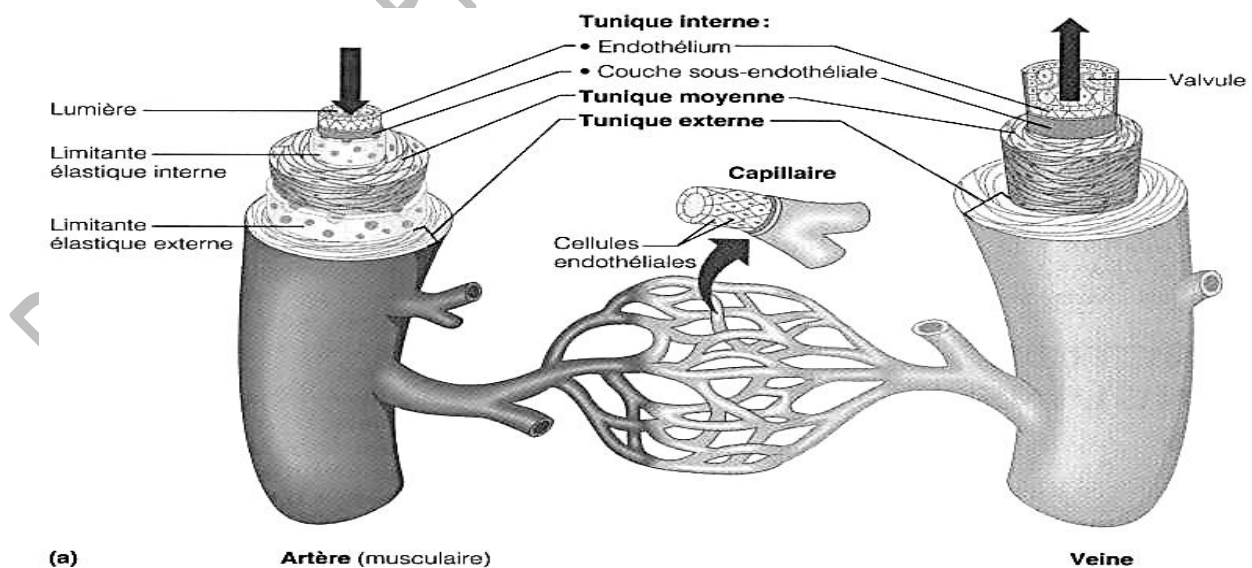


Figure 3. Structure des vaisseaux sanguins.

Chapitre 5. Excrétion rénale.

1. Appareil urinaire

Les reins sont deux organes appartenant au système urinaire, présentant une forme d'haricot, et localisés dans l'abdomen à hauteur des deux dernières vertèbres thoraciques et des deux premières lombaires de part et d'autre de la colonne vertébrale.

Sur la coupe sagittale d'un rein, on distingue deux zones différentes : une zone externe dont le **cortex** est pâle et une zone interne, la **médullaire** (medulla).

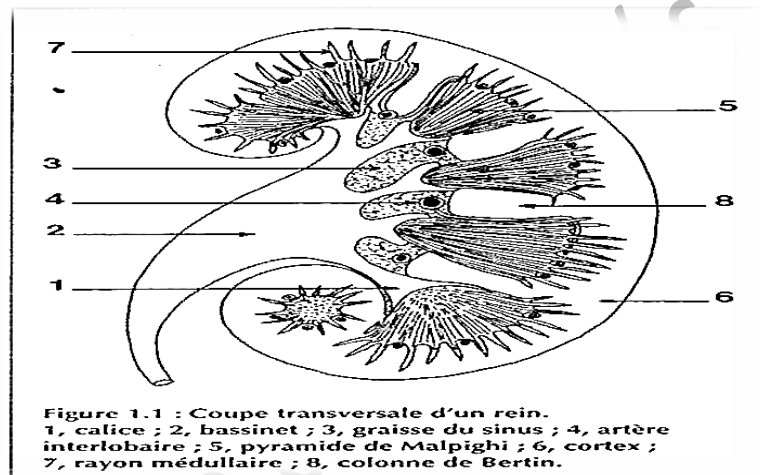
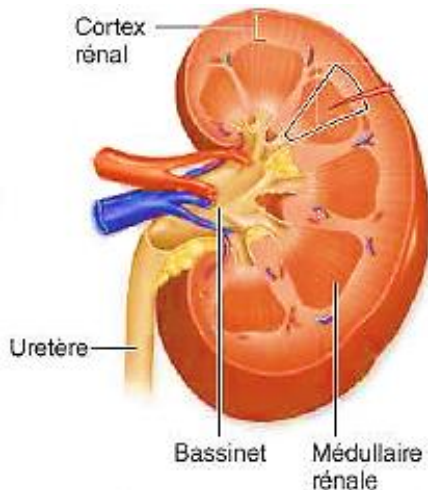


Figure1 : Une coupe transversale d'un rein

1.1. Structure du rein

1.1.1. Disposition générale

La **médullaire profonde centrale** : formée par 8 cônes (4 à 18) appelés **les pyramides de Malpighi**.

Le **cortex périphérique** : coiffe la base des pyramides de Malpighi et s'insinue entre les pyramides constituant les **colonnes de Bertin**.

Le **néphron** est l'unité fonctionnelle du rein. Chaque rein comporte environ 1 300 000 néphrons.

1.1.2. Structure du néphron

Le **glomérule**.

Le **tube proximal**, comprend 2 parties : Un tubule contourné, Un tubule droit.

Le **tube intermédiaire**, très fin, comporte une branche fine descendante et ascendante de l'**anse de Henlé**.

Le **tube distal**, avec 2 parties:

Un tube droit, large constituant la branche ascendante large de l'**anse de Henlé**.

Un tube contourné qui se jette dans un canal collecteur.

La **macule densa**, élément de l'appareil juxta glomérulaire, au contact du tube contourné distal et de l'artériole afférente.

1.1.3. Localisation des différents segments du néphron dans le parenchyme

Le **cortex** contient des glomérules, le tube contourné proximal, le tube contourné distal.

Le tube droit proximal, le tube intermédiaire et le tube droit distal formant l'anse de Henlé, sont dans la médulla ainsi que les tubes collecteurs de Bellini.

1.1.4. Le glomérule

Le glomérule à la forme d'une sphère limitée par une enveloppe, la **capsule de Bowman**.

Le glomérule présente 2 pôles

Un pôle urinaire où s'insère le tube contourné proximal.

Un pôle vasculaire où pénètre l'**artériole afférente** et d'où sort l'**artériole efférente** au contact de l'appareil juxta glomérulaire.

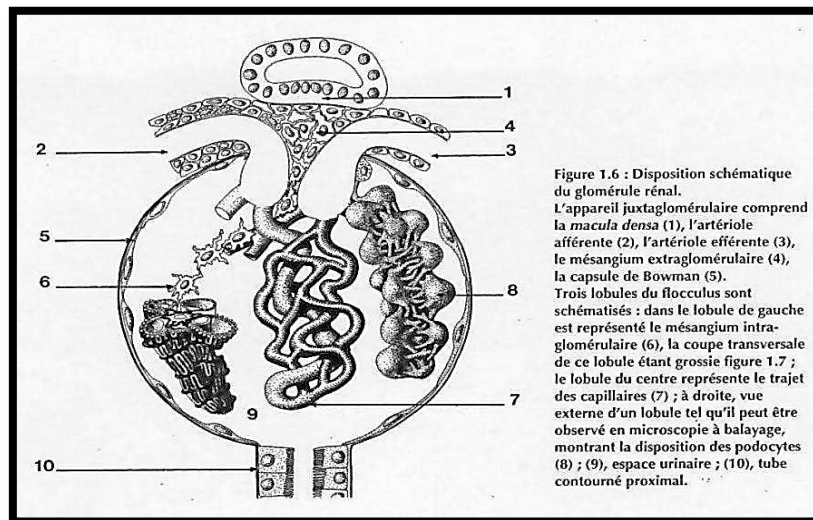


Figure 2 : Disposition schématique du glomérule rénal.

Le glomérule est essentiellement constitué par un réseau capillaire, le **floculus**, réalisant un système porte artériel entre l'artériole afférente et l'artériole efférente.

Ce réseau capillaire possède deux propriétés fondamentales :

- .Une conductivité hydraulique très élevée autorisant un débit de filtration élevé ($120 \text{ ml/min}/1.73 \text{ m}^2$).
- .Une imperméabilité aux macromolécules supérieure à 68 K.dalton .

2. Physiologie rénale

Le rein a pour fonction essentielle la formation de l'urine constituée principalement d'éléments d'origine plasmatique et accessoirement d'éléments produits par l'activité métabolique des cellules rénales (fonction de maintien de l'homéostasie et formation de l'urine).

2.1. Mécanisme général de la formation de l'urine

La formation de l'urine passe par deux étapes successives :

A- La filtration glomérulaire

Réalise un transfert par ultrafiltration d'une grande quantité de liquide plasmatique **dépourvue de protéine de haut poids moléculaire** depuis le compartiment capillaire des glomérules vers leur espace urinaire. L'**ultrafiltrat** obtenu constitue l'**urine primitive**.

La possibilité pour une molécule de traverser le filtre rénale est déterminée par sa **taille (PM)**, et par sa **charge électrique** (+ plus vite que -).

Pour les molécules dont la structure permet une filtration, la quantité filtrée dépend du jeu des **pressions** de part et d'autre de la membrane filtrante.

B- Des ajustements tubulaires

Par des **transferts bidirectionnels** qui s'effectuent tout le long du tube urinifère sur l'urine primitive et déterminent la composition de l'urine finalement excrétée.

Ces transferts passifs ou actifs s'effectuent dans 2 sens :

De la lumière tubulaire vers le tissu interstitiel et les capillaires péri tubulaires; ces transferts sont appelés **réabsorption**.

.Des capillaires péri tubulaires **vers la lumière tubulaire**. Ces transferts sont appelés **sécrétion**.

2.2. Les systèmes capillaires intra rénaux

Les trois systèmes capillaires intra rénaux ont une utilité fonctionnelle remarquable.

A- Les capillaires glomérulaires : où règne une **pression hydrostatique élevée** contribuent à l'ultrafiltration pour aboutir à la formation de l'urine primitive.

B- Les capillaires péri tubulaires : où règne une **pression oncotique très élevée** contribuent à la réabsorption.

C- Les capillaires des vasa récta : où règne une **pression osmotique qui peut être la plus élevée de l'organisme** joue un rôle essentiel dans les mécanismes de concentration, dilution de l'urine.

Remarque

Les capillaires des vasa récta sont des capillaires issus des artérioles efférentes, ils plongent dans la médullaire ou ils se regroupent en faisceaux autour des branches des anses de henlé.

L'urine primitive a une composition ionique identique à celle du plasma quasiment dépourvu de protéine et sans macromolécule.

Le débit sanguin rénal n'est pas déterminé par les besoins métaboliques du rein car le rein ne consomme que 10 à 15 % de l'O₂ qui lui est présenté.

Le rôle majeur de la circulation rénale est de protéger et donc de **maintenir la filtration glomérulaire contre des variations hémodynamiques systémiques**.

2.3. Régulation du débit sanguin rénal et de la filtration glomérulaire

On distingue deux niveaux de régulation du débit sanguin rénal et de la filtration glomérulaire :

Une régulation intrinsèque avec une **autorégulation** et une **régulation hormonale**.

Une régulation extrinsèque de nature **nerveuse sympathique** et **hormonale extra rénale**.

A la fin on obtient l'urine : Liquide jaunâtre, pH allant de 4,7 jusqu'à 6, Volume urinaire/j= diurèse= 1,5L/j.

Contient 30 à 70 g de substances dissoutes /L, Dépourvue de glucose et de protéines dans les conditions normales.

Chapitre 6. Digestion.

1. Introduction

Contrairement aux plantes qui sont autotrophes, les animaux sont hétérotrophes. Ils doivent consommer des molécules organiques (aliments) présentes dans d'autres organismes. Les aliments doivent être digérées en plus petites molécules afin d'être absorbées par le corps animal. L'animal peut utiliser ces produits (de la digestion) comme source d'énergie ou pour la synthèse de molécules plus grandes qui entrent dans la constitution des tissus. Les hétérotrophes sont soit herbivores, soit carnivores ou omnivores. Les systèmes digestifs de ceux-ci sont adaptés à leur régime alimentaire.

2. Les systèmes digestifs des vertébrés

Chez les vertébrés, le système digestif consiste en un tractus gastro-intestinal tubulaire et en organes digestifs accessoires.

Le tractus gastro-intestinal commence par la bouche et le pharynx. Vient ensuite l'œsophage qui transfère la nourriture dans l'estomac, où la digestion commence. De l'estomac, la nourriture passe dans l'intestin grêle, où une batterie d'enzymes digestives poursuit le processus digestif. Les produits de la digestion ainsi que l'eau et des minéraux sont absorbés par la paroi de l'intestin grêle et passent dans le gros intestin, où une partie d'eau et des minéraux restants sont absorbés.

Chez la plupart des vertébrés autres que les mammifères, les déchets émergent du gros intestin dans une cavité appelée cloaque, qui reçoit aussi les produits des systèmes urinaires et reproducteur. Chez les mammifères, les produits urogénitaux sont séparés du matériel fécal présent dans le gros intestin. Les fèces passent dans le rectum et sont expulsées par l'anus.

Les organes digestifs accessoires comprennent le foie, qui produit la bile, un liquide verdâtre qui émulsifie les graisses, la vésicule biliaire, qui met en réserve et concentre la bile, et le pancréas. Celui-ci produit le suc pancréatique contenant des enzymes digestives et du tampon bicarbonate.

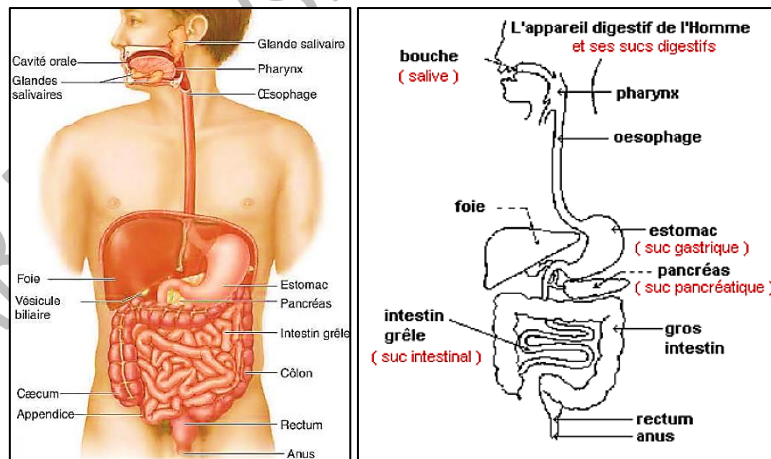


Figure 01. L'appareil digestif humain.

3. Histologie de l'appareil digestif

La paroi du tractus gastro-intestinal comporte plusieurs couches caractéristiques :

- **La muqueuse** : un épithélium qui borde la lumière du tube. Elle a pour rôles : *i)* la sécrétion de mucus et d'enzymes digestives ; *ii)* l'absorption des nutriments et *iii)* la protection contre les microorganismes.
- **La sous muqueuse** : est le tissu conjonctif sous-jacent pourvu de vaisseaux sanguins et lymphatiques.
- **La musculieuse** : adosse la sous-muqueuse et comporte 2 couches de muscles lisses ; dans l'interne, circulaire et, dans l'externe, longitudinale. Elle est responsable des mouvements. Elle s'épaissit à certains

endroits pour former des sphincters. A cela peut s'ajouter le muscle lisse oblique (estomac) ou le muscle strié (œsophage, sphincter anal externe).

- **La séreuse** : couvre la surface externe du tube.

- **des réseaux nerveux**, entrelacés en **plexus** entre les couches musculaires, sont localisés dans la sous-muqueuse et contribuent à la régulation des activités gastro-intestinales.

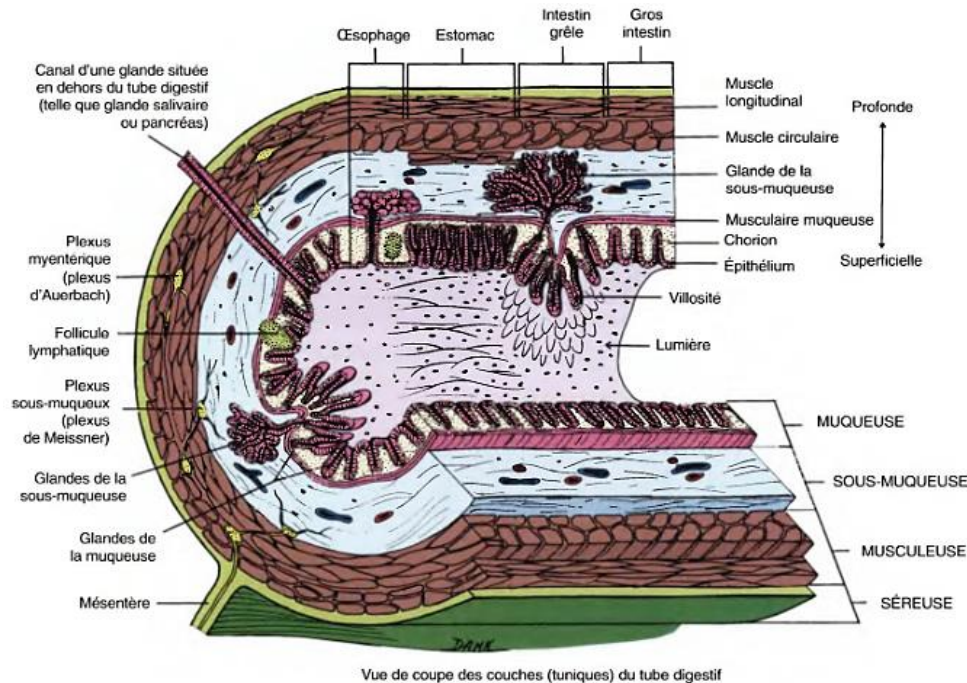


Figure 02. Histologie de l'appareil digestif humain.

4. La digestion chez l'homme

4.1. Transit alimentaire dans l'appareil digestif

La bouche

Dans la bouche les aliments sont mastiqués, réduits en petits morceaux par les dents et, imprégnés de salive et humidifiés. Ce mélange de bouchées s'appelle le bol alimentaire. Il est poussé par les mouvements de la langue vers le fond de la bouche pour être avalé.

L'œsophage

C'est un tube creux qui relie la bouche à l'estomac. Dans la partie supérieure, le pharynx oriente et contrôle le passage des aliments. Ceux-ci descendent pendant une quinzaine de secondes dans l'œsophage par péristaltisme. A la base, un clapet s'ouvre sur l'estomac.

L'estomac

L'estomac est une poche entourée de muscles épais et puissants. Dans ce réservoir, le bol alimentaire est brassé pendant 3 ou 4h. Le malaxage réduit les aliments en bouillie. En même temps, les cellules de la paroi interne de l'estomac, sécrètent les sucs gastriques (HCL et enzymes). Ces sécrétions pouvant atteindre 2 L/24h provoquent une dégradation chimique du bol alimentaire dans un milieu très acide.

L'intestin grêle

Cet intestin est un tube replié dans l'abdomen qui mesure 7 mètres de long chez un adulte. On distingue 3 segments dans ce tube: le duodénum (≈ 50 cm), le jéjunum (≈ 5 m) et l'iléon (≈ 1 m). C'est dans l'intestin grêle que se déroule la partie la plus importante de la digestion. A la sortie de l'estomac, les cellules de l'intestin sécrètent le suc intestinal et le duodénum reçoit les sucs digestifs provenant du pancréas et de

la vésicule biliaire. Les réactions chimiques de ces enzymes avec le chyme produisent les nutriments. Ces éléments passent dans le sang : c'est le phénomène d'absorption. La fine paroi intestinale interne est entièrement recouverte de microvillosités richement vascularisées. Elle offre ainsi une grande surface d'absorption.

Le gros intestin

Le gros intestin mesure 1,5 mètre de long. Il fait suite à l'intestin grêle. Ce qui n'a pas été absorbé parvient dans le colon qui renferme des milliards de bactéries. Cette flore intestinale permet la fermentation des aliments non digérables. Cette réaction produit des gaz et la réabsorption de l'eau permet la formation des matières fécales qui sont rejetées au niveau de l'anus.

4.2. Transformations chimiques des aliments

Les transformations chimiques des aliments nécessitent trois réactions:

- les protides ou protéines (polypeptides) sont fragmentés en acides aminés.
- les lipides ou graisses (glycérol + acide gras) sont émulsionnés et convertis en acides gras.
- les glucides ou sucres (polysaccharides) sont transformés en sucres simples assimilables comme le glucose (monosaccharides).

Les sucs digestifs et leurs enzymes.

Une enzyme est une protéine capable de déclencher une réaction chimique sans modifier les produits finaux. Ce sont des catalyseurs biologiques fabriqués par les êtres vivants. Le rôle des enzymes digestives est de découper les aliments en substances de plus en plus petites : elles favorisent une hydrolyse c'est-à-dire, une décomposition sous l'action de l'eau. Les enzymes digestives sont donc des hydrolases.

La salive

L'homme produit environ 1,5 litre/jour de salive contenant une enzyme appelée amylase. Elle a une action chimique sur l'amidon (polysaccharide) qu'elle scinde en deux sucres plus simples (Disaccharides : dextrine et maltose).

Hydrolyse enzymatique de l'amidon : $n (C_6 H_{10} O_5) + n H_2O \rightarrow n (C_{12} H_{22} O_{11})$

Les sucs gastriques

Le brassage actif des aliments dans l'estomac conduit à la formation d'une bouillie alimentaire, le chyme, contenant des éléments solides de 1 mm environ. La présence de nourriture dans l'estomac déclenche la sécrétion du suc gastrique et du mucus qui se mélangent au bol alimentaire. Le suc gastrique est un liquide incolore fortement acide (PH = 1) contenant de l'eau, de l'acide chlorhydrique (HCL) et des enzymes : la lipase gastrique agit sur les graisses (agrégation des gouttes), la pepsine découpe les grosses protéines comme l'albumine, la présure fait coaguler les protéines du lait. La pepsine et la présure deviennent actives en milieu acide. Le mucus se dépose sur les parois de l'estomac pour le protéger des acides et des enzymes. Il y a aussi une absorption d'eau, de sels minéraux et les éléments prédigérés passent graduellement dans l'intestin grêle par le pylore à la base de l'estomac.

Les sucs intestinaux.

Dans le duodénum, la partie supérieure de l'intestin grêle, les éléments prédigérés déversés par l'estomac, subissent l'action de 3 sucs digestifs puissants : le suc pancréatique, le suc intestinal et la bile. C'est dans cette partie du tube digestif que se déroule l'étape la plus importante de la digestion chimique et l'hydrolyse complète de la plupart des aliments. Le transit dure environ 5 heures durant lequel il y a absorption des nutriments et réabsorption d'eau.

Le suc intestinal renferme de l'entérokinase qui active des enzymes : des saccharases, des maltases, des lactases et des peptidases.

La première enzyme duodénale, la sécrétine neutralise l'acidité gastrique qui permet l'action digestive du suc pancréatique.

La deuxième enzyme sécrétée est la CCK qui provoque les contractions de la vésicule biliaire, la bile arrive dans le duodénum par le canal cholédoque.

Le suc pancréatique arrive à l'intestin grêle par différents canaux. La sécrétion est stimulée par la consommation de protéines et de graisses. Le pancréas produit environ 2 litres de suc par jour. Ce liquide incolore au PH neutre est le plus important pour la digestion. Il contient plusieurs enzymes : deux protéinases (la trypsine et la chymotrypsine) découpent les protéines, une lipase décompose les graisses, l'amylase achève l'hydrolyse de l'amidon en maltose qui sera ensuite transformé en sucres simples assimilables (glucose et fructose).

La bile est synthétisée par le foie et stockée dans la vésicule biliaire. La présence de graisse dans l'estomac et dans le duodénum provoque la sécrétion de bile dans l'intestin grêle.

Les sels biliaires (glycocholate et taurocholate de sodium) jouent un rôle important dans la digestion et l'absorption des graisses. En se combinant avec les lipides, la bile forme des micelles solubles dans le sang. Sans la bile les lipides ne sont pas digérés.

La flore bactérienne.

Le gros intestin ne produit pas d'enzymes mais renferme une flore bactérienne très importante et variée qui participe à la digestion. Ces bactéries transforment l'urée en ammoniac et participent à la fermentation des glucides non absorbés au niveau de l'intestin grêle. Dans cette partie terminale du tube digestif, il y a une absorption de l'eau qui provoque une concentration des matières fécales.

Après cette déshydratation des selles, il ne reste que les substances non digérées et la cellulose au niveau du colon.

La digestion des glucides.

La digestion des glucides commence dans la bouche et se poursuit dans l'intestin. L'amidon insoluble dans l'eau est découpé par l'amylase salivaire puis par l'amylase pancréatique pour produire des disaccharides (maltose.) Ces sucres sont encore dégradés dans l'intestin pour former du glucose soluble (monosaccharide). Il est absorbé par les cellules intestinales et passe directement dans la circulation sanguine. D'autres sucres comme le lactose et le saccharose, présents dans notre alimentation, sont dégradés au cours de la digestion.

Les fibres alimentaires sont aussi constituées de sucres complexes. Le principal constituant est la cellulose mais l'homme ne possède pas l'enzyme, la cellulase, pour la dégrader. Les fibres fermentent au niveau du gros intestin en produisant des gaz, des acides gras volatils nécessaires au bon état de l'intestin et elles facilitent le transit des selles.

La digestion des protéines.

La dégradation chimique des protéines débute dans l'estomac. Grâce à l'acidité, les tissus conjonctifs autour de la viande sont dissous et la pepsine, une enzyme protéase, débite les grosses molécules protéiques en peptides. En sortant de l'estomac, ces peptides sont hydrolysés dans le duodénum par les enzymes du suc pancréatique : les peptidases découpent les peptides en acides aminés ou peptides plus

petits. La caséine par exemple est une protéine du lait. Elle est hydrolysée par la trypsine, la pepsine et la chymotrypsine en polypeptides qui sont à leur tour hydrolysés en acides aminés par les peptidases.

La digestion des lipides.

Les lipides de l'alimentation humaine sont en grande partie constitués de triglycérides, de phospholipides et de stérols. Les lipides ont la propriété d'être hydrophobes (très peu solubles dans l'eau). Leur absorption au niveau de la barrière intestinale est résolue de manière particulière : ils doivent être émulsionnés (comme les gouttes d'huile dans une vinaigrette) pour être assimilées par l'organisme. Dans le duodénum, la digestion permet de former des micelles (gouttelettes minuscules de 0,5 micron en suspension dans le milieu aqueux du tube digestif). Cette émulsion est amorcée par brassage mécanique et les sels biliaires assurent la formation complète des micelles de triglycérides. Les lipases et les phospholipases produites par le pancréas hydrolysent ensuite les lipides avec un maximum d'efficacité. La réaction catalysée par la lipase se fait par étapes :

Triglycéride + eau \rightarrow diglycérides + acide gras

Diglycéride + eau \rightarrow monoglycérides + 2 acides gras

Monoglycéride + eau \rightarrow monoglycérides + 3 acides gras

Les monoglycérides, sous l'action de la lipase, se décomposent en glycérol et en acide gras. La digestion des lipides aboutit dans l'intestin à un mélange de monoglycérides, de di et de triglycérides non encore complètement hydrolysés, de glycérol, d'acides gras, de phospholipides et de cholestérol. Lorsqu'elles sont suffisamment petites, les micelles sont absorbées par les parois de l'intestin.

L'absorption des nutriments

L'intestin grêle est l'organe principal de l'absorption des nutriments. Ce processus est facilité par la longueur de l'intestin grêle et par les villosités qui développent une surface d'échange très importante estimée à plus de 250 m².

Un réseau très dense de vaisseaux sanguins et lymphatiques est présent dans les microvillosités. Les cellules de la paroi intestinale permettent le passage des produits de la digestion vers le milieu interne de l'organisme.

L'absorption peut se faire de manière spécifique vers le système sanguin ou vers le système lymphatique. Le sang draine tous les nutriments hydrosolubles comme les minéraux, les vitamines, les sucres simples, les acides aminés, le glycérol, les acides gras à chaîne courte. Les vaisseaux lymphatiques transportent les molécules liposolubles.

Le passage des différents éléments se fait soit par transport passif, par diffusion, par transport actif, grâce à des protéines transmembranaires spécialisées ou par endocytose.

Les sels minéraux et les vitamines indispensables ne subissent aucune transformation. Ils sont absorbés intacts et passent dans le sang. Une grande quantité d'eau est nécessaire pour la digestion : 7 L d'eau doivent circuler chaque jour dans le tube digestif. L'homme boit en moyenne 1,5 L/jour et les selles en contiennent peu (0,1 litre) ; une grande partie est réabsorbée et réutilisée dans les processus digestifs.

5. Digestion de la cellulose et Diversité des systèmes digestifs des vertébrés

La plupart des animaux sont dépourvus des enzymes nécessaires à la digestion de la cellulose, mais le tractus digestif de certains animaux contient des bactéries et de protistes qui convertissent la cellulose en substances que l'hôte peut digérer. Bien que la digestion microbienne joue un rôle relativement faible dans la nutrition humaine, elle est essentielle dans la nutrition de nombreux herbivores.

Les ruminants

Les ruminants ont un estomac divisé en 4 parties. Les 3 premières sont : le réticulum ou bonnet, le rumen ou panse et l'omasum ou feuillet. Celles-ci sont suivies d'un véritable estomac, l'abomasum ou caillette.

Le rumen (peut contenir jusqu'à 190L), sert de cuve de fermentation dans laquelle des microorganismes convertissent la cellulose et d'autres molécules en composants plus simples. Après avoir été régurgité, le contenu ruminal est remâché à nouveau, une activité appelée rumination. Ce processus fragmente les fibres alimentaires dures en particules plus petites, augmentant la surface d'attaque des bactéries.

Après, le produit avalé est soumis à une digestion bactérienne dans le rumen ; il passe ensuite dans le feuillet, puis dans la caillette, où il est finalement mélangé au suc gastrique. Ce processus aboutit à une digestion beaucoup plus efficace de la cellulose chez les ruminants.

La fermentation dans l'intestin antérieur

Beaucoup de types d'herbivores (autres que les ruminants), notamment les hippopotames, les singes langur et les kangourous ont acquis un vaste estomac pour améliorer la fermentation microbienne. Dans de nombreux cas, ces espèces ont développé diverses autres structures anatomiques qui servent à ralentir le passage des aliments dans l'estomac, allongeant ainsi le temps de la fermentation.

La fermentation dans le cæcum

Chez certains animaux, comme les rongeurs, les chevaux, les cerfs et les lagomorphes (lapins et lièvres), la digestion microbienne de la cellulose a lieu dans le cæcum, qui est particulièrement grand.

Les rongeurs et les lagomorphes ont développé un autre mode de digestion de la cellulose aussi efficace. Ils revalorisent les pâtes molles de leurs fèces par un second passage à travers le tractus digestif. Cela permet d'absorber les nutriments produits par les microorganismes dans le cæcum. Cette pratique s'appelle coprophagie ou cæcotrophie.

Les animaux dont les régimes ne contiennent pas de cellulose, comme les insectivores et les carnivores, n'ont pas de cæcum, ou s'ils en ont un, il est atrophié.

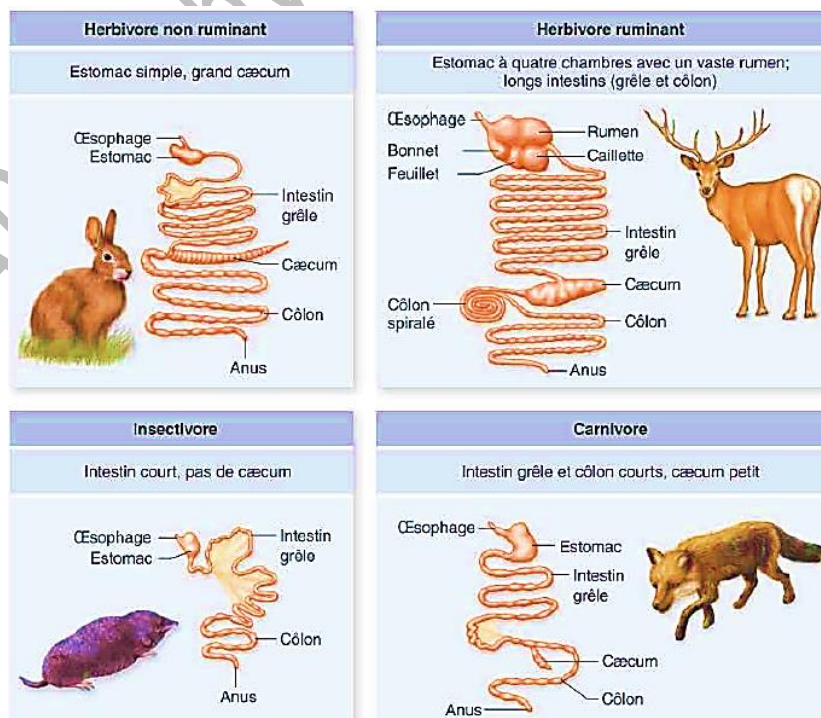


Figure 03. Système digestif de différents mammifères.

1 : Lapin ; 2 : Cerf ; 3 : Taupe ; 4 : Renard.