

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

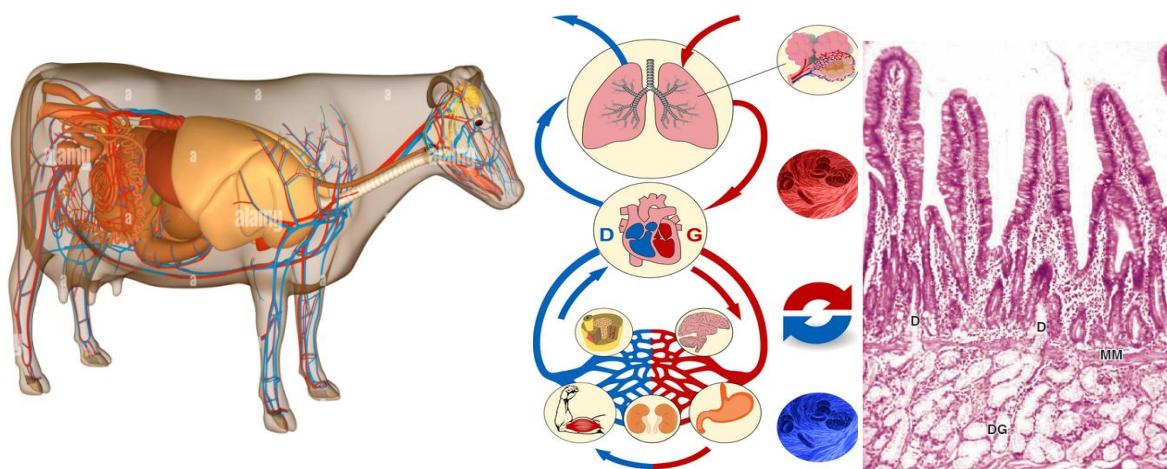


Facultés des Sciences
Département des Sciences Agronomiques
Première Année Master Production et Nutrition Animale

Polycopié pédagogique

Splanchnologie

(Anatomie, Histologie et Physiologie des organes)



Dr HAFFAF Samia
Maitre de conférences A
Année universitaire 2023-2024

PREFACE

Ce polycopié cible comme public les étudiants en première année master production et nutrition animale, conformément au programme du Comité Pédagogique National, dont l'objectif général est d'apporter une vue d'ensemble de conceptions de base et des préoccupations relatives à la splanchnologie animale.

Cette matière permet de dispenser les notions essentielles en anatomie, en histologie, et en physiologie chez les animaux d'élevage avec étude particulière des principaux appareils circulatoire, respiratoire, digestif, et excréteur. Ceci implique que l'apprenant doit avoir des pré-requis en biologie animale et en biochimie structurelle. Dans le but d'assimiler les connaissances en splanchnologie ; ce public cible doit avoir également des compétences de base en physiologie animale.

L'objectif de ce cours est :

-D'apporter des connaissances sur les principaux processus physiologiques et leur position dans l'ensemble des grandes fonctions : rôles et interactions.

- D'exposer les particularités anatomo-physiologiques des différents appareils et expliquer les interactions possibles.

A l'issu de cet enseignement l'étudiant sera capable de

-Expliquer les phénomènes physiologiques et d'en comprendre l'origine, le processus et leurs résultats.

- Saisir la structure de l'appareil respiratoire, connaître le mécanisme respiratoire et les modalités des échanges gazeux entre l'air alvéolaire et le sang pulmonaire ainsi que la respiration cellulaire.

-Détailler l'organisation générale de l'appareil digestif, décrire le processus de base de l'utilisation digestive et métabolique dans la nutrition des animaux à travers la caractérisation des étapes de la digestion dans les différents compartiments gastriques chez les mono et les polygastriques.

-Caractériser les différentes parties de l'appareil circulatoire et comprendre le fonctionnement de la grande et la petite circulation.

- Déterminer la structure du tractus urinaire et décrire le mécanisme général de la formation de l'urine au niveau des unités fonctionnelles rénales.

Fiche technique de la matière « Splanchnologie »

Matière	Splanchnologie
Unité d'enseignement	UE Fondamentale 1
Semestre	S1
Niveau	M1 PNA
Filière	Sciences agronomiques
Crédits	06
Coefficient	03

SOMMAIRE

Chapitre I. Appareil respiratoire.....	1
I.1. Anatomie de l'appareil respiratoire.....	1
I.1.1. Les voies aériennes supérieures.....	1
I.1.1.1. Narines et cavité nasale.....	1
I.1.1.2. Nasopharynx.....	1
I.1.1.3. Larynx.....	1
I.1.2. Les voies aériennes inférieures.....	2
I.1.2.1. La trachée.....	2
I.1.2.2. L'arbre bronchique.....	2
I.1.2.3. Les poumons.....	2
I.1.2.4. Les alvéoles pulmonaires.....	3
I.2. Histologie de l'appareil respiratoire.....	4
I.2.1. Histologie des voies respiratoires supérieures et inférieures	4
I.2.2. Histologie de la barrière alvéolo-capillaire.....	8
I.3. Processus de la physiologie respiratoire.....	10
I.3.1. La ventilation pulmonaire	11
I.3.2. Respiration externe (échanges gazeux au niveau des poumons)	12
I.3.3. Transport des gaz respiratoires.....	14
I.3.4. Respiration interne (échanges gazeux au niveau des cellules.....	16
Chapitre II. L'appareil urinaire.....	18
II.1. Anatomie du tractus urinaire.....	18
II.1.1. Les reins.....	18
II.1.1.1. Conformation externe.....	18
II.1.1.2. Conformation interne.....	18
II.1.2. Le néphron	20
II.1.2.1. Le corpuscule de Malpighi	21
II.1.2.1.2. Le tube contourné proximal	21
II.1.2.1.3. L'anse de Henlé	21
II.1.2.1.4. Le tube contourné distal	21

II.1.2.1. 5. Le tube collecteur de Bellini	21
II.1.2.1. 6. L'appareil juxta glomérulaire.....	22
II.1.3 Les voies urinaires.....	23
II.1.3.1. L'uretère.....	23
II.1.3.2. La vessie	23
II.1.3.3. L'urètre.....	23
II.2. Histologie du tractus urinaire.....	23
II.2.1. Le segment urinaire haut.....	23
II.2.2. Histologie de la vessie.....	25
II.2.3. Histologie de l'urètre.....	26
II.2.4. Histologie du néphron.....	27
II.3. Physiologie rénale.....	30
II.3.1. Filtration glomérulaire.....	31
II.3.2. Les ajustements tubulaires.....	32
II.3.2.1. Réabsorption tubulaire.....	32
II.3.2.2. Sécrétion tubulaire.....	33
II.4. Concentration et dilution de l'urine.....	33
II.4.1. L'hormone antidiurétique (ADH)	33
II.5. Epuration sélective : épuration des déchets azotés.....	34
II.6. Fonction endocrine du rein.....	35
II.6.1. Régulation du débit sanguin rénal et de la filtration glomérulaire.....	35
II.6.1.1. Régulation intrinsèque.....	35
II.6.1.2. Régulation extrinsèque.....	37
Chapitre III. Appareil circulatoire.....	40
III.1. Anatomie de l'appareil cardiovasculaire.....	40
III.1.1. Les pompes cardiaques.....	41
III.1.2. Les valvules cardiaques.....	42
III.2. Système circulatoire sanguin.....	43
III.3. Histologie de l'appareil cardiovasculaire.....	44
III.3.1. Les tuniques cardiaques.....	44
III.3.2. Les vaisseaux sanguins.....	47
III.3.2.1. Les artères.....	47
III.3.2.2. Les veines.....	50

III.4. Physiologie cardiovasculaire.....	52
III.4.1. Automatisme cardiaque.....	52
III.4.2. Le cycle cardiaque.....	52
III.4.3. Les bruits cardiaques.....	54
III.5. L'électrocardiogramme (ECG)	54
III.6. Débit cardiaque.....	55
III.7. Fréquence et Rythme cardiaques.....	55
III.8. Régulation de l'activité cardiaque.....	55
Chapitre IV. Appareil digestif.....	56
IV.1. Anatomie de l'appareil digestif.....	56
IV.1.1. La cavité buccale	57
IV.1.2. L'œsophage.....	59
IV.1.3. L'estomac.....	59
IV.1.4. L'intestin	62
IV.1.4.2. Le caecum	62
IV.1.4.3. Le côlon.....	63
IV.1.4.4. Le rectum.....	63
I.1.5. Glandes annexes au tube digestif.....	63
IV.2. Histologie de l'appareil digestif.....	64
IV.2.1. Structure générale de la paroi digestive.....	64
IV.2.2. La cavité bucco-pharyngienne.....	65
IV.2.2.1. Les dents.....	65
IV.2.1.2. La Langue.....	67
IV.2.1.3. Les glandes salivaires.....	69
IV.2.1.3.1. Histologie de la glande parotide.....	70
IV.2.1.3.2. La glande sous maxillaire ou mandibulaire.....	71
IV.2.1.3.3. La glande sublinguale.....	72
IV.2.3. Le tube digestif.....	73
IV.2.3.1. L'œsophage.....	73
IV.2.3.2. L'estomac.....	74
IV.2.3.2.1. Structure générale gastrique.....	74
IV.2.3.2.2. Variations structurelles en fonction des régions gastriques.....	76
IV.2.3.3. L'intestin grêle.....	78
IV.2.3.4. Le gros intestin.....	80

IV.2.3. Histologie du pancréas et du foie.....	82
IV.2.3.1. Histologie du pancréas.....	82
IV.2.3.2. Histologie du foie.....	85
IV.2.3.2.1. Le parenchyme hépatique.....	86
IV.2.3.2.2. Les conduits excréteurs.....	88
IV.2.3.2.3. La circulation hépatique.....	88
IV.2.3.2.4. Les voies biliaires.....	89
IV.2. Processus de la digestion.....	91
IV.3.1. Digestion dans la cavité buccale.....	91
IV.3.1.1. La préhension des aliments.....	91
IV.3.1.2. La mastication.....	92
IV.3.1.3. La déglutition.....	93
IV.3.2. La digestion gastrique.....	93
IV.3.2.1. La digestion mécanique.....	93
IV.3.2.2. La sécrétion du suc gastrique (digestion chimique)	94
IV.3.3. La digestion intestinale.....	97
IV.3.3.1. Digestion mécanique.....	97
IV.3.3.2. Digestion chimique.....	97
IV.3.3.2.1. Le suc intestinal et les enzymes de la bordure en brosse.....	98
IV.3.3.2.1.2. Le suc pancréatique.....	98
IV.3.3.2.1.2.3. La bile.....	99
IV.3.4. L'absorption au niveau de l'intestin grêle.....	100
IV.3.4.1. Absorption des glucides.....	101
IV.3.4.2. Absorption des protéines.....	101
IV.3.4.3. Absorption des lipides.....	102
IV.3.5. L'absorption dans le gros intestin et la formation des fèces.....	103
IV.6. Particularités digestifs chez les polygastriques « ruminants.....	103
IV.6.1. Les phénomènes mécaniques.....	103
IV.6.1.1. Le broyage.....	103
IV.6.2. La digestion microbienne.....	104
IV.6.2.1. Les phénomènes chimiques	105
IV.6.3. Digestion dans le rumen-réseau.....	105
IV.6.3.1. Digestion des glucides	105

IV.6.3.2. Digestion des matières azotées.....	106
IV.6.3.3. Digestion des lipides.....	106

Liste des figures

Figure 1 : Anatomie des voies respiratoires supérieures chez les bovins (Stenfeldt et Arzt, 2020).....	1
Figure 2 : Le système respiratoire humain (Source : wikipedia.org, 2014).....	3
Figure 3 : Illustration des poumons de rat (Schenk, 2001).....	4
Figure 4 : structure de la muqueuse olfactive (Eroschenko, 2008).....	4
Figure 5: Structure du larynx (Sacchi et al., 2004).....	5
Figure 6 : Histologie du larynx (Ovalle and Nahirney, 2013).....	5
Figure 7: Histologie de la trachée (Eroschenko, 2008).....	7
Figure 8 : Epithélium de type respiratoire « pseudostratifié cilié » (Pucelle et al., 2011).....	7
Figure 9: Bronches pulmonaires (Eroschenko, 2008).....	8
Figure 10: Structure des bronchioles pulmonaires terminales (Eroschenko, 2008).....	8
Figure 11: Structure des alvéoles respiratoires (Source : Anonyme 1).....	9
Figure 12: Les alvéoles pulmonaires (Eroschenko, 2008).....	10
Figure 13: Mécanisme de l'inspiration et de l'expiration (Foucquier, 2011).....	12
Figure 14: Echanges gazeux entre l'air alvéolaire et le sang pulmonaire (Michaud, 2014)...	13
Figure 15: Structure de la molécule d'hémoglobine (Russell, 1996).).....	14
Figure 16: Schéma des échanges de la cellule animale avec le sang (source : Anonyme 2).....	16
Figure 17: Etapes de la respiration (Dupuis, 2015).....	17
Figure 18 : Conformation externe des reins (Reece, 2009).....	19
Figure 19: Structure du rein (Cummings, 2001).	20
Figure 20: Structure du néphron (Aurelie, 2007).....	22
Figure 21: Schéma de l'appareil juxta glomérulaire (Reece et al., 2015).	22
Figure 22: Coupe de l'uretère (Eroschenko, 2008).....	24
Figure 23: Structure de la paroi de l'uretère (Eroschenko, 2008).....	25
Figure 24: Histologie de la vessie (Eroschenko, 2008).	26

Figure 25: Structure de l'épithélium transitionnel de la vessie (Eroschenko, 2008).	26
Figure 26 : Histologie de l'urètre (Mescher, 2016).	27
Figure 27: Histologie du néphron (source : Anonyme 3).....	28
Figure 28: Histologie du népnnron (Eroschenko, 2008).	30
Figure 29: Les pompes cardiaques (Netter, 2012).	41
Figure 30: Le tissu nodal (Tanguy, 2011).	42
Figure 31: L'appareil circulatoire des mammifères (Frayon, 2012).	43
Figure 32 : Les tuniques cardiaques (image Servier Medical Art in Mlih, 2012).	44
Figure 33: Structure histologique de l'endothélium cardiaque (source : Vincke et al. in http://webapps.unamur.be/umdb/histohuma/).....	45
Figure 34: Histologie du myocarde (Eroschenko, 2008).	46
Figure 35: Histologie des tuniques cardiaques (Mescher, 2016).	46
Figure 36: Histologie des vaisseaux sanguins (Mescher, 2016).	47
Figure 37: Coupe transversale (Artère, veine, artériole, veinule et cappillaire) (Eroschenko, 2008).	49
Figure 38: Structure des différents types d'artères (Schatz, 2019).	50
Figure 39: Classification des veines (Schatz, 2019).	51
Figure 40: différences histologiques entre les artères et les veines (Schatz, 2019).	51
Figure 41: Le cycle cardiaque (Gilles, 2006).	52
Figure 42: Les phases du cycle cardiaque (Frayon, 2012).	53
Figure 43: Tracé de l'activité cardiaque (Jacobs, 2016).	54
Figure 44: Anatomie de l'appareil digestif bovin (Hall et Silver, 2014).	56
Figure 45: L'appareil digestif humain (Toutain, 2008)	57
Figure 46: Anatomie de l'appareil digestif des volailles (Toutain, 2008)	57
Figure 47: Localisation des glandes salivaires chez un bovin (Toutain, 2008).	58
Figure 48: Localisation des glandes salivaires chez l'homme (Mescher, 2016).	58
Figure 49: Structure de l'estomac (Martini et al., 2012).	60
Figure 50: Réservoirs gastriques chez les ruminants (Source : Anonyme 4).....	61
Figure 51: Structure générale de la paroi digestive (Mescher, 2016).	65
Figure 52: Structure de la dent (Mescher, 2016).	66
Figure 53: Le tissu dentaire (Eroschenko, 2008).	67
Figure 54: Structure de la langue (Mescher, 2016).	68
Figure 55: Les papilles linguales (Mescher, 2016).	69

Figure 56: Le tissu glandulaire salivaire (Mescher, 2016).	69
Figure 57: Histologie des glandes salivaires (Toutain, 2008).	70
Figure 58 : Histologie de la glande parotide (Eroschenko, 2008).	71
Figure 59 : Histologie de la glande sous maxillaire (Eroschenko, 2008).	72
Figure 60: Histologie de la glande sublinguale (Eroschenko, 2008).	73
Figure 61: Histologie de l'œsophage (Mescher, 2016).	74
Figure 62: Structure de la paroi gastrique (Laborie, 2017)	75
Figure 63: La muqueuse gastrique (fundus et corps de l'estomac) (Eroschenko, 2008).	76
Figure 64: Cellules de la paroi gastrique (Laborie, 2017).	77
Figure 65 : La muqueuse gastrique (région pylorique de l'estomac) (Eroschenko, 2008).	77
Figure 66: Structure de la paroi intestinale (Eroschenko, 2008).	78
Figure 67: Des glandes intestinales avec des cellules de Paneth et des cellules entero-endocrines (Eroschenko, 2008).	79
Figure 68: Glandes de Brunner du duodénum (Mescher, 2016).	79
Figure 69: Structure de la paroi de l'intestin grêle (Marieb, 1993).	80
Figure 70: Structure du gros intestin (Source : Anonyme 5).	81
Figure 71: structure du gros intestin (Mescher, 2016).	82
Figure 72: Le pancréas (anatomie et histologie) (Eroschenko, 2008).	83
Figure 73: Structure de l'acinus pancréatique (Mescher, 2016).	85
Figure 74: Structure des lobules hépatiques (Mescher, 2016).	85
Figure 75: Le lobule hépatique (Eroschenko, 2008).	86
Figure 76: Sinusoïdes hépatiques (Eroschenko, 2008).	86
Figure 77: Les voies biliaires intra-hépatiques (Eroschenko, 2008).	89
Figure 78: Structure de la paroi de la vésicule biliaire (Eroschenko, 2008).	91
Figure 79: Synthèse de l'Hcl par la cellule pariétale (Mescher, 2016).	95
Figure 80: Duodénum : lieu de rencontre des sécrétions digestives (Mescher, 2016).	98
Figure 81: Les villosités intestinales (Mescher, 2016).	100
Figure 82: Digestion et absorption des glucides (Richard, 2014).	101
Figure 83: Digestion et absorption des protéines (Ritchard, 2014).	102
Figure 84: Dégradation des constituants organiques alimentaires dans le rumen-réseau (Gadoud et al., 1992).	107

Chapitre I. L'appareil respiratoire

L'appareil respiratoire est l'ensemble des organes du corps qui transportent l'O₂ de l'extérieur (air ou eau) vers les cellules et éliminent le CO₂ produit de la respiration cellulaire. L'appareil respiratoire assure les échanges gazeux entre le sang et l'air ambiant (hématose). Il sert à la conduction de l'air vers les alvéoles où s'effectuent ces échanges gazeux nécessaires à la ré-oxygénation du sang. Il assure donc par l'intermédiaire de la voie sanguine la respiration cellulaire (Gilles, 2006 ; Mescher, 2016).

I.1. Anatomie de l'appareil respiratoire

L'appareil respiratoire des mammifères est constitué de :

- Deux poumons qui se divisent en plusieurs lobes. Ces lobes sont constitués d'une multitude de petits sacs remplis d'air « alvéoles pulmonaires » (environ 300 000 000 chez l'homme). Elles constituent les sites d'échanges gazeux entre le milieu extérieur et les poumons.
- Les voies aériennes, tous les conduits qui permettent la circulation de l'air entre le milieu extérieur et les alvéoles. Cette circulation est permise par les mouvements ventilatoires qui sont l'inspiration (entrée d'air) et l'expiration (sortie de l'air) (Barone, 1984).

I.1.1. Les voies aériennes supérieures

I.1.1.1. Narines et cavité nasale

Cet appareil part des **narines** qui laissent entrer l'air et se prolonge ensuite dans les **cavités nasales** et les **sinus** qui filtrent et réchauffent l'air, avec des **cornets** nasaux. Il s'agit de deux cavités séparées par une cloison médiane. Chacune de ces cavités communique d'une part avec le pharynx et d'autre part avec l'extérieur grâce aux narines. Les fosses nasales se divisent en quatre régions (Barone, 1984) :

Le vestibule nasal, les fosses nasales proprement dites, les sinus de la face et l'organe olfactif

I.1.1.2. Nasopharynx : forme la partie supérieure du pharynx et est recouvert d'une muqueuse de type respiratoire.

I.1.1.3. Larynx : est une structure tubulaire rigide (cartilagineuse) accolée à l'avant de l'œsophage et faisant la jonction entre le pharynx et la trachée

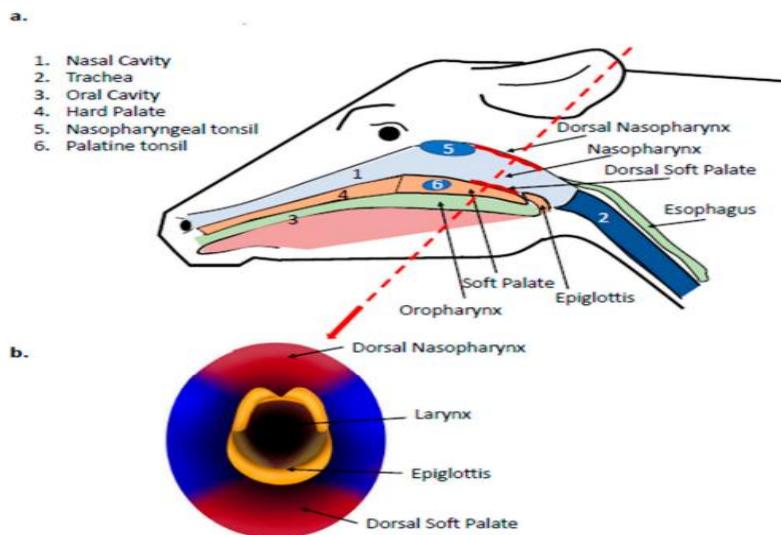


Figure 1 : Anatomie des voies respiratoires supérieures chez les bovins (Stenfeldt et Arzt, 2020).

I.1.2. Les voies aériennes inférieures

I.1.2.1. La trachée : est un conduit tubulaire rigide de 10 à 12 cm de long sur 2 cm de diamètre et dont la paroi comprend trois couches : une muqueuse, une tunique fibro-cartilagineuse et une adventice. Les fonctions essentielles de la muqueuse trachéale sont le réchauffement de l'air inspiré (rôle des vaisseaux sanguins), l'humidification de l'air inspiré (rôle des glandes séreuses) et la filtration de l'air inspiré. La vascularisation de la trachée se fait par les bronches de l'artère et de la veine collectrice de la glande thyroïde (Kolb, 1975).

I.1.2.2. L'arbre bronchique : la trachée se divise pour former les bronches souches droite et gauche qui pénètrent dans les hiles pulmonaires. Les bronches souches se divisent en bronches lobaires puis en bronches segmentaires qui finiront par donner des bronchioles.

I.1.2.3. Les poumons : constituent le lieu des échanges gazeux (l'hématose), et donc de l'enrichissement sanguin en O₂ et de l'expiration du CO₂. Les poumons sont de forme triangulaire lobulés et de coloration rose claire. Le poumon droit est nettement plus volumineux que le gauche. Ils sont divisés en 2 grands lobes antérieur et postérieur par une scissure verticale parallèle au bord ventral : la scissure interlobaire caudale. Les poumons sont divisés en segments broncho-pulmonaires ou territoires de ventilation par des cloisons issues de la plèvre viscérale qui les recouvre. Les segments broncho-pulmonaires sont eux-mêmes divisés en sub-segments puis en lobules pulmonaires.

Chaque poumon est enfermé dans une cavité pleurale limitée par la plèvre. La plèvre est constituée de deux feuillets (Gilles, 2006 ; Rohen et al., 2011):

- * un feuillet viscéral du côté des poumons

- * un feuillet pariétal rattaché aux côtes

Entre les deux feuillets il y a un liquide = le liquide pleural. Son rôle est de maintenir les deux feuillets l'un contre l'autre. La plèvre à un rôle fondamental, elle oblige les poumons à suivre les mouvements de la cage thoracique à laquelle elle est attachée.

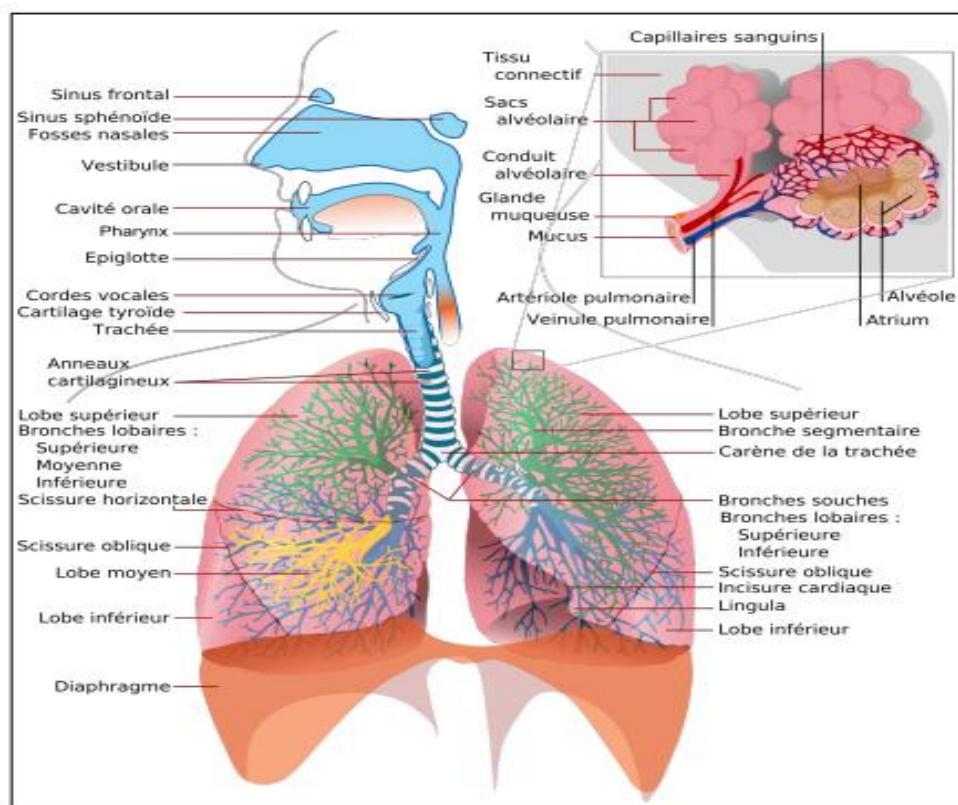


Figure 2 : Le système respiratoire humain (Source : wikipedia.org, 2014).

I.1.2.4. Les alvéoles pulmonaires

Ce sont de minuscules sacs en contact avec les voies respiratoires ($300\ 000\ 000 = 75\ m^2$ de surface d'échange). Elles sont très bien vascularisées car les capillaires forment un réseau autour des alvéoles. Les capillaires sont accolés à la paroi des alvéoles ce qui favorise les échanges de gaz respiratoires (Hilber, 2012).

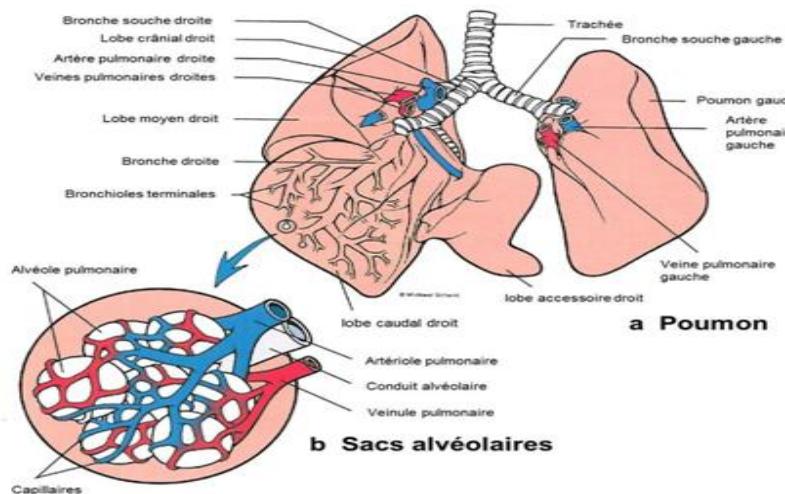


Figure 3 : Illustration des poumons de rat (Schenk, 2001).

I.2. Histologie de l'appareil respiratoire

I.2.1. Histologie des voies respiratoires supérieures et inférieures.

Représentées par le vestibule nasal, les fosses nasales, le naso-pharynx et le larynx.

Le vestibule nasal est recouvert par un épithélium malpighien kératinisé continuant l'épiderme de la surface externe du nez. C'est une région riche en glandes sébacées et contenant des poils (Eroschenko, 2008).

Les fosses nasales, à l'exception de leur face supérieure, sont recouvertes d'une muqueuse de type respiratoire, caractéristique des voies aériennes supérieures et inférieures. La muqueuse respiratoire comprend un épithélium pseudostratifié cilié constitué par deux types de cellules : les cellules prismatiques ciliées et les cellules caliciformes à mucus, cet épithélium repose par l'intermédiaire d'une membrane basale sur un chorion contenant des glandes séromuqueuses, tubulo-acineuses ramifiées, des formations lymphoïdes, et de nombreux vaisseaux et nerfs.

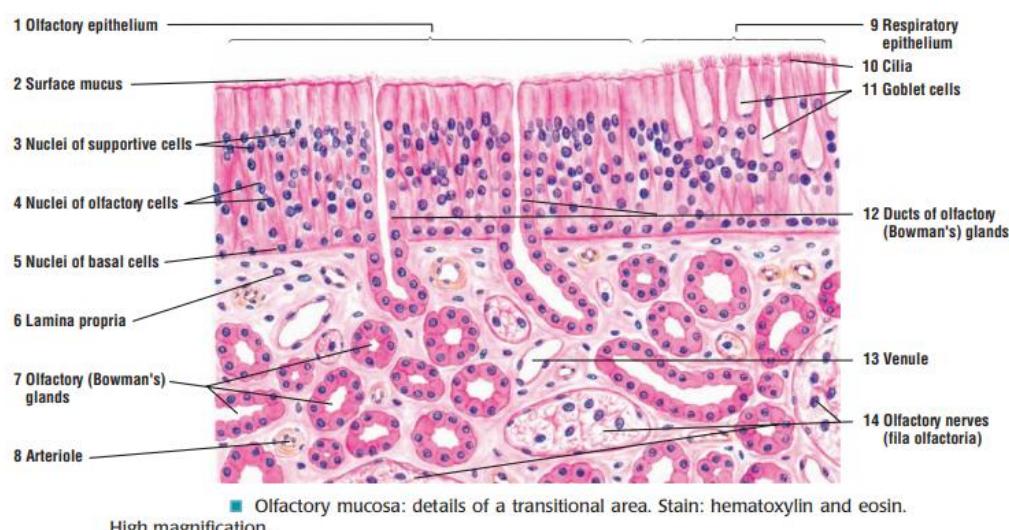
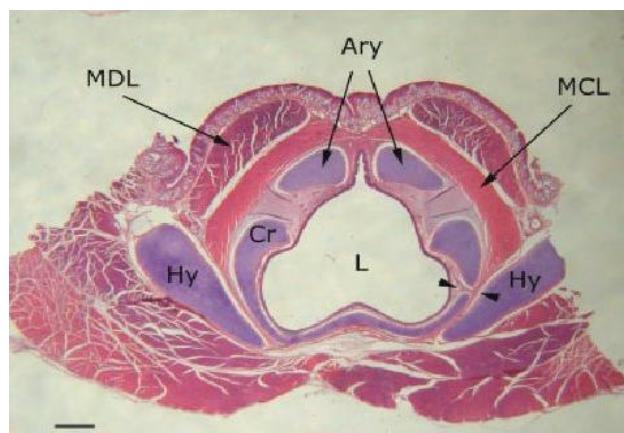


Figure 4 : Structure de la muqueuse olfactive (Eroschenko, 2008).

Le nasopharynx est tapissé aussi par un épithélium pseudo-stratifié de type respiratoire avec quelques plages isolées d'épithélium pavimenteux stratifié non kératinisé sur sa face postérieure, renfermant des formations lymphoïdes constituant les amygdales.

Le larynx est constitué d'un squelette cartilagineux, d'une tunique fibro-élastique et d'une muqueuse laryngée formée d'un épithélium de type respiratoire « pseudostratifié cilié ». Néanmoins, un épithélium pavimenteux stratifié non kératinisé recouvre la face linguale et une petite extension de la face pharyngée de l'épiglotte ainsi que les cordes vocales, le reste est tapissé par un épithélium prismatique stratifié cilié (au-dessus des cordes vocales) avec quelques plages d'épithélium pavimenteux (Stenfeldt et Arzt, 2020).



MDL : muscle dilatateur du larynx ; Ary : cartilages arytenoïdes ; Cr : cartilage cricoïde ; Hy : cartilage hyoïde ; L : lumière laryngée ; MCL : muscle constricteur du larynx.

Figure 5: Structure du larynx (Sacchi et al., 2004).

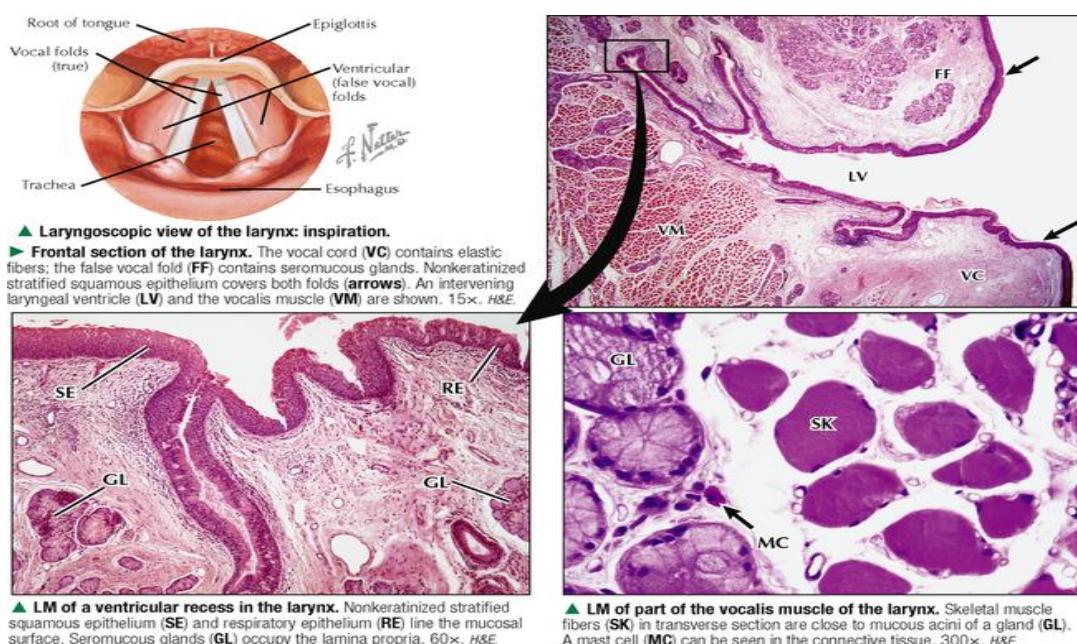


Figure 6 : Histologie du larynx (Ovalle and Nahirney, 2013).

La trachée et les bronches possèdent un plan d'organisation commun, constitué de l'association de 4 couches concentriques :

Muqueuse ; Sous-muqueuse ; Tunique moyenne et Adventice.

L'épithélium respiratoire regroupe les cellules à mucus, les cellules ciliées, les cellules séreuses, les cellules basales et les cellules de Clara. On le retrouve au niveau de la trachée et au niveau de l'arbre bronchique, il a une fonction de ventilation pulmonaire une fonction de défense (via la clairance mucociliaire) et une fonction de conditionnement de l'air inspiré.

-La trachée

*La muqueuse est de type respiratoire, comporte (Eroschenko, 2008);

- un épithélium pseudostratifié avec des cellules ciliées, des cellules caliciformes sécrétant du mucus,

- des cellules basales de remplacement.

- et des cellules endocrines.

*Le chorion; est conjonctivo-élastique, riche en glandes mixtes à prédominance muqueuse et en tissu lymphoïde diffus ou nodulaire; la vascularisation y est abondante.

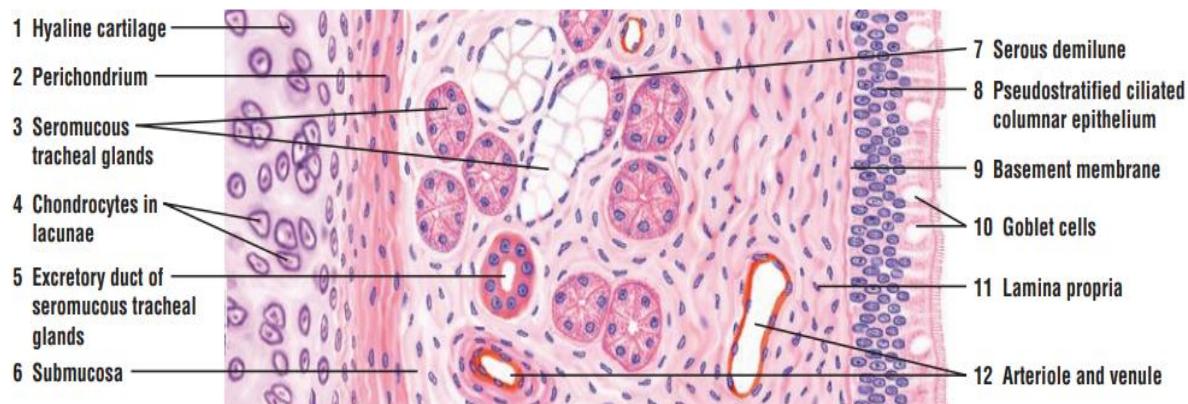
*La tunique fibrocartilagineuse est caractérisée par la présence de 15 à 20 anneaux incomplets en fer à cheval, les arceaux cartilagineux, dont les extrémités postérieures sont reliées par des faisceaux de fibres musculaires lisses formant le muscle trachéal entouré de tissu conjonctif dense riche en fibres élastiques; entre les arceaux cartilagineux, la tunique moyenne est faite de tissu conjonctif fibro-élastique.

*L'adventice:

- Est classique, conjonctivo-adipeuse, riche en vaisseaux et en nerfs

- Les fibres nerveuses traversent toute la paroi;

- Elles proviennent essentiellement du système nerveux végétatif : les fibres parasympathiques (pneumogastrique = nerf vague) stimulent la sécrétion glandulaire et la contraction musculaire, à l'inverse des fibres sympathiques qui provoquent le relâchement musculaire.



■ Tracheal wall (sectional view). Stain: hematoxylin and eosin. Medium magnification.

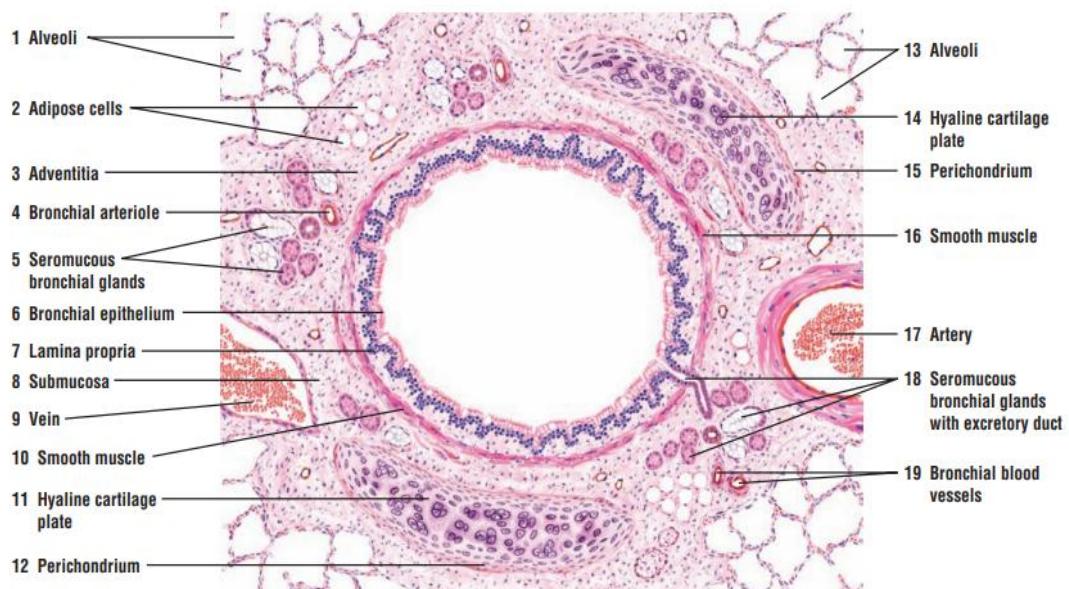
Figure 7: Histologie de la trachée (Eroschenko, 2008).



Figure 8 : Epithélium de type respiratoire « pseudostratifié cilié » (Pucelle et al., 2011).

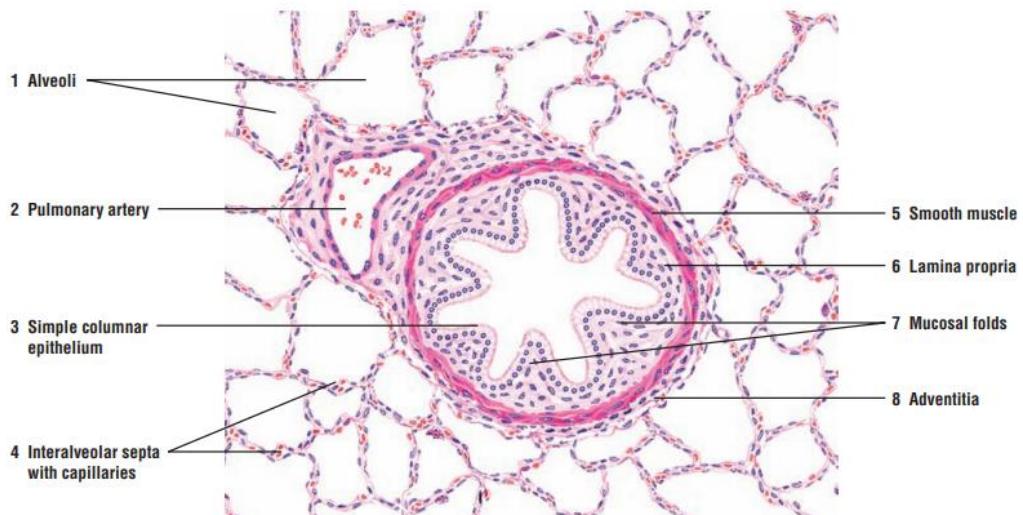
-Les bronches: les bronches souches extra pulmonaires sont identiques à la trachée, composées d'arceaux cartilagineux incomplets reliés par un muscle lisse postérieur, les bronches souches intra pulmonaires en diffèrent par la présence de plaques cartilagineuses irrégulières et d'un muscle spiralé circonférentiel.

Les Bronches souches sont histologiquement similaires à la trachée avec quelques minimes différences: - épithélium respiratoire plus bas - cellules caliciformes moins nombreuses - charpente cartilagineuse: minces plaques reliées entre elles; se répartissent autour des bronches - constitution d'un muscle lisse circulaire (muscle de Reissessen) (Figure 8).



■ Intrapulmonary bronchus (transverse section). Stain: hematoxylin and eosin. Low magnification.

Figure 9: Bronches pulmonaires (Eroschenko, 2008).



■ Terminal bronchiole (transverse section). Stain: hematoxylin and eosin. Low magnification.

Figure 10: Structure des bronchioles pulmonaires terminales (Eroschenko, 2008).

I.2.2. Histologie de la barrière alvéolo-capillaire

Le parenchyme pulmonaire est constitué :

- D'alvéoles dont la paroi dite alvéolaire comporte deux catégories de cellules :

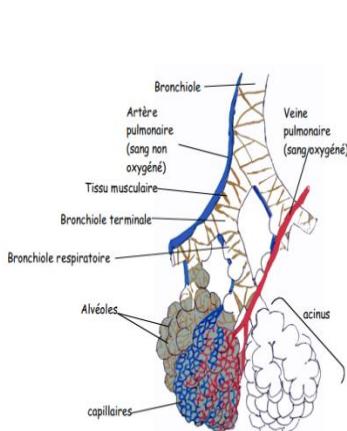
-les pneumocytes I qui représentent 90% de la surface des alvéoles car ce sont des cellules pavimenteuses (allongées et fines). C'est donc un épithélium simple pavimenteux.

-les pneumocytes II ce sont des cellules cubiques qui ont un gros noyau, de nombreuses vésicules, un réticulum endothérial et un appareil de Golgi ce qui traduit une synthèse protéique très active. Elles produisent le surfactant qui va recouvrir la paroi alvéolaire et qui est tensioactive ce qui permet de maintenir la tension superficielle au niveau de la paroi des alvéoles et empêche ces dernières de se coller lors de l'expiration. Les pneumocytes II se différencient en pneumocytes I.

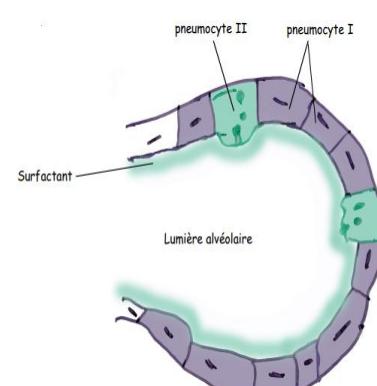
Cet épithélium repose sur une très fine couche de tissu conjonctif. L'intérieur de l'alvéole contient du surfactant et des macrophages qui ont la capacité de phagocytter les éléments pathogènes.

➤ De tissu conjonctif interstitiel riche en fibres élastiques (élasticité du poumon) et en capillaires sanguins.

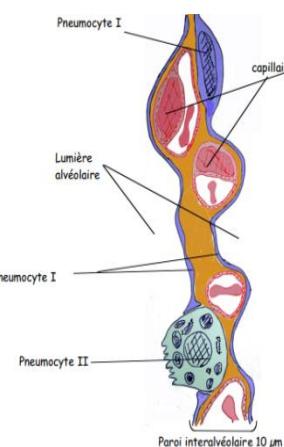
Les échanges gazeux se réalisent au niveau de la zone de contact air-sang (qui représente environ 30% de la surface alvéolaire soit 70 m^2) : la barrière alvéolo-capillaire.



Le parenchyme pulmonaire



L'alvéole pulmonaire



La barrière alvéolo-capillaire

Figure 11: Structure des alvéoles respiratoires (Source : Anonyme 1).

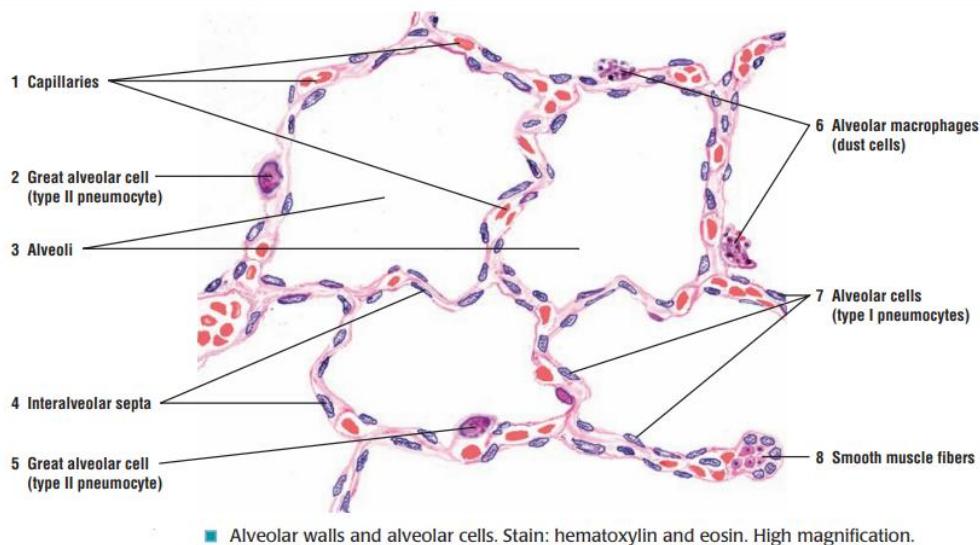


Figure 12: Les alvéoles pulmonaires (Eroschenko, 2008).

I.3. Processus de la physiologie respiratoire

Le sang est le milieu de transport intermédiaire entre le milieu extérieur et les cellules de l'organisme. Il transporte des nutriments, des hormones, des déchets, de la chaleur et les gaz respiratoires : dioxygène (O₂) et dioxyde de carbone (CO₂).

Des échanges gazeux sont indispensables au renouvellement des gaz sanguins.

- l'O₂ atmosphérique est pris en charge par le sang au niveau des alvéoles pulmonaires et transporté vers les cellules (organes).
- le CO₂ est pris en charge par le sang au niveau des cellules (organes) et transporté vers les alvéoles pulmonaires.

On appelle hématose l'enrichissement du sang en O₂ et son appauvrissement en CO₂, au niveau des poumons. Pour cela des échanges gazeux sont indispensables au renouvellement des gaz sanguins.

L'air alvéolaire est renouvelé par la ventilation pulmonaire, phénomène périodique d'entrée et de sortie d'une partie de l'air alvéolaire.

Une partie de l'oxygène de l'air alvéolaire diffuse à travers la membrane alvéolo-capillaire (= diffusion alvéolo-capillaire de l'oxygène) et passe dans les capillaires pulmonaires.

L'oxygène est transporté dans le sang, par la circulation, jusqu'aux capillaires systémiques (= tous les autres capillaires que les capillaires pulmonaires). Il diffuse alors vers toutes les cellules et pénètre dans les mitochondries où il est utilisé dans les réactions chimiques

cellulaires (dégradation des nutriments énergétiques comme le glucose) qui permettent la formation d'ATP.

Le gaz carbonique, libéré par ces réactions chimiques, diffuse dans les capillaires systémiques, il est transporté par la circulation jusqu'aux capillaires pulmonaires d'où il diffuse vers les alvéoles pulmonaires. Il est rejeté dans l'air ambiant par la ventilation.

Le processus respiratoire passe par les étapes suivantes (Kolb, 1975) :

La ventilation pulmonaire : c'est un processus mécanique, dû aux contractions des muscles ventilatoires, il aboutit au renouvellement des gaz respiratoires dans les alvéoles.

La respiration externe : correspond aux échanges gazeux entre le sang et l'air alvéolaire.

Le transport des gaz respiratoires entre les poumons et les organes

La respiration interne : il s'agit des échanges gazeux entre le sang capillaire et les cellules pour assurer leur respiration à travers l'utilisation de l'oxygène et la formation de L' ATP.

I.3.1. La ventilation pulmonaire : C'est l'échange d'air entre l'atmosphère et les alvéoles. C'est un processus mécanique, dû aux contractions de muscles respiratoires.

***L'inspiration**

Sous la commande nerveuse des centres respiratoires, les muscles respiratoires vont se contracter. Le diaphragme (muscle inspiratoire majeur) s'abaisse et refoule l'abdomen ce qui augmente le volume de la cage thoracique (Foucquier, 2011).

La contraction des muscle intercostaux déclenche un mouvement des cotes vers le haut et vers l'extérieur ce qui augmente le volume de la cage thoracique. Comme le volume de la cage thoracique augmente sa paroi s'écarte de la paroi des poumons et la pression du liquide intrapleural chute ce qui augmente la différence de pression transpulmonaire. Les poumons vont donc avoir tendance à suivre l'expansion de la cage thoracique.

Il y a augmentation du volume alvéolaire dans tout l'organe donc la pression alvéolaire va chuter et devenir inférieur à la pression atmosphérique => écoulement de l'air depuis l'atmosphère jusqu'aux alvéoles jusqu'à ce que la pression alvéolaire devienne égale à la pression atmosphérique.

***L'expiration**

A la fin de l'inspiration les muscles intercostaux et le diaphragme se relâchent => la cage thoracique et les poumons reviennent à leur taille initiale.

Lorsque les poumons se contractent le volume de la cavité thoracique diminue, l'air des alvéoles est temporairement comprimé et la pression alvéolaire devient supérieure à celle de l'atmosphère => l'air s'écoule depuis les alvéoles jusqu'à l'atmosphère par les voies aériennes.

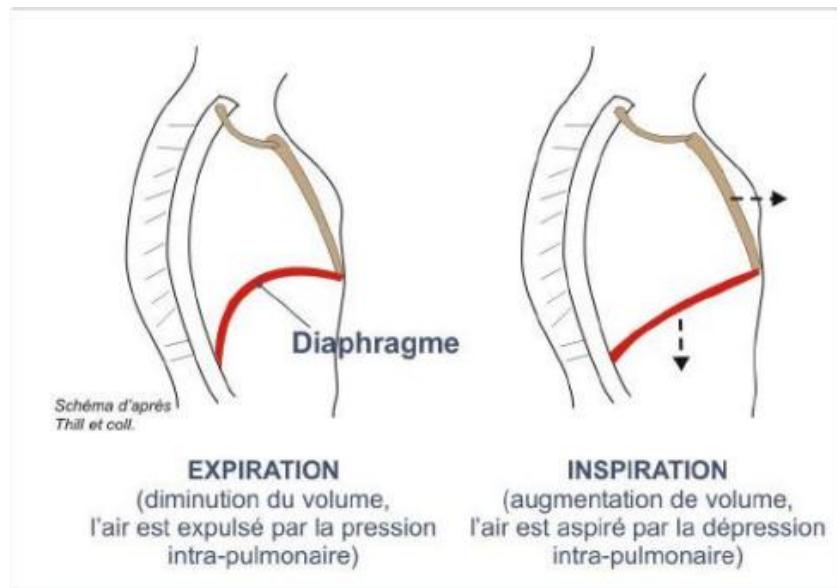


Figure 13: Mécanisme de l'inspiration et de l'expiration (Foucquier, 2011).

I.3.2. Respiration externe (échanges gazeux au niveau des poumons)

Les échanges gazeux sont indispensables au renouvellement des gaz sanguins.

- l'O₂ atmosphérique est pris en charge par le sang au niveau des alvéoles pulmonaires et transporté vers les cellules (organes).
- le CO₂ est pris en charge par le sang au niveau des cellules (organes) et transporté vers les alvéoles pulmonaires.

L'hématose est la transformation du sang veineux en sang artériel au niveau des poumons, c'est-à-dire son appauvrissement en dioxyde de carbone (CO₂) et son enrichissement en dioxygène (O₂).

Pour comprendre ces mouvements gazeux, il faut se rappeler que l'air est un mélange de plusieurs gaz et que sa pression totale, 760 mm Hg (mercure) ou 100 kPa (Pascal) au niveau de la mer, est égale à la somme des pressions dites partielles de tous les gaz qui le composent (PN₂ + PO₂ + PH₂O + PCO₂).

Les seuls gaz échangés lors de la respiration sont le dioxygène et le dioxyde de carbone, le diazote n'intervient pas dans les échanges gazeux (le taux d'azote est le même dans tous les compartiments) (Michaud, 2014).

D'autre part, en présence d'une membrane semi-perméable (ce qui est le cas des membranes cellulaires), un gaz passe automatiquement du milieu de forte pression vers le milieu de pression plus faible. Le mécanisme à l'origine du déplacement d'un gaz est une diffusion. La quantité de gaz qui diffuse est proportionnelle à la différence de pression partielle entre les 2 zones d'échanges et tend à un équilibre des pressions partielles entre ces 2 zones d'échanges.

Le schéma suivant indique les pressions partielles aux endroits importants :

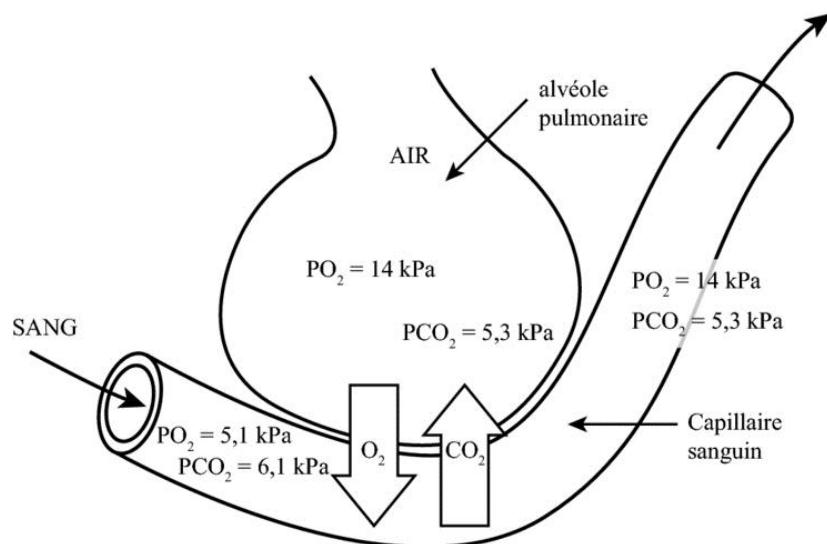


Figure 14: Echanges gazeux entre l'air alvéolaire et le sang pulmonaire (Michaud, 2014).

* dans les alvéoles pulmonaires, la ppO₂ ou pression partielle de dioxygène de l'air est égale à 105 mm Hg, alors qu'elle n'est que de 37 mm Hg dans le sang. Le dioxygène pénètre donc à chaque inspiration dans le sang.

* En même temps : ppCO₂ dans le sang : 44 mm Hg et ppCO₂ dans l'air : 38 mm Hg. Cette différence suffit pour faire sortir le dioxyde de carbone du sang. Il se retrouve ainsi dans l'air des alvéoles puis dans l'atmosphère grâce aux expirations.

* Même principe pour la vapeur d'eau (H₂O) que nous expirons en même temps que le CO₂ : 47 mm Hg dans le sang des capillaires pulmonaires, proche de zéro dans l'air extérieur. Ces échanges au niveau des poumons constituent ce que l'on appelle l'hématose.

I.3.3. Transport des gaz respiratoires

La diffusion d'O₂ et de CO₂ dans des liquides (plasma, lymphé interstitielle) impose une dissolution de ces molécules. Dans 1 litre de sang, il y a environ 3ml d'O₂ dissous, or 1 litre de sang apporte environ 200ml d'O₂ aux cellules pour qu'elles maintiennent leur activité. Donc un processus complémentaire participe au transport des gaz respiratoires : la combinaison à d'autres molécules qui sont des transporteurs comme l'hémoglobine présente dans le cytoplasme des érythrocytes (= hématie).

Les hématies ou globules rouges contiennent de l'hémoglobine (Hb), pigment respiratoire qui a la particularité de fixer le dioxygène, le dioxyde de carbone, mais aussi malheureusement le monoxyde de carbone.

L'hémoglobine est une hétéroprotéine :

- Sa partie protéique est la globine, qui résulte de l'association de 4 chaînes polypeptidiques (2 chaînes
- Sa partie non protéique est l'hème. Il y a 4 hèmes par molécule d'hémoglobine et chaque hème contient un ion Fe²⁺ qui fixe une molécule de dioxygène de manière réversible. (Chaque chaîne polypeptidique est liée à un hème.)

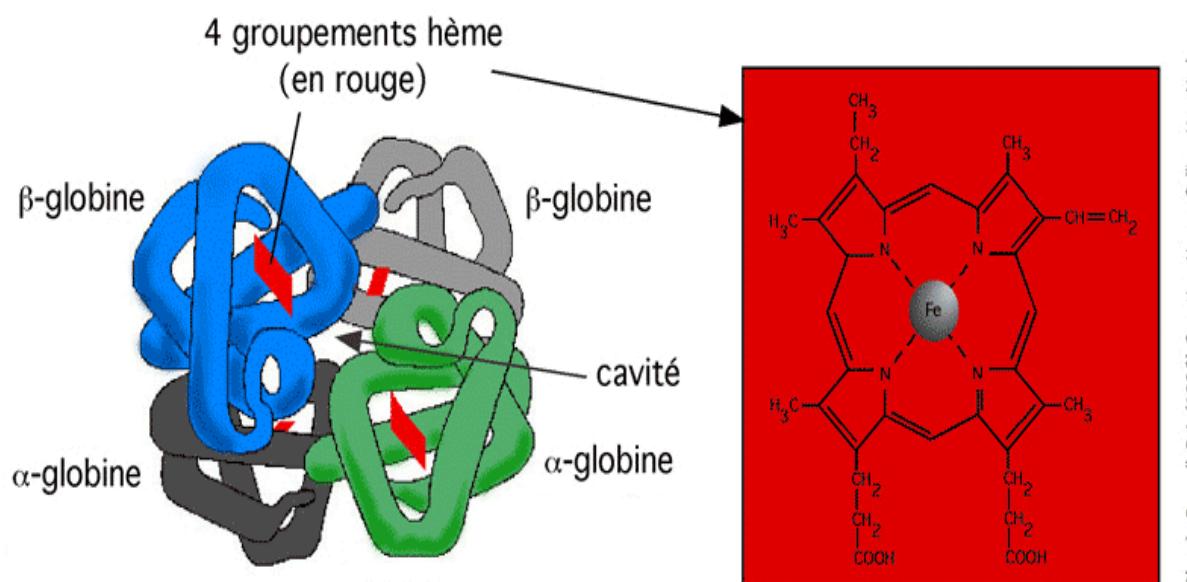


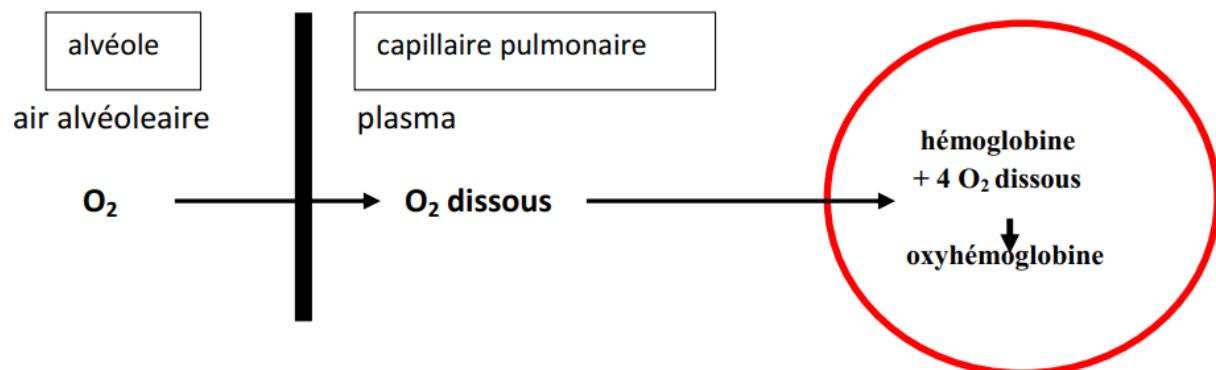
Figure 15: Structure de la molécule d'hémoglobine (Russell, 1996).

L'oxygène est transporté pour une petite part (2%) sous forme dissoute mais l'essentiel (98%) est combiné à l'hémoglobine (Hb),

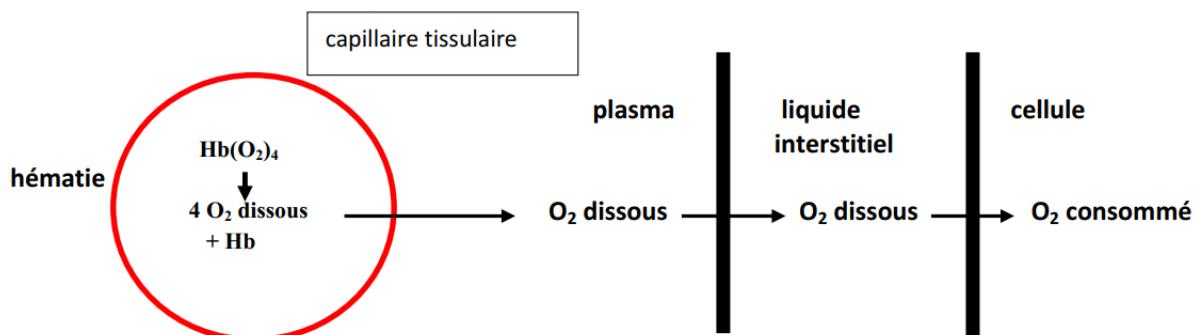
* $\text{Hb} + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{HbO}_2$ c'est l'oxyhémoglobine qui colore le sang artériel en rouge vif. La double flèche signifie que cette réaction est réversible.

L'oxyhémoglobine n'est pas directement utilisable par les cellules, il s'agit seulement d'une forme de stockage d' O_2 . Il existe un équilibre entre la teneur en O_2 dissous du plasma et celle de l'oxyhémoglobine : si la quantité d' O_2 dissous dans le plasma diminue, l' O_2 contenu dans l'oxyhémoglobine se libère (dissociation de l'oxyhémoglobine) et se dissout dans le plasma. Inversement si la pression partielle en O_2 augmente dans le plasma cela entraîne la formation d'oxyhémoglobine. La forme dissoute est prioritaire sur la forme combinée car c'est elle qui diffuse.

- La réaction 1 (= fixation) se fait au niveau des poumons lorsque la pression partielle en O_2 est élevée.



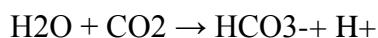
- La réaction 2 (= dissociation) se fait au niveau des tissus lorsque la pression partielle en O_2 est faible.



Le gaz carbonique est transporté pour une part sous une forme dissoute (7%), pour une autre part (faible) sous forme liée à l'hémoglobine (25%) (Sur des sites différents de ceux de l'oxygène, donc sans concurrence), et pour la plus grande part (75%) sous forme d'ions bicarbonates.

* $\text{Hb} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{HbCO}_2$ c'est la carbhémoglobine ou carbohémoglobine rouge sombre (sang veineux).

*Dans les capillaires systémiques :



La formation des bicarbonates se fait très rapidement dans les globules rouges (elle est accélérée par une enzyme, l'anhydrase carbonique).

Les bicarbonates formés passent ensuite dans le plasma.

Les H⁺ se fixent sur l'hémoglobine.

*Dans les capillaires pulmonaires :



I.3.4. Respiration interne (échanges gazeux au niveau des cellules).

La fine paroi des capillaires sépare le sang de la lymphe interstitielle, elle-même séparée du liquide intracellulaire par les membranes plasmiques des cellules.

Au niveau des cellules, il se produit exactement l'inverse : le sang perd son O₂ qui passe dans la lymphe interstitielle puis entre dans la cellule, alors que le CO₂ venant des cellules pénètre dans le sang en passant par le liquide interstiel. Comme pour les poumons, ces mouvements gazeux résultent des différences de pressions partielles.

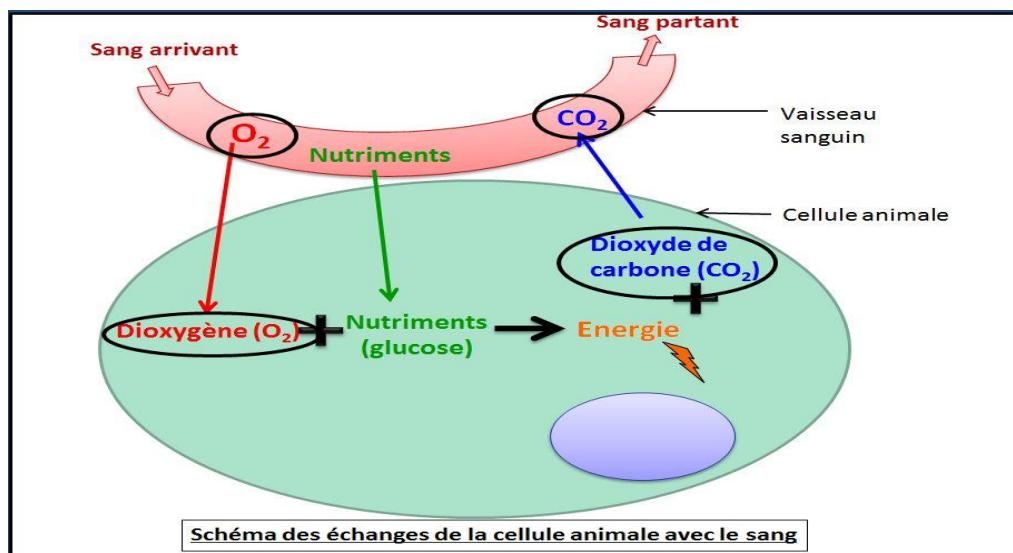


Figure 16: Schéma des échanges de la cellule animale avec le sang (Source : Anonyme 2).

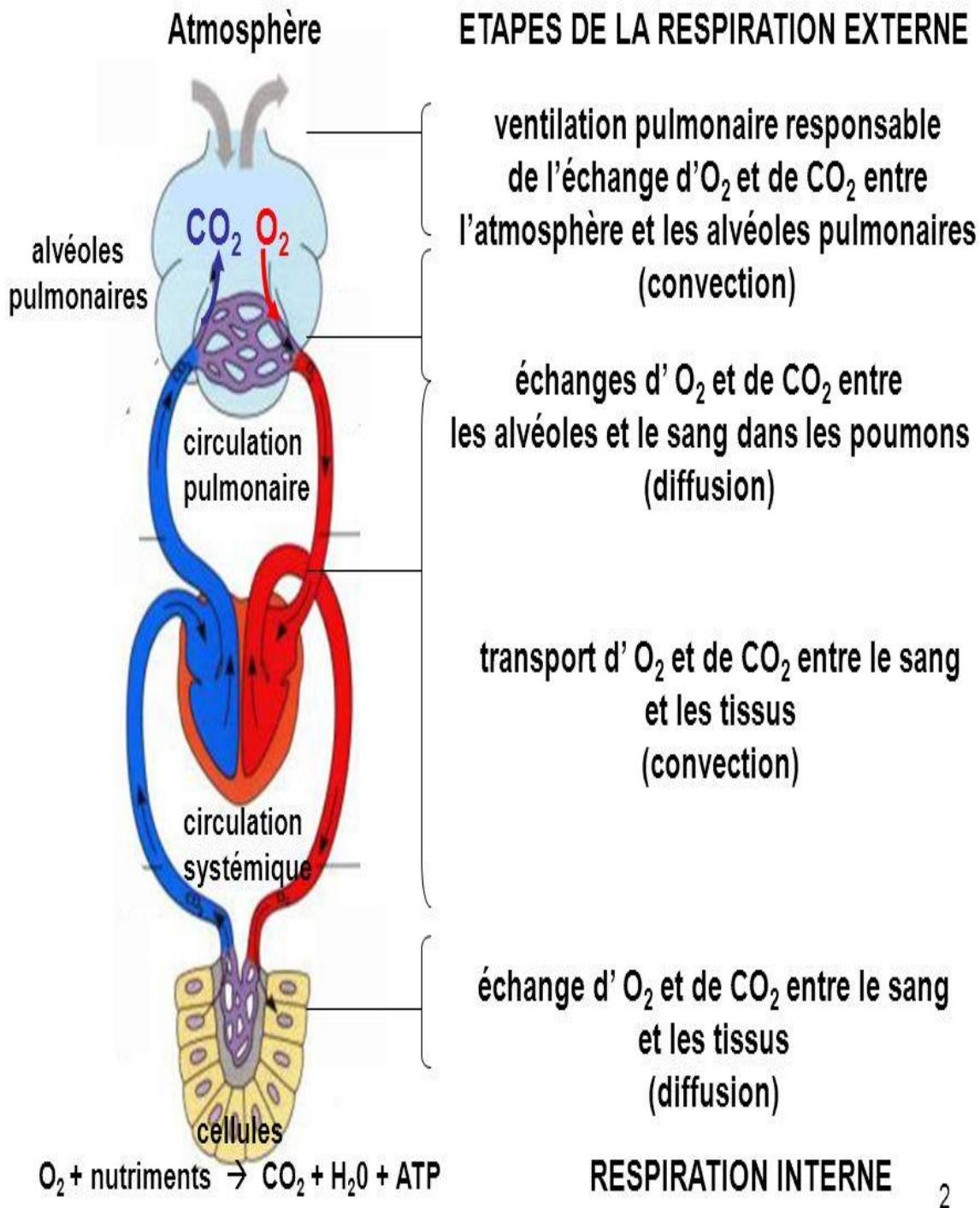


Figure 17: Etapes de la respiration (Dupuis, 2015).

Chapitre II. L'appareil urinaire

L'appareil urinaire assure l'homéostasie c'est à dire le maintien de l'équilibre hydro-électrolytique de l'organisme (Reece et al., 2015). D'autre part, il participe à l'élimination d'une grande partie des déchets métaboliques, essentiellement des produits azotés, urée et créatinine, et des toxines.

Ces fonctions impliquent une irrigation sanguine importante : le sang est apporté aux reins par les artères rénales issues de l'aorte abdominale et repart, après avoir été "filtré", par les veines rénales débouchant dans la veine cave inférieure (Rohen et al., 2011; Menche, 2017).

II.1. Anatomie du tractus urinaire

L'appareil urinaire est composé de 2 parties :

- * Une partie glandulaire ; les reins avec comme unité fonctionnelle « les néphrons »
- * Les voies urinaires ; la vessie, les uretères qui transportent l'urine des reins à la vessie et l'urètre qui transporte l'urine de la vessie vers l'extérieur de l'organisme.

II.1.1. Les reins

Chez les ruminants, les reins sont au nombre de deux : l'un droit, l'autre gauche ils sont de couleur brun chocolat et de consistance ferme et élastique. Ils sont localisés en partie dorsale de l'abdomen, de part et d'autre de l'aorte et de la veine cave caudale, ventralement aux premières vertèbres lombaires. Chez les bovins, les reins sont polylobés (13 à 35 lobes), chez les petits ruminants et les monogastriques sont unilobaires et présentent une surface lisse et ressemblent à des haricots épais et courts, de forme bombée.

Les reins filtrent le sang et permettent le rejet de l'urée par l'urine, dans la vessie puis dans le milieu extérieur (Menche, 2017).

II.1.1.1. Conformation externe

Le rein est un organe entouré par une capsule fibreuse, il présente un bord externe convexe et un bord interne concave d'où se détache le hile rénal (C'est au niveau du hile rénal qu'entrent ou sortent des reins les structures suivantes: les uretères, les vaisseaux sanguins rénaux et les nerfs).

II.1.1.2. Conformation interne

À l'intérieur de chaque rein, on distingue 3 parties (Cummings, 2001 ; Eroschenko, 2008 ; Mescher, 2016):

- Une partie périphérique : **la substance corticale**.
- Une partie centrale ou **la substance médullaire**

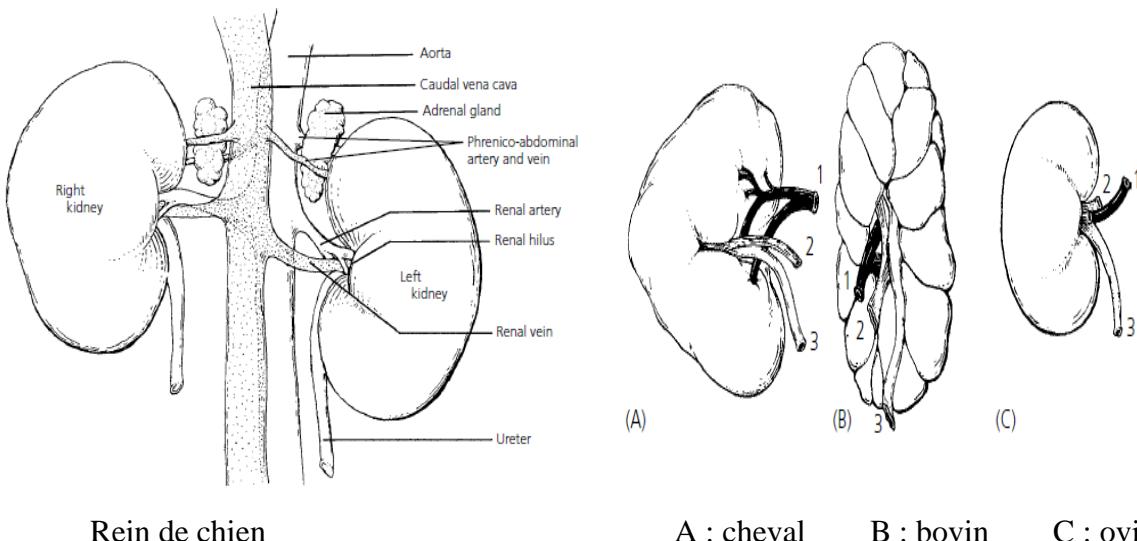


Figure 18 : Conformation externe des reins (Reece, 2009).

La substance médullaire est formée par la juxtaposition de segments de forme conique, les pyramides de Malpighi ; la base des pyramides est orientée vers le cortex; et la pointe (sommet) des pyramides (= papille rénale) est orientée vers l'intérieur du rein.

*Chaque pyramide est formée de faisceaux de tubules microscopiques parallèles.

*Chaque pyramide avec son capuchon de tissu cortical forme un lobe rénal (= 7 à 8/ rein).

•Une partie interne ; le pelvis rénal ou **bassinet** : tube plat en forme d'entonnoir, il communique avec l'uretère. À l'intérieur du rein, le bassinet se prolonge par :

*Les calices rénaux majeurs (= 2 ou 3).

*Les calices rénaux mineurs : ramifications des précédents → cavités où débouchent les papilles des pyramides.

NB : Les calices reçoivent continuellement l'urine en provenance des orifices papillaires et la déverse dans le bassinet.

Le rein est un organe massif qui est constitué d'unités élémentaires (les néphrons) et de tubes collecteurs de Bellini.

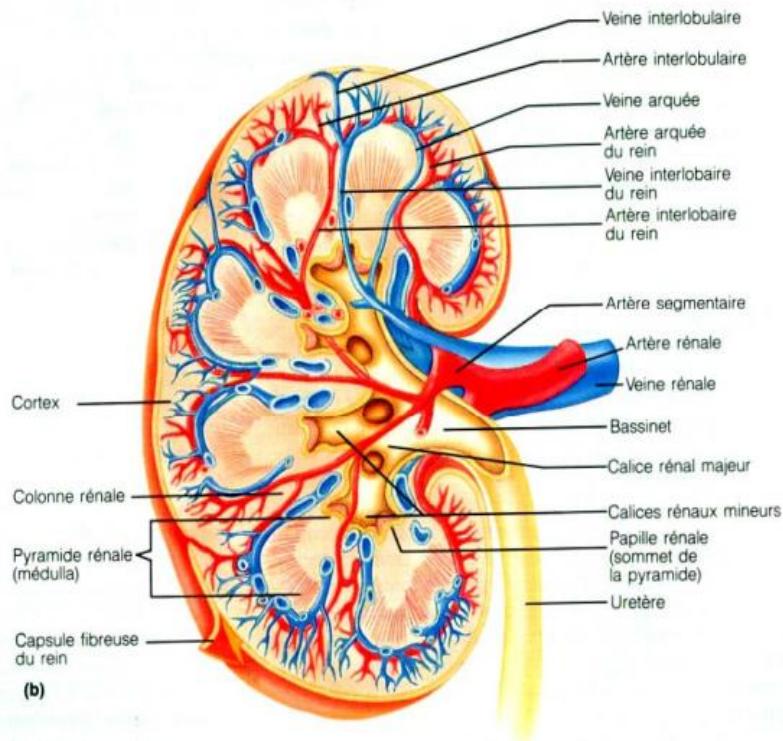


Figure 19: Structure du rein (Cummings, 2001).

II.1.2. Le néphron : est l'unité fonctionnelle de base du rein des vertébrés ; il a son origine embryonnaire dans le mésoderme. Le néphron est le lieu des échanges entre le filtrat glomérulaire et le plasma, situé au niveau du parenchyme rénal. Il existe plus d'un million de néphrons par rein, qui vont se distribuer, toujours de la même façon, entre la corticale rénale et la médullaire (Reece, 2009 ; Menche, 2017).

Tableau 1 : Nombre approximatif de néphrons pour chaque rein chez quelques espèces animales (Reece, 2009).

Species	Nephrons
Cattle	4,000,000
Pig	1,250,000
Dog	415,000
Cat	190,000
Human	1,000,000

Chaque néphron comprend différentes parties :

II.1.2.1. Le corpuscule de Malpighi : (segment initial) formé par (Aurelie, 2007 ; Menche, 2017) :

-Le glomérule de Malpighi : réseau de capillaires artériels à la forme d'une sphère limitée d'une enveloppe : il a pour fonction de filtrer le sang pour produire l'urine primitive ou filtrat glomérulaire.

-La capsule de Bowman : élément à double paroi entourant le glomérule communiquant avec le tube contourné qui lui fait suite.

II.1.2.1.2. Le tube contourné proximal : qui se détache de la capsule de Bowman : réabsorbe 99% du sodium avec une quantité proportionnelle d'eau. Il aura également sécrétion des acides organiques et des bases.

II.1.2.1.3. L'anse de Henlé : qui fait suite au tube proximal et se trouve dans les pyramides de Malpighi. Elle comporte 2 parties : la branche descendante et la branche ascendante. Son rôle est de concentrer l'urine.

II.1.2.1.4. Le tube contourné distal : fait suite à l'anse de Henlé. Lieu de réabsorption des ions Na^+ et de l'eau, et de sécrétion d'ions K^+ et H^+ . Ces phénomènes sont présents afin de maintenir le milieu constant. C'est à ce niveau qu'est élaborée la rénine.

II.1.2.1. 5. Le tube collecteur de Bellini : qui fait suite au tube distal. Il traverse la pyramide de Malpighi puis s'unit aux tubes collecteurs des autres néphrons et forme un canal qui s'ouvre au sommet de la papille par un orifice, le port urinaire. Il recueille l'urine à partir de plusieurs néphrons et l'achemine au bassinet.

II.1.2.1. 6. L'appareil juxta glomérulaire : est le triangle formé par l'extrémité du tube droit distal et les artéries afférente et efférente. A ce niveau, on trouve (Reece et al., 2015). :

*Des cellules juxta-glomérulaires: sont des cellules musculaires lisses situées dans les parois des artéries ; rôles: mécanorécepteurs qui détectent directement la pression artérielle, et synthétisent la rénine.

*La macula densa: amas de grandes cellules situées dans la paroi du tubule ; rôles: chimiorécepteurs, osmorécepteurs qui réagissent aux variations du contenu en solutés du filtrat

UNITE FONCTIONNELLE DU REIN = NEPHRON

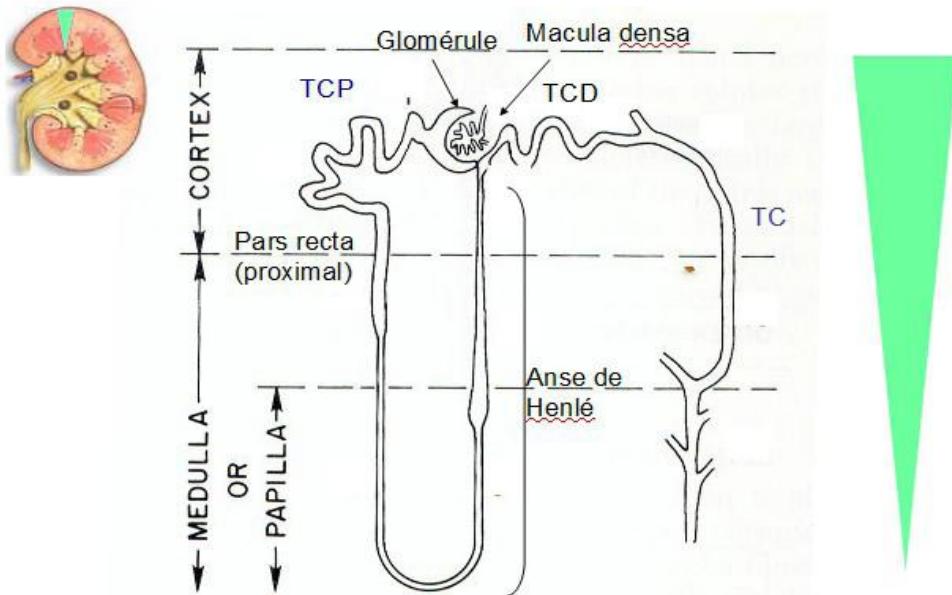


Figure 20: Structure du néphron (Aurelie, 2007).

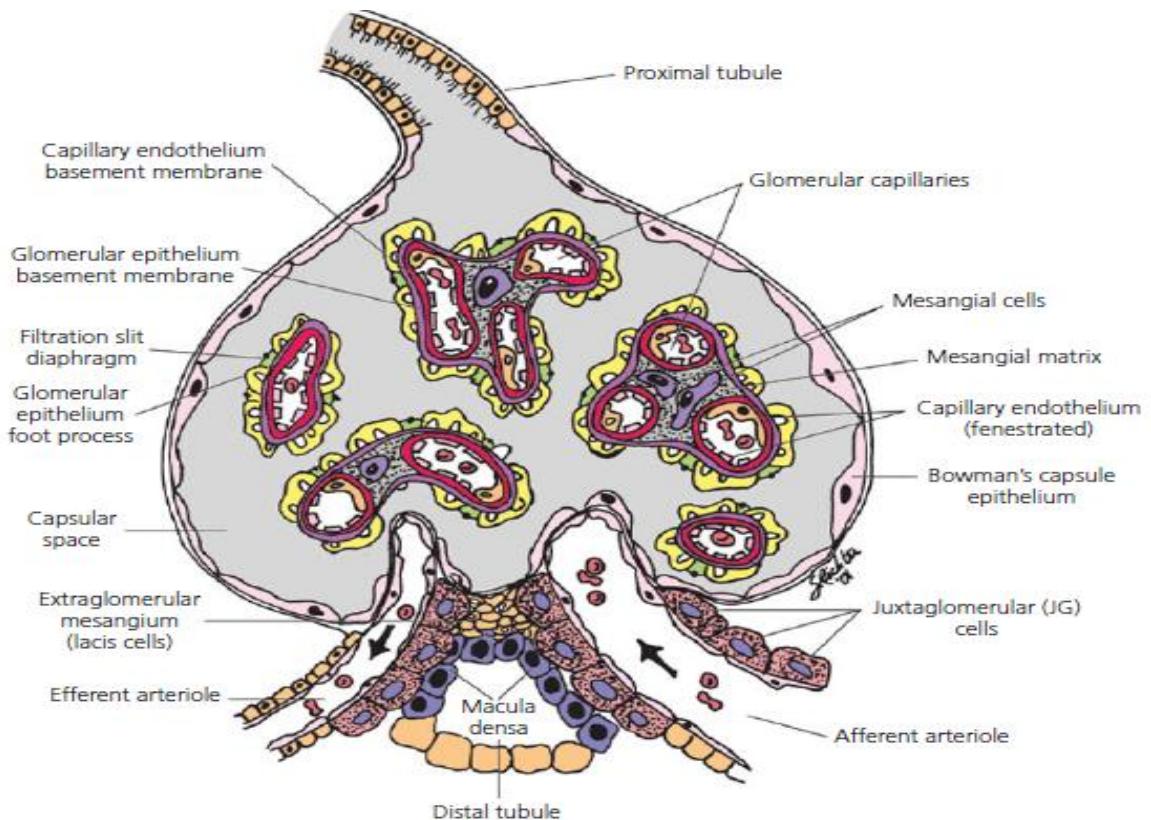


Figure 21: Schéma de l'appareil juxtaglomérulaire (Reece et al., 2015).

II.1.3 Les voies urinaires

II.1.3.1. L'uretère : Il transporte l'urine du bassinet au trigone vésical, près du col de la vessie.

Il chemine contre la paroi lombaire puis contre celle du bassin, en région rétropéritonéale

II.1.3.2. La vessie : La vessie est un sac extensible dans lequel l'urine va s'accumuler avant d'être évacuée à l'extérieur. Elle a une origine allantoïdienne (à partir d'une portion abdominale de l'allantoïde). Sa taille, sa position et son aspect extérieur varient avec son état de réplétion ; lorsqu'elle est vide, la vessie est un organe piriforme situé sur le plancher du bassin qui a une paroi épaisse et ridée. Celle-ci s'amincit au fur et à mesure que la vessie se remplit. La capacité de la vessie des bovins est de 2 à 3 litres.

II.1.3.3. L'urètre

Il prend son origine au col de la vessie au niveau de l'ostium interne et se termine par l'ostium externe ou méat urinaire. L'urètre de la femelle relie le col de la vessie au plancher du vestibule du vagin. Celui du male est subdivisé en un urètre pelvien et un urètre pénien.

II.2. Histologie du tractus urinaire

II.2.1. Le segment urinaire haut (sus-vésical) : les calices, le bassinet et les uretères

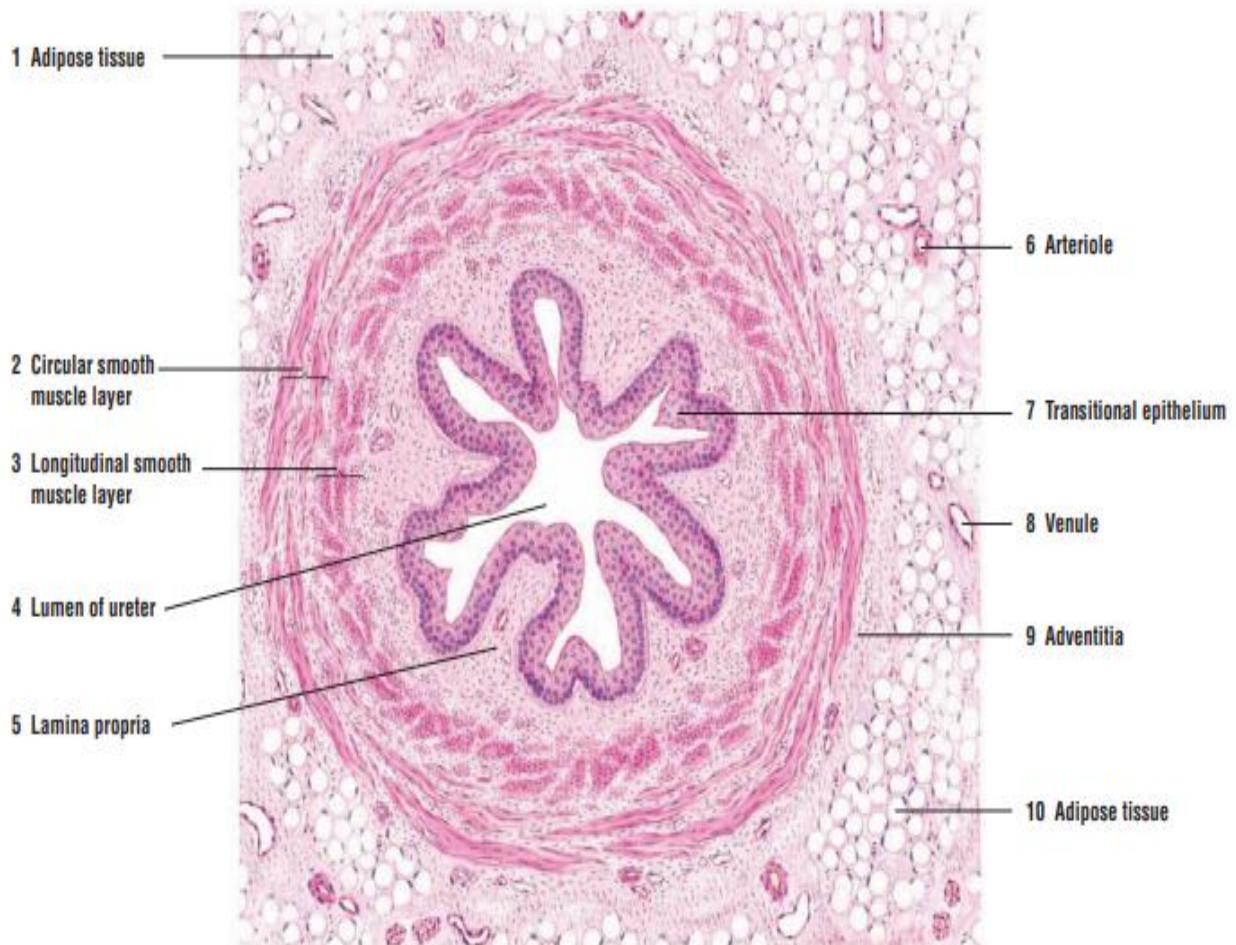
Il est constitué de 3 couches : muqueuse, musculeuse et adventice.

La muqueuse est globalement identique dans ses localisations et comporte un épithélium pseudostratifié polymorphe (ou dit de transition) reposant sur un chorion. L'épithélium est un **urothélium** à deux capacités fonctionnelles majeures qui autorise des changements de forme et qui constitue une barrière à la réabsorption de l'urine. On distingue 3 couches de cellules superposées toutes en contact avec la lame basale :

*une couche basale de cellules prismatiques,

*une zone intermédiaire faite d'un nombre variable de couches de cellules en fonction du degré de remplissage de la lumière,

*une couche superficielle ou lumineuse faite de cellules en ombrelle, caractérisées par la présence de zonula occludens ainsi que par l'existence de plaques spécialisées de membrane asymétrique.



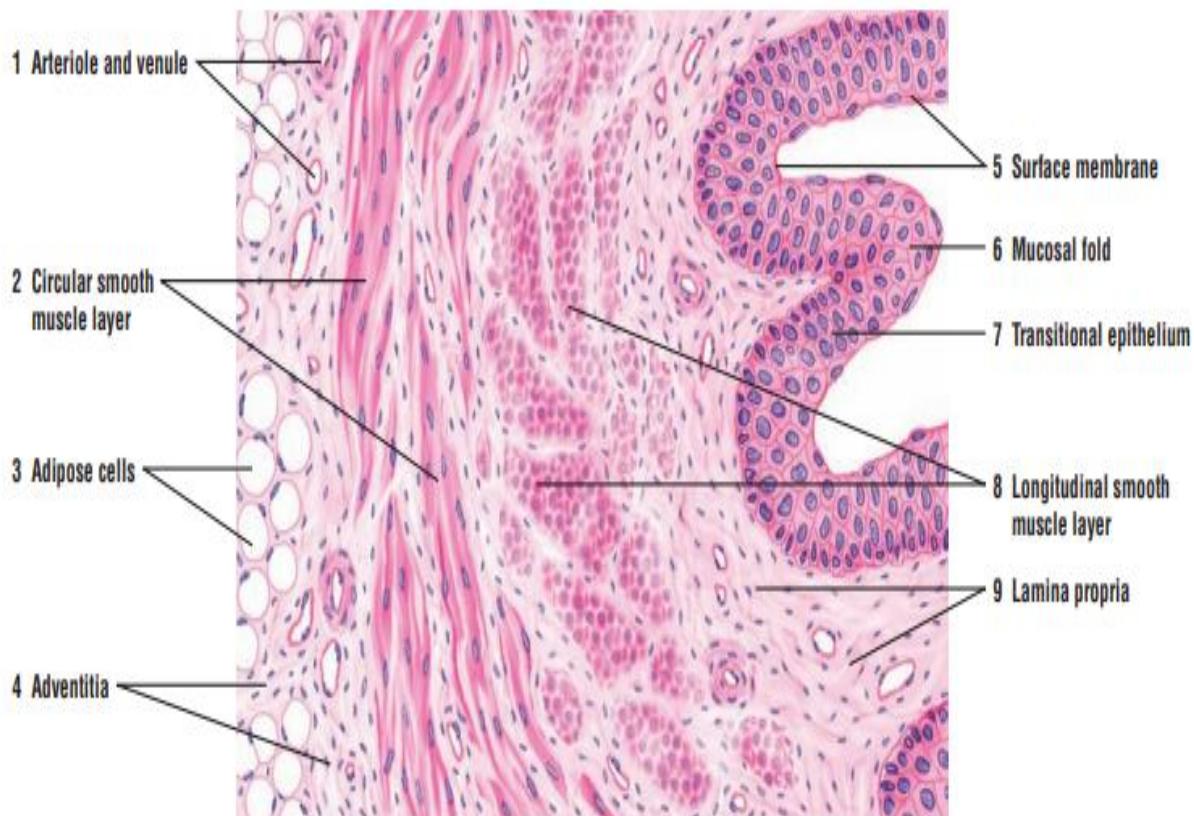
■ Urinary system: ureter (transverse section). Stain: hematoxylin and eosin. Low magnification.

Figure 22: Coupe de l'uretère (Eroschenko, 2008).

Le chorion : est fait de tissu conjonctif riche en fibres élastiques et en fibres nerveuses amyéliniques ainsi qu'en vaisseaux sanguins et lymphatiques. Il est en revanche dépourvu de glandes. Au niveau des uretères, il forme des replis longitudinaux offrant un aspect festonné de la lumière en coupe transversale. La musculeuse est formée par des faisceaux de cellules musculaires lisses séparées par des travées conjonctives. Ces faisceaux ont une disposition variable selon le niveau anatomique : au niveau des calices, du bassinet et des 2/3 supérieurs de l'uretère,

La musculeuse : comporte 2 couches : longitudinale interne et circulaire externe et 3 couches, longitudinales interne et externe et circulaire moyenne, dans le 1/3 inférieur de l'uretère.

L'adventice : est composée d'un tissu conjonctif contenant des vaisseaux, des nerfs et du tissu adipeux (Catala et al., 2007).



■ Section of a ureter wall (transverse section). Stain: hematoxylin and eosin. Medium magnification.

Figure 23: Structure de la paroi de l'uretère (Eroschenko, 2008).

II.2.2. Histologie de la vessie

La vessie a une structure histologique proche du segment sus-vésical avec quelques particularités : l'urothélium, un peu plus épais fait de 6 à 8 couches « apparentes » de cellules superficielles de grande taille parfois binucléées. Le chorion est riche en fibres élastiques et forme des plis variables selon l'état de réplétion de l'organe. La musculeuse a une structure plexiforme avec une couche circulaire moyenne plus développée qui se renforce au départ de l'urètre pour former un véritable sphincter lisse (Eroschenko, 2008).

L'adventice entoure la vessie et fusionne sur la face postérieure avec la séreuse péritonéale. La vessie est richement innervée par des fibres d'origine sympathiques et parasympathiques.



■ Urinary bladder: wall (transverse section). Stain: hematoxylin and eosin. Low magnification.

Figure 24: Histologie de la vessie (Eroschenko, 2008).



■ Urinary bladder: mucosa stretched (transverse section). Stain: hematoxylin and eosin. Medium magnification.

Figure 25: Structure de l'épithélium transitionnel de la vessie (Eroschenko, 2008).

II.2.3. Histologie de l'urètre

Canal excréteur terminal qui conduit l'urine de la vessie à l'extérieur. Présence d'un sphincter à la jonction vessie -urètre, formé par FML de la couche musculaire moyenne de la vessie + FML urétrales.

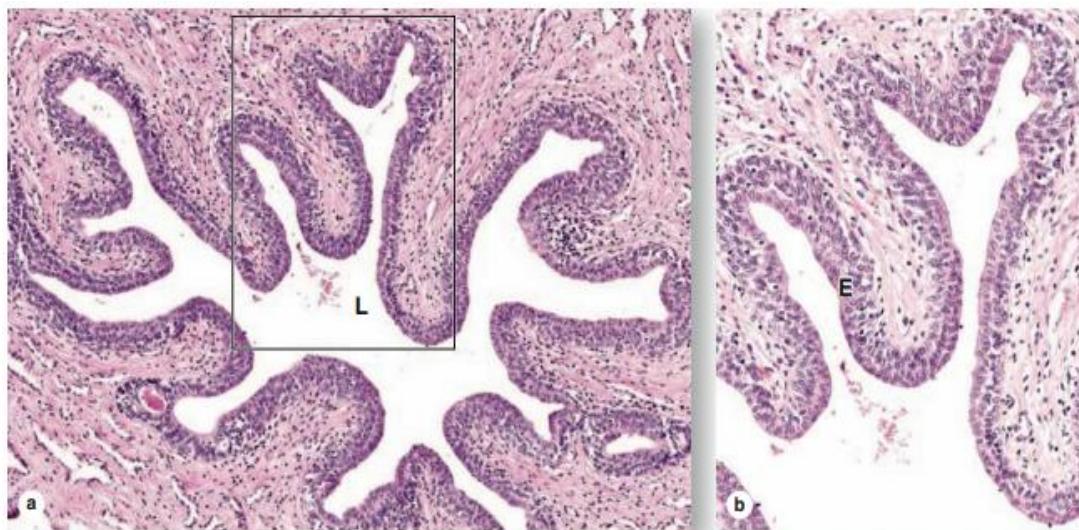
-Urètre féminin : bordé par un épithélium stratifié pavimenteux (épidermoïde non kératinisé, Malpighien), présence de glandes muqueuses dans le chorion (lubrification paroi). Présence d'un sphincter musculaire strié, donc à contrôle volontaire, dans sa partie médiane au niveau de la traversée des muscles du plancher pelvien.

-Urètre masculin : il est également le conduit final de l'appareil génital. Il se divise en trois zones : urètre prostatique, membraneux et pénien (Mescher, 2016).

-Urètre prostatique : s'étend du col de la vessie jusqu'à la prostate, abouchement de nombreux canaux glandulaires et des canaux éjaculateurs d'origine prostatique. Son épithélium est identique au segment précédent.

-Urètre membraneux : court segment qui traverse les muscles du plancher pelvien, possède un sphincter volontaire (muscles striés) responsable du contrôle mictionnel. A partir de là, l'épithélium est moins spécialisé, il devient pseudostratifié prismatique.

-Urètre pénien ou spongieux : partie distale qui circule dans le corps spongieux du pénis, même épithélium que le précédent. En fin d'urètre, l'épithélium fusionne avec l'épithélium Malpighien externe.



The urethra is a fibromuscular tube that carries urine from the bladder to the exterior of the body.

(a) A transverse section shows that the mucosa has large longitudinal folds around the lumen (L). (X50; H&E)

(b) A higher magnification of the enclosed area shows the unusual stratified columnar nature of the urethral epithelium

(E). This thick epithelial lining varies between stratified columnar in some areas and pseudostratified columnar elsewhere, but it becomes stratified squamous at the distal end of the urethra. (X250; H&E)

Figure 26 : Histologie de l'urètre (Mescher, 2016).

II.2.4. Histologie du néphron

***Le corpuscule de Malpighi** : comporte le glomérule (vasculaire) et les deux feuillets (pariétal et viscéral) de la capsule de Bowman limitant autour du glomérule la chambre de filtration contenant l'urine primitive qui s'écoule par le pôle urinaire vers le tube contourné proximal.

La chambre de filtration est limitée par la capsule de Bowman. Ses deux couches, pariétale et viscérale, se réfléchissent l'une dans l'autre au niveau du pôle vasculaire du glomérule.

*** La couche pariétale** est recouverte d'un épithélium pavimenteux simple reposant sur une lame basale, en continuité avec l'épithélium cubique simple du tube contourné proximal.

* **La couche viscérale** est discontinue faite de cellules appelée podocytes qui émettent de nombreux prolongements cytoplasmiques d'où se détache une multitude de fines digitations (« pieds des podocytes » ou pédicelles). Celles-ci s'appliquent, en s'intriquant les unes avec les autres, sur la face externe de la membrane basale des capillaires.

Entre les couches viscérale et pariétale de la capsule, on trouve un espace urinaire (espace de Bowman) contenant l'ultrafiltrat de plasma (urine primitive).

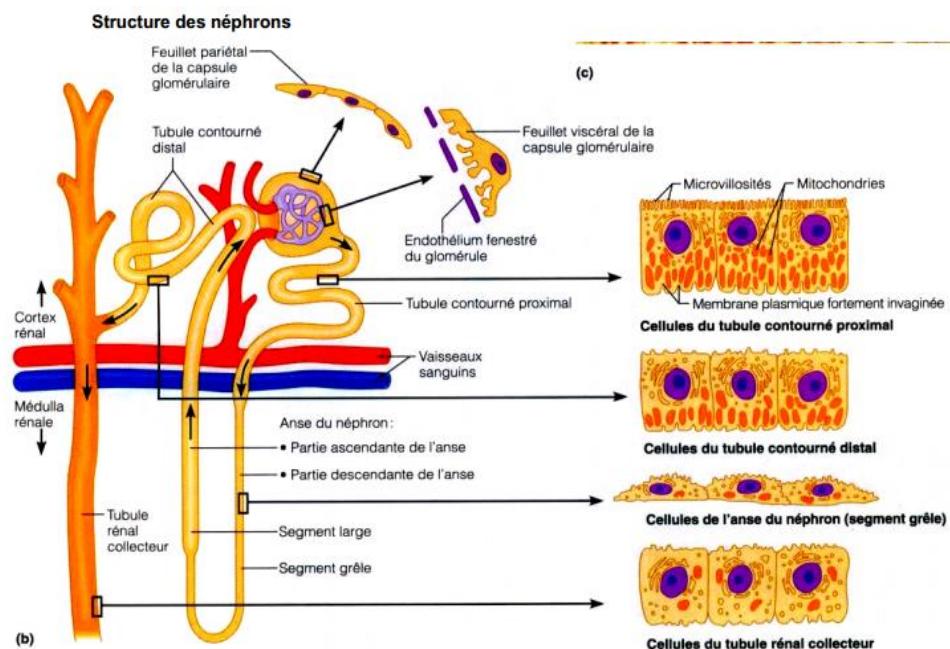


Figure 27: Histologie du néphron (Source: Anonyme 3).

* **Le tube contourné proximal :** partie la plus longue, la plus large et la plus contournée du néphron. Il possède une lumière étroite bordée par un épithélium cubique. Les cellules épithéliales qui le constituent sont caractérisées par (Catala et al., 2007):

1. de très nombreuses microvillosités allongées qui forment une bordure en brosse à leur pôle apical. Les enzymes présentes (ATPases, peptidases, phosphatases, disaccharidases) et les transporteurs de la bordure en brosse assurent la réabsorption quasi complète des acides aminés et des sucres dont le glucose de l'urine primitive :
2. les complexes de jonction (zonula occludens associées à des zonula adhaerens et desmosomes),
3. les nombreuses mitochondries très allongées qui se disposent perpendiculairement à la membrane du pôle basal et se situent entre les replis de celle-ci, (bâtonnets de Heidenhain),
4. un appareil de Golgi bien développé ainsi que de nombreux lysosomes et vésicules d'endocytose,

5. de profonds replis de la membrane de leur pôle latéro-basal qui déterminent des prolongements cytoplasmiques interdigités avec ceux issus des cellules voisines.

***Anse de Henlé :** Les segments larges des branches sont bordés par un épithélium cubique bas de transition avec le revêtement épithéial des tubules proximaux. Les segments grêles sont bordés par un épithélium pavimenteux simple.

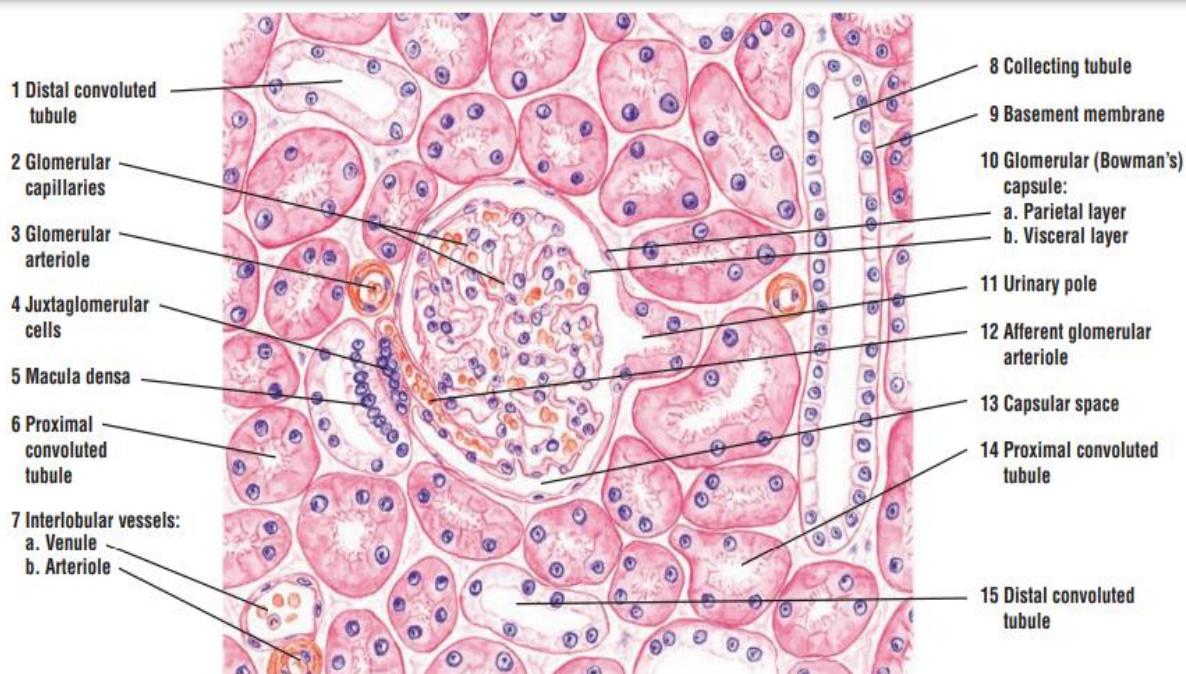
***Tube contourné distal :** Le revêtement cellulaire épithéial cubique du tube contourné distal possède les caractéristiques suivantes (Eroschenko, 2008):

1. Les cellules cubiques sont plus basses que celles du tube contourné proximal et sont dépourvues de bordure en brosse.
2. Comme dans le tube contourné proximal, la membrane plasmique du domaine basolatéral forme des replis qui hébergent des mitochondries.
3. Dans la macula densa, les cellules ont une polarité inversée: le noyau occupe une position apicale et le domaine basal, contenant un appareil de Golgi, fait face aux cellules juxtaglomérulaires et aux cellules mésangiales extraglomérulaires. La macula densa, située à la jonction entre le segment ascendant large et le tube contourné distal, perçoit les modifications de la concentration en Na^+ du fluide tubulaire.

***Tubule collecteur :** est bordé par un **épithélium cubique** composé de deux types de cellules: des cellules principales et des cellules intercalaires.

***L'appareil juxtaglomérulaire :** est une petite structure endocrine comprenant:

1. La macula densa, une région distincte de la portion initiale du tube contourné distal.
2. Les cellules mésangiales extraglomérulaires.
3. Les cellules productrices de rénine (cellules juxtaglomérulaires) de l'artériole glomérulaire afférente et, à un moindre degré, de l'artériole efférente du glomérule.



■ Kidney cortex: juxtaglomerular apparatus. Stain: hematoxylin and eosin. Medium magnification.

Figure 28: Histologie du néphron (Eroschenko, 2008).

II.3. 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. L'urine plasmatique subit au niveau du néphron une filtration glomérulaire et des ajustements tubulaires (Kolb, 1975 ; Beaumont et al., 2004).

***Filtration glomérulaire :** correspond à un transfert unidirectionnel par ultra filtration d'une grande quantité de liquide plasmatique dépourvue de protéine de haut poids moléculaire depuis le compartiment capillaire des glomérules vers la chambre urinaire. L'ultrafiltrat obtenu constitue l'urine primitive qui a une composition ionique identique à celle du plasma quasiment dépourvu de protéine (albumine, globulines,...) et sans macromolécules.

Le transfert glomérulaire est un processus passif d'ultrafiltration. La pression de filtration est la résultante algébrique des pressions hydrostatiques et oncotiques qui s'exercent de part et d'autre du filtre glomérulaire. La force motrice principale de ce transfert résulte de l'activité cardiaque.

***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 péritubulaires : ces transferts sont appelés réabsorption.

- Des capillaires péritubulaires vers la lumière tubulaire. Ces transferts sont appelés sécrétion.

II.3.1. Filtration glomérulaire

a) Ultrafiltration

La filtration glomérulaire correspond à un transfert unidirectionnel par ultra filtration des capillaires vers la chambre urinaire aboutissant à la formation d'un ultrafiltrat constituant l'urine primitive. La surface et la perméabilité du filtre glomérulaire déterminent l'amplitude et la qualité du transfert.

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

Le transfert glomérulaire est un processus passif d'ultrafiltration. La pression de filtration est la résultante algébrique des pressions hydrostatiques et oncotiques qui s'exercent de part et d'autre du filtre glomérulaire. La force motrice principale de ce transfert résulte de l'activité cardiaque.

b) Forces impliquées dans la filtration glomérulaire

Les forces qui déterminent les mouvements de liquides à travers la barrière de filtration glomérulaire sont les mêmes qui régissent les mouvements de liquides au niveau des capillaires d'une manière générale : il s'agit de la différence entre les pressions hydrostatique et oncotique entre les capillaires et la capsule de Bowman (Beaumont et al., 2004).

* Les forces favorisant la filtration :

- La pression hydrostatique capillaire (PHc) est de l'ordre de 50 mmHg.
- La pression oncotique de la capsule de Bowman (π_{cB}) voisine de 0 compte tenu de l'absence de protéine dans la chambre urinaire.

* Les forces s'opposant à la filtration :

- La pression hydrostatique de la capsule de Bowman (PcB) de l'ordre de 10 mmHg.
- La pression oncotique des capillaires glomérulaires π_{cg} de l'ordre de 30 mmHg.

*La pression efficace de filtration (PEF: pression d'ultrafiltration) est donc la résultante de la différence entre la pression hydrostatique des capillaires glomérulaires (PHc) avec la pression oncotique capillaire (π_{cg}) et la pression hydrostatique dans la lumière de la capsule de Bowman (PcB)

La pression efficace de filtration (PEF) est donc la résultante :

$$PEF = (P_{cg} + \pi_{cB}) - (P_{cB} + \pi_{cg})$$

π_{cB} étant voisine de zéro

$$PEF = P_{cg} - (P_{cB} + \pi_{cg})$$

*Le débit de filtration glomérulaire (DFG) est exprimé en millilitres de filtrat glomérulaire produit par minute et par kilogramme de poids vif.

II.3.2. Les ajustements tubulaires

II.3.2.1. Réabsorption tubulaire : correspond au passage d'une substance filtrée à travers l'épithélium tubulaire de la lumière du tubule vers le liquide interstitiel puis vers les capillaires péri-tubulaires. Le tube proximal est celui de tous les segments du tube du néphron qui réalise le plus d'échanges : au moins 60% de la plupart des substances filtrées sont réabsorbées avant que le liquide tubulaire ne quitte le tube proximal. A ce niveau il aura (Gilles, 2006) :

- Réabsorption massive de sodium par un mécanisme de transport actif non saturable :
 - * par un co-transport avec le glucose, des acides aminés, des phosphates et des sulfates dans le segment initial du tube proximal
 - * par un contre transport avec les ions H^+ : un ion Na réabsorbé pour un ion H^+ sécrété aboutissant à la régénération d'un ion bicarbonate.
 - * Par réabsorption d'une solution de chlorure de sodium dans la seconde partie du tube proximal. Le chlore suit passivement la réabsorption active du sodium.
- Réabsorption de la totalité du glucose sanguin et des acides aminés.
- Réabsorption par endocytose des peptides et des protéines de faible poids moléculaire filtrés (une grande partie des peptides filtrés est dégradée en acides aminés par les peptidases présentes dans la bordure en brosse du tube proximal et est réabsorbée par le co-transport avec le sodium)
- Le potassium et le calcium sont présents en faibles concentrations dans la lumière tubulaire et sont réabsorbés passivement en fin de tube proximal.
- La réabsorption importante de solutés dilue le liquide tubulaire, ce qui permet la réabsorption d'eau selon le gradient créé. L'épithélium tubulaire est très perméable à l'eau et la bordure en brosse des cellules leur confère une large surface d'absorption. Ainsi, plus de 60% de l'eau filtrée est réabsorbée dans le tube proximal.

La branche descendante de l'anse de Henlé est perméable à l'eau mais relativement peu perméable aux ions et particules (l'eau est absorbée vers le milieu interstitiel du fait du gradient de pression osmotique entre la lumière tubulaire et le liquide interstitiel).

La branche ascendante qui lui succède est relativement imperméable à l'eau et possède une partie large qui est le site d'une réabsorption importante de chlorure de sodium.

Le tube contourné distal permet la réabsorption d'eau, de sodium et de l'urée.

II.3.2.2. Sécrétion tubulaire

Une autre fonction importante du tube proximal est le retrait d'une grande variété d'ions organiques du sang vers la lumière tubulaire. Cet ensemble d'ions organiques comprend à la fois les déchets endogènes (sels biliaires, les oxalates, l'urate, la créatinine, les prostaglandines) et les médicaments ou toxines exogènes (antibiotiques, diurétiques, analgésiques). Ces substances sont souvent liées à des protéines dans le plasma, c'est pourquoi elles sont rarement filtrées par le glomérule. Ainsi, le tube proximal joue un rôle vital dans l'évacuation de ces substances à partir du sang. Le mécanisme de sécrétion implique une capture de ces substances dans le sang vers la cellule tubulaire, suivie de son extraction dans le liquide tubulaire, médiée par un transporteur.

*Les ions H^+ sont sécrétés activement dans la lumière tubulaire. Cette sécrétion tubulaire proximale des ions H^+ va entraîner une acidification de l'urine par :

- Réabsorption quasi complète des ions bicarbonates filtrés
- Formation d'acidité titrable : l'ion H^+ sécrété se lie à un anion de sel d'acide faible essentiellement des phosphates PO_4^{--} pour former un acide faible qui est excrété. La sécrétion de l'ion H catalysé par l'anhydrase carbonique aboutit à la régénération d'un ion bicarbonate.
- Sécrétion d'ammoniaque totale ($NH_3^+ + NH_4^+$) composée à 95 % de NH_4^+ synthétisé et sécrété par les cellules tubulaires proximales (60 à 70 % de l'ammoniaque et dans les cellules du tube contourné distal à un moindre degré)

II.4. Concentration et dilution de l'urine

Pour maintenir l'équilibre hydroélectrolytique face aux variations des apports en eau, le rein doit être capable de concentrer ou de diluer l'urine par rapport au plasma. Trois facteurs clés interviennent dans la détermination de la concentration de l'urine produite.

1-la présence d'un gradient osmotique créé et maintenu dans les tissus qui entourent les néphrons juxtaglomérulaires, dont les anses de Henlé plongent depuis le cortex rénal profondément dans la médulla.

2-le liquide tubulaire est progressivement dilué lorsqu'il passe de l'anse de Henlé dans le tube contourné distal.

3-la perméabilité à l'eau : la concentration et dilution de l'urine des cellules des tubes collecteurs peut être directement régulée par l'action de l'hormone antidiurétique (ADH)

II.4.1. L'hormone antidiurétique (ADH), ou vasopressine : agit sur les tubes collecteurs, mais aussi sur les tubes contournés distaux. Elle est produite par la neurohypophyse. Ses cellules cibles au niveau du tube collecteur sont les cellules principales. En l'absence de cette hormone, la membrane lumineuse de ces cellules est relativement imperméable à l'eau. L'ADH

stimule l'insertion de canaux à eau (aquaporines) dans les membranes cellulaires pour augmenter leur perméabilité à l'eau.

La présence d'ADH permet des échanges d'eau par gradient osmotique entre milieu luminal et milieu interstitiel, aboutissant à une urine concentrée (hypertonique) et en volume réduit, tandis que l'absence d'ADH engendre l'excrétion d'un grand volume d'une urine hypotonique. La réabsorption ou l'excrétion de l'eau dans cette partie du néphron est souvent qualifiée de facultative, car sans ADH, la réabsorption n'a pas lieu. Ceci contraste avec les autres parties du néphron, dans lesquelles les cellules sont en permanence perméables à l'eau, et la réabsorption d'eau est alors qualifiée d'obligatoire, puisque lorsque le sodium est réabsorbé, l'eau est «obligée» de suivre.

La sécrétion de l'ADH par l'hypophyse est régulée par la pression osmotique du liquide extracellulaire. En effet, des osmorécepteurs sont présents au niveau de l'hypothalamus. Ils enregistrent les variations de l'osmolarité du liquide interstitiel, surtout concernant le sodium. Une augmentation de cette osmolarité entraîne la libération d'ADH par l'hypophyse qui provoque la réabsorption d'eau dans les tubes collecteurs. Une urine concentrée est émise en faible volume. L'augmentation de l'eau dans le milieu interstitiel et l'élimination de particules osmotiques par l'urine diminue la pression osmotique du milieu extracellulaire, agissant comme un rétrocontrôle négatif sur la libération d'ADH. De même la réduction de l'osmolarité du milieu extracellulaire inhibe la libération d'ADH, engendrant la production d'un grand volume d'urine, et permettant ainsi d'éliminer toute eau en excès dans l'organisme. La sécrétion d'ADH est capable de répondre à des variations de l'osmolarité plasmatique de 2%, dans un sens ou dans l'autre.

La sécrétion d'ADH est également influencée par d'autres facteurs : par exemple un environnement froid inhibe la sécrétion d'ADH, augmentant la production d'urine et la prise de boisson.

II.5. Epuration sélective : épuration des déchets azotés

L'urine est une solution aqueuse de sels minéraux et de substances organiques dont la composition diffère de celle du plasma.

A l'état normal, l'urine est dépourvue de glucose, entièrement réabsorbée dans le tube proximal malgré l'existence d'un transfert maximum. La faible quantité de protéine qui passe le filtre glomérulaire est réabsorbée par endocytose.

Le rein est l'émonctoire des déchets du métabolisme protidique et de certains composés organiques. Les déchets protidiques communément dosés en pratique clinique sont l'urée, la créatinine et l'acide urique.

- **L'urée** : filtrée en grande quantité réabsorbée et sécrétée de manière passive tout au long du tubule pour finalement être excrétée en grande quantité.

- **L'acide urique** filtré est presque entièrement réabsorbé (90 %) malgré un transfert actif limité par un transfert maximum.

- **La créatinine** : dont la production dépend de la masse musculaire corporelle est pratiquement constante. Elle est complètement filtrée par le glomérule et n'est pas réabsorbé.

II.6. Fonction endocrine du rein

Le rein représente le site de formation de plusieurs hormones :

- l'erythropoïétine
- la forme active de la vitamine D
- la rénine et le SRA
- la prostaglandine et le système kinine kallicréine.

L'erythropoïétine est une glycoprotéine synthétisée par les cellules endothéliales des capillaires péri tubulaires du cortex et de la médullaire externe. Elle agit sur la différenciation, la prolifération et la maturation des précurseurs des hématies

La transformation de la vitamine D en sa forme active 1.25 (OH) 2 D3 s'effectue sous l'action d'une α hydroxylase localisée dans les mitochondries du tube proximal

II.6.1. Régulation du débit sanguin rénal et de la filtration glomérulaire

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'oxygène 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.

On distingue 2 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.

II.6.1.1. Régulation intrinsèque

a) Autorégulation : le débit sanguin intra rénal est maintenu constant pour de larges variations de la pression artérielle moyenne systémique entre 80 et 140 mmHg dépendant essentiellement des adaptations des résistances artériolaires post et surtout pré glomérulaires Deux mécanisme sont impliqués dans cette autorégulation du débit sanguin rénal :

- d'une part un mécanisme myogénique
- d'autre part un rétrocontrôle négatif tubulo-glomérulaire par l'intermédiaire de la macula densa

b) Systèmes hormonaux : le rein synthétise plusieurs substances vaso-actives exerçant leurs effets sur la vascularisation intra rénale.

- Système rénine angiotensine (SRA) intra rénal
- Système des prostaglandines (PG)
- Système kinine kallicréine (KK)

* Le système rénine-Angiotensine

La rénine est synthétisée par les cellules granulaires de l'artériole afférente libérée dans l'interstitium permettant la formation d'angiotensine I convertie en angiotensine II en présence de l'enzyme de conversion. La circulation rénale est donc influencée par l'angiotensine circulante et par l'angiotensine II produite dans le parenchyme rénal. L'angiotensine II est un vasoconstricteur puissant agissant sur 3 niveaux dans le parenchyme rénal.

1- L'angiotensine agit préférentiellement au niveau de l'artériole efférente. Elle entraîne une vasoconstriction de l'artériole efférente provoquant une chute du débit sanguin glomérulaire avec une augmentation de la pression hydrostatique capillaire glomérulaire et une augmentation de la fraction de filtration

2- L'angiotensine II provoque également une contraction des cellules mésangiales glomérulaires qui comportent des récepteurs spécifiques entraînant une baisse du coefficient de filtration glomérulaire (Kf).

3- L'angiotensine II a un rôle tonique vasoconstricteur sur la circulation médullaire grâce à la présence de nombreux récepteurs spécifiques de l'angiotensine dans la zone profonde de la médullaire externe.

*Système des prostaglandines

Les prostaglandines sont synthétisées dans le cortex et la médullaire à partir de l'acide arachidonique par la voie de la cyclo-oxygénase : Les prostaglandines E2, D2, I2 sont vasodilatrices entraînant une baisse des résistances artériolaires des artéries afférentes et efférentes responsables :

- d'une augmentation du débit sanguin glomérulaire
- d'une augmentation du débit de filtration glomérulaire

La thromboxane A2 est une prostaglandine vasoconstrictrice

*Système Kinine – kallicréine (KK)

La Kallicréine rénale synthétisée par les cellules tubulaires distales agit sur la kininogène pour aboutir à la formation de la bradykinine et de la lysyl bradykinine libérées dans la lumière tubulaire puis excrétées dans l'urine ou dégradées localement.

Les kinines sont vasodilatrices. Au niveau de la micro circulation glomérulaire, elles entraînent une vasodilatation donc une diminution des résistances artériolaires afférentes et efférentes avec augmentation du débit sanguin glomérulaire sans augmentation du débit de filtration glomérulaire en raison d'une diminution du coefficient de perméabilité K_f par effet direct sur des récepteurs glomérulaires spécifiques ou par le biais du SRA.

II.6.1.2. Régulation extrinsèque

Les systèmes de régulation extrinsèque associent des effets extra rénaux et des effets sur l'hémodynamique intra rénale et participent à la régulation de la pression artérielle systémique :

- système rénine-angiotensine-Aldostérone (contrôle de l'angiotensine II circulante)
- système nerveux sympathique
- système vasopressinergique (ADH)
- facteur atrial natriurétique (FAN)

*Le système rénine-angiotensine-aldostéron (SRAA)

Le système rénine-angiotensine participe à l'autorégulation du débit sanguin rénal par le feedback tubulo-glomérulaire réalisé par l'appareil juxtaglomérulaire. La rénine est une enzyme sécrétée par les cellules mésangiales extraglomérulaires granuleuses de l'appareil juxtaglomérulaire en réponse à une diminution de la pression sanguine, à une stimulation sympathique et/ou à de très faibles concentrations en sodium dans le liquide du tube contourné distal.

La rénine agit pour restaurer la pression sanguine de deux façons :

- Elle induit la conversion de l'angiotensinogène (en provenance du foie) en angiotensine I, qui est convertie en angiotensine II par l'enzyme de conversion de l'angiotensine. L'angiotensine II provoque une vasoconstriction généralisée des capillaires de l'organisme (et notamment de l'artéiole efférente). Cela réduit le flux sanguin à travers de nombreux capillaires, ce qui augmente le retour veineux vers le cœur. Le volume ainsi augmenté induit un débit cardiaque supérieur, et donc une augmentation de la pression sanguine.
- L'angiotensine II stimule la sécrétion d'aldostérone par le cortex surrénalien (ce qui ne fait pas partie de l'autorégulation rénale). L'aldostérone stimule la réabsorption de sodium par le tube contourné distal. Cela entraîne une réabsorption accrue d'eau. L'eau passe dans les capillaires donc dans la circulation sanguine, ce qui contribue à augmenter la pression sanguine. Enfin, l'angiotensine II stimule la sécrétion d'hormone antidiurétique, qui augmente la réabsorption d'eau et d'urée.

* système nerveux sympathique

L'innervation rénale est exclusivement sympathique principalement noradrénergique. Les effets vasoconstricteurs de la noradrénaline entraînent :

- une augmentation des résistances vasculaires rénales
- une diminution du débit sanguin rénal et du débit de filtration glomérulaire

* **Le facteur atrial natriurétique (FAN)**

Le facteur atrial natriurétique est synthétisé et stocké par les myocytes auriculaires sous la forme d'un précurseur. Les effets du FAN sur l'hémodynamique rénale et la filtration glomérulaire sont dissociés :

- augmentation du débit de filtration glomérulaire
- sans augmentation significative du débit sanguin.

Les effets sont dus :

- à une vasodilatation de l'artéiole afférente
- à une vasoconstriction plus modérée de l'artéiole efférente
- entraînant une augmentation de la pression hydrostatique glomérulaire (Pcg)
- à une augmentation du coefficient d'ultrafiltration(Kf) lié à la stimulation de récepteurs spécifiques mésangiaux

Le FAN agit également au niveau de la micro circulation médullaire en augmentation les débits et surtout la pression hydrostatique des vasa recta descendants et ascendants contribuant à son effet natriurétique en plus de l'augmentation de la charge filtrée de Na secondaire à l'augmentation du débit de filtration glomérulaire.

Enfin, cette hormone vasodilatatrice agit également :

- en inhibant la sécrétion de rénine préalablement stimulée
- en supposant aux effets vasoconstricteurs de l'angiotensine II.

NB : Un système de régulation permet à la pression sanguine de ne pas atteindre des valeurs extrêmes. Tout d'abord une autorégulation existe, qui est exercée par l'augmentation de la perfusion rénale et des niveaux élevés d'angiotensine II, qui inhibent la sécrétion de rénine. De plus, le Facteur Atrial Natriurétique (FAN) est sécrété par les cellules des atriums cardiaques lors d'augmentation de la pression sanguine veineuse. Le FAN augmente la production d'urine et l'excrétion de sodium en inhibant la libération d'ADH et de rénine, et par conséquent la sécrétion d'aldostérone par les surrénales. D'autre part, une augmentation de la concentration en angiotensine II provoque la synthèse et la libération d'au moins deux prostaglandines vasodilatrices rénales : la prostaglandine E2 et la prostaglandine I2. Ces deux facteurs permettent de maintenir la résistance vasculaire des vaisseaux rénaux dans des valeurs proches des valeurs usuelles.

L'aldostérone : est produite par le cortex surrénalien. Ses cellules cibles sont les cellules principales du tube collecteur. Elle active la réabsorption de sodium pour maintenir son équilibre. Elle stimule au contraire l'élimination du potassium par sécrétion par les cellules principales. C'est la principale voie d'excrétion du potassium dans l'urine. La réabsorption du sodium entraîne la réabsorption d'eau pour corriger une baisse de volume sanguin.

La libération de l'aldostérone est contrôlée par deux mécanismes. En ce qui concerne la régulation de l'équilibre du potassium, cet ion est capable de stimuler directement la sécrétion d'aldostérone par une augmentation de sa concentration plasmatique. La régulation de la sécrétion de l'aldostérone pour le maintien de l'équilibre du sodium est plus complexe et fait intervenir le Système Rénine-Angiotensine-Aldostérone (SRAA). Lorsqu'une baisse de la concentration en sodium est enregistrée, cela active le système rénine-angiotensine et l'angiotensine II stimule la sécrétion d'aldostérone.

Chapitre III. L'appareil circulatoire

L'appareil cardiovasculaire des vertébrés est un type de système circulatoire en circuit fermé (clos) qui assure le transport du sang du cœur vers les extrémités et les divers organes, et en retour, de ceux-ci vers le cœur par l'intermédiaire des vaisseaux sanguins.

III.1. Anatomie de l'appareil cardiovasculaire

Chez les mammifères le cœur en forme de cône possède quatre cavités (2 oreillettes et 2 ventricules) complètement séparées avec une double circulation (Netter, 2012). Il est enveloppé dans un sac à double paroi (le péricarde). Entre les 2 parois existe un liquide lubrifiant qui permet leur glissement à chaque pulsation du cœur. Le muscle cardiaque est composé de 3 couches :

- Couche externe : appelée aussi péricarde viscéral, c'est **l'épicarde**, cette membrane enveloppe le cœur et la base des gros vaisseaux. Elle est composée de 2 feuillets :

- Le feuillet fibreux (ou péricarde fibreux), le plus externe et le plus épais.
- Le feuillet séreux (ou péricarde séreux), le plus interne.

Ces 2 feuillets délimitent une cavité virtuelle, la cavité péricardique, espace de glissement qui permet le glissement du cœur sur les autres organes lors des mouvements cardiaques.

- Couche intermédiaire : le myocarde est le tissu musculaire du cœur. Composé de cellules appelées cardiomycocytes, sont capables de se contracter spontanément, de manière indépendante et automatique. Le myocarde est considéré comme un muscle strié, alors que son fonctionnement est autonome (c'est d'ailleurs le seul muscle autonome considéré comme un muscle strié).

- Couche interne : composée d'un épithélium de revêtement, c'est **l'endocarde**

*Le cœur possède un autre type de tissu musculaire peu abondant par apport au tissu myocardique, et même, il se diffère de lui du point de vue histologique, c'est le tissu nodal, composé de :

* nœud sinusal (nœud de Keith et Plack) situé au niveau de l'abouchement de la veine cave supérieure

* nœud auriculo-ventriculaire (nœud d'Aschoff Tawara) situé au niveau de la portion postéro-inférieure de la cloison intermédiaire.

* faisceau de Hiss : n'existe que chez les oiseaux et les mammifères, il constitue la seule jonction musculaire entre les oreillettes et les ventricules, car les faisceaux myocardiques des oreillettes et ceux des ventricules sont complètement séparés par des anneaux fibreux.

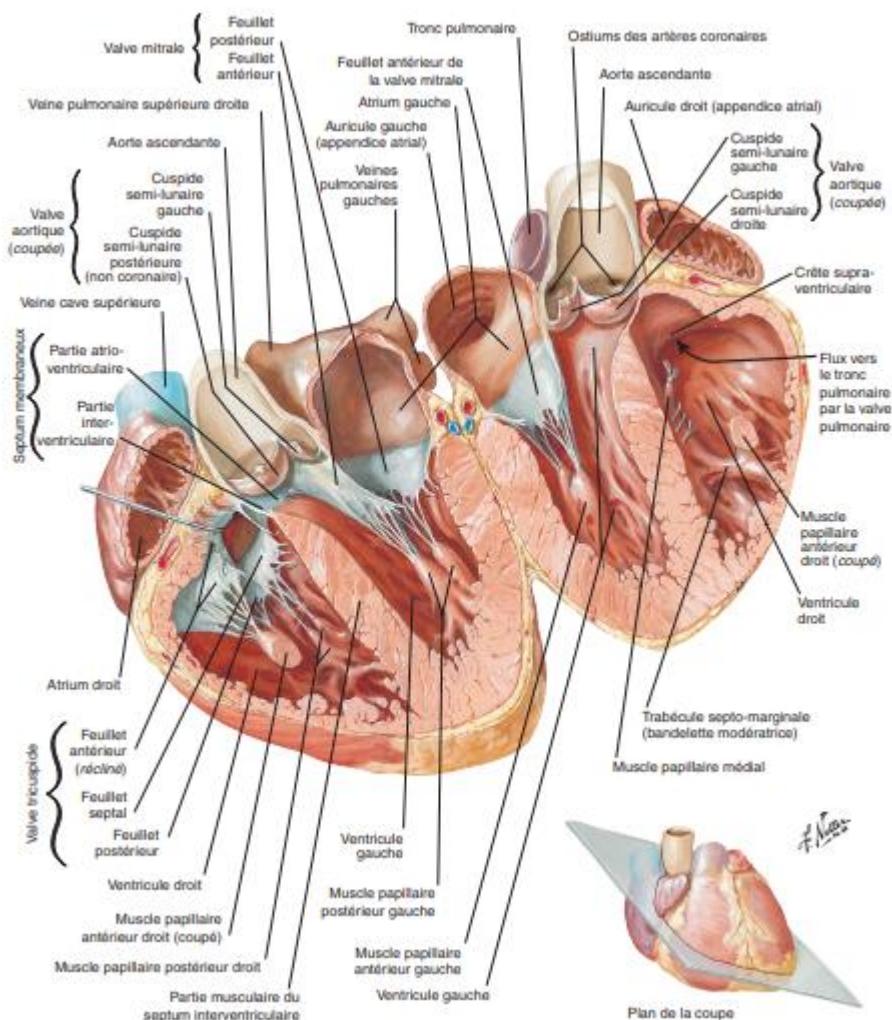


Figure 29: Les pompes cardiaques (Netter, 2012).

III.1.1. Les pompes cardiaques : le cœur est composé de 2 pompes musculaires (droite et gauche) qui fonctionnent de manière synchrone, la puissance de chaque pompe est liée à son épaisseur.

* la pompe droite est branchée avec la petite circulation pulmonaire qui assure les échanges gazeux.

* la pompe gauche branchée à l'aorte, permet le transport et l'échange interne des ressources (notamment les nutriments et l'O₂) vers les cellules de l'organisme ainsi que la collecte des déchets métaboliques (comme le CO₂, l'urée et l'acide urique) qui quittent les cellules.

*Les oreillettes, aussi appelées auricules ou atriums, sont les cavités cardiaques responsables du recueil du sang provenant de l'organisme. Leurs parois sont minces et peu musclées, mais elles possèdent une grande capacité de dilatation. On parle ainsi d'un rôle de pompe «aspirante» : elles recueillent le sang qui arrive au niveau du cœur pour l'expulser en direction des ventricules.

A noter que chaque oreillette n'éjecte du sang que dans le ventricule correspondant : l'oreillette droite communique avec le ventricule droit, et l'oreillette gauche avec le ventricule gauche.

De plus, l'oreillette droite est séparée de l'oreillette gauche par une paroi appelée septum interauriculaire.

*Les ventricules sont les cavités cardiaques responsables de l'expulsion du sang en dehors du cœur. Leurs parois sont épaisses et très musclées. On parle ainsi de pompes « refoulantes»: elles expulsent le sang vers les différents organes de l'organisme. Le ventricule droit est séparé du ventricule gauche par une paroi appelée septum interventriculaire.

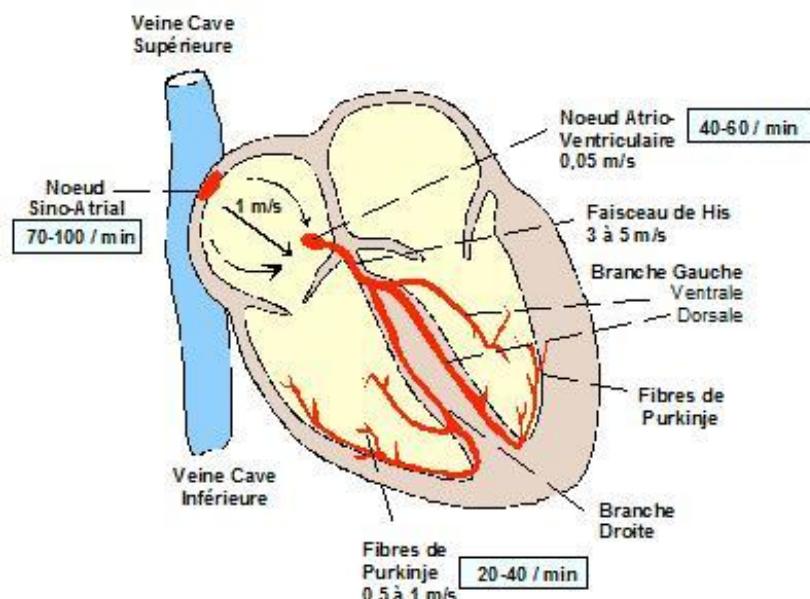


Figure 30: Le tissu nodal (Tanguy, 2011).

III.1.2. Les valvules cardiaques : assurent l'écoulement unidirectionnel dans le cœur, c'est-à-dire des oreillettes vers les ventricules et des ventricules vers l'aorte ou l'artère pulmonaire selon le cas (Netter, 2012).

***Valvules auriculo-ventriculaires :** permettent la communication entre les oreillettes et les ventricules, ils sont au nombre de 2 :

* Valvule tricuspidie : muni de 3 battants, sépare le ventricule de l'oreillette de la pompe droite.

* Valvule bicuspidie : « mitrale » muni de 2 battants, sépare le ventricule de l'oreillette de la pompe gauche

Ces valvules se ferment de bas en haut et s'ouvrent du haut en bas grâce à la différence de pression entre les cavités auriculaires et ventriculaires.

***Valvules sigmoïdes** : séparent les ventricules des gros vaisseaux (aorte et artères pulmonaires), ils sont munis de valves qui s'ouvrent et se ferment sous l'effet de la différence de pression. Ils jouent le rôle d'un « clapet de non-retour ».

III.2. Système circulatoire sanguin

Le système circulatoire sanguin transporte le sang au travers d'un réseau de vaisseaux sanguins constituant le système artériel et le système veineux (Eroschenko, 2008).

*Le système artériel : regroupe les vaisseaux efférents du cœur, à savoir les artères et toutes leurs ramifications. Deux artères sont directement reliées au cœur :

L'aorte, qui avec ces ramifications véhicule le sang oxygéné du ventricule gauche vers tous les organes du corps, Classiquement, elle est divisée en 2 parties : l'aorte thoracique qui irrigue les organes thoraciques et l'aorte abdominale qui irrigue les organes abdominaux

L'artère pulmonaire qui véhicule le sang du ventricule droit vers les poumons à partir desquels le sang chargé d' O_2 retourne vers l'oreillette gauche du cœur via les veines pulmonaires, c'est la circulation pulmonaire « petite circulation ».

*Les artères coronaires : sont des artères permettant de vasculariser, et par conséquent de nourrir le muscle cardiaque (ou myocarde). Elles naissent de l'aorte thoracique ascendante et restent à la surface du cœur où elles cheminent dans les sillons cardiaques.

Donc, à chaque battement du cœur le sang passe du ventricule gauche dans l'aorte puis gagne les organes. Les artères dans chaque organe se ramifient en artéries, qui donnent naissance aux vaisseaux sanguins extrêmement fins appelés « capillaires » où le sang cède son O_2 et reçoit le CO_2 produit par la respiration cellulaire. Les capillaires se confluencent ensuite pour former les veinules qui conduisent aux veines. Ces dernières retournent le sang pauvre en O_2 vers le cœur (oreillette droite), c'est la grande circulation « circulation générale ».

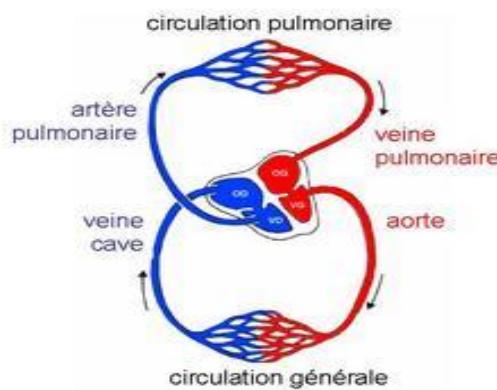


Figure 31: L'appareil circulatoire des mammifères (Frayon, 2012).

*Le système veineux : est constitué de veinules résultant de la convergence des capillaires et des vaisseaux de plus gros calibre, les veines qui ramenant le sang désoxygéné des capillaires au cœur (oreillette droite) ex :

Veines caves antérieure (ramène le sang de la tête, du cou et des membres antérieures) et postérieure (ramène le sang du tronc et des membres postérieures). Il existe 3 exceptions à cette description :

Les veines pulmonaires qui renvoient le sang oxygéné des poumons au cœur, les veines portes qui reçoivent le sang des veines pylorique, gastrique, cystique, mésentérique supérieure et splénique, et enfin les veines ombilicales qui transportent le sang du fœtus vers le placenta.

*Les anastomoses artéio-veineuses : sont des court-circuits reliant directement les artères aux veines, sans passer par les réseaux capillaires.

Les capillaires constituent les zones d'échange alors que les artères et veines assurent un rôle de transport sanguin (Eroschenko, 2008).

III.3. Histologie de l'appareil cardiovasculaire

III.3.1. Les tuniques cardiaques : histologiquement le cœur est entouré d'une enveloppe externe (péricarde) et composé de trois tuniques de l'intérieur à l'extérieur (endocarde, myocarde et epicarde).

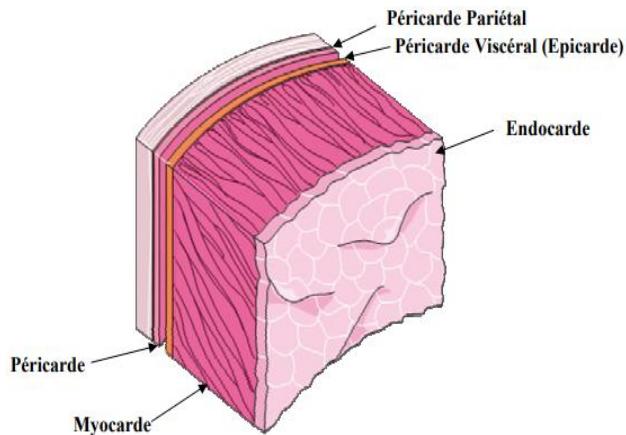


Figure 32 : Les tuniques cardiaques (image Servier Medical Art in Mlih, 2012).

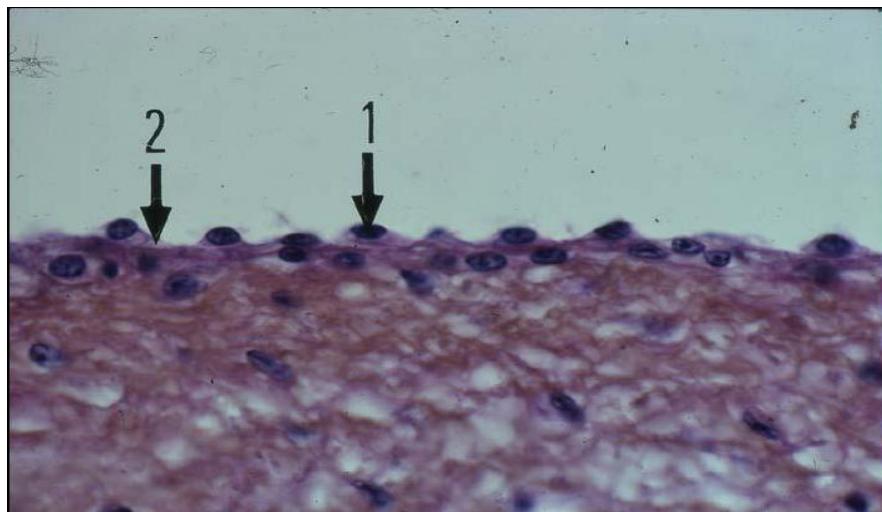
a) L'endocarde

L'endocarde tapisse les cavités cardiaques, les valves et les cordages. Il comporte trois couches :

-**Un endothélium** (cellules endothéliales pavimenteuses d'un aspect caractéristique en forme "d'oeuf sur le plat") en continuité avec celui des gros vaisseaux caves, pulmonaires et aortique, il est associé par l'intermédiaire de sa lame basale à

-**Une couche sous-endothéliale** de tissu fibro-élastique auquel se mêlent des cellules musculaires lisses. Au niveau des cordages et des valves, il tapisse un tissu conjonctif dense, tandis qu'au niveau des cavités il est séparé du myocarde par

-**Une couche sous-endocardique** de tissu conjonctif lâche bien vascularisé renfermant des fibres nerveuses, des vaisseaux sanguins de petit calibre, et dans les ventricules les ramifications du tissu cardionecteur du réseau de Purkinje (système de conduction des impulsions).



Au niveau de l'endocarde d'un cœur de vache, les cellules pavimenteuses de l'endothélium montrent un aspect caractéristique en forme "d'oeuf sur le plat". Les cellules sont moins étirées, ce qui fait que le noyau, en 1, est arrondi et fait progression dans la lumière. En 2, le liseré cytoplasmique reste mince.

Figure 33: Structure histologique de l'endothélium cardiaque (Source : Vincke et al. in <http://webapps.unamur.be/umdb/histohuma/>).

b) Le myocarde

Le myocarde constitue le substratum fondamental de la paroi cardiaque. Il est plus épais où les pressions sont plus fortes (ventricules plus qu'oreillettes et ventricule gauche davantage que ventricule droit). Le myocarde est organisé sous forme de travées myocardiques constituées de cellules musculaires cardiaques anastomosées et solidarisées par leurs extrémités ; entre ces travées, l'environnement conjonctif est riche en capillaires sanguins et en fibres nerveuses. Il existe 3 types de cardiomyocytes :

- A- Les cardiomyocytes contractiles
- B- Les cellules cardionectrices
- C- Les cellules myoendocrines

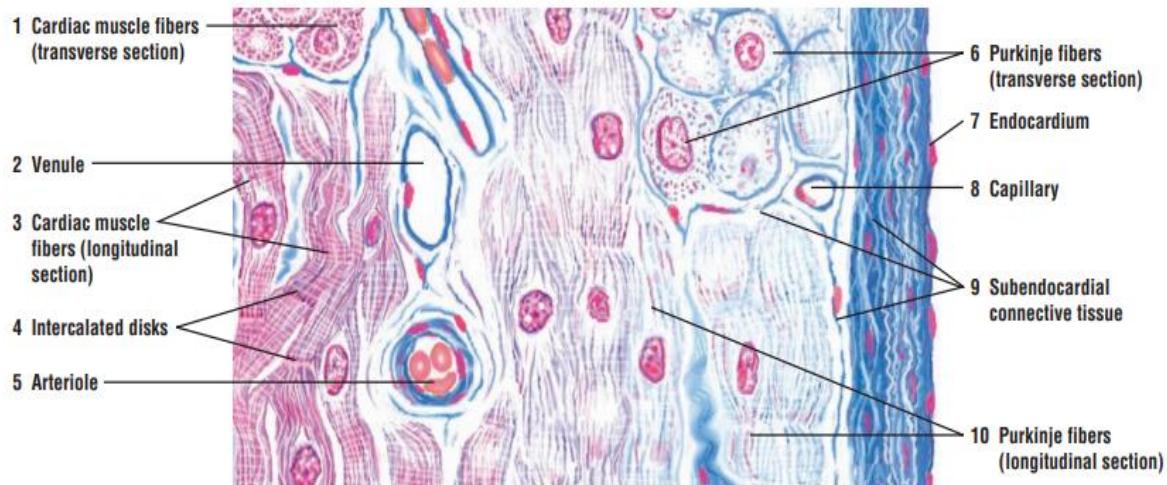


Figure 34: Histologie du myocarde (Eroschenko, 2008).

C) L'épicarde : tapisse l'extérieur du cœur et est en fait le feuillet viscéral de la séreuse péricardique qui se réfléchit ensuite au niveau des gros troncs artériels pour se continuer par le feuillet pariétal (médiastinal) du péricarde. Il est constitué d'un mésothélium reposant par l'intermédiaire de sa lame basale sur une couche sous-mésothéliale conjonctive comportant en particulier des fibres élastiques.

L'épicarde est séparé du myocarde par une couche sous-épicardique où l'on observe une épaisse couche de tissu adipeux, des nerfs et les vaisseaux coronaires (artères et veines coronaires et leurs branches).

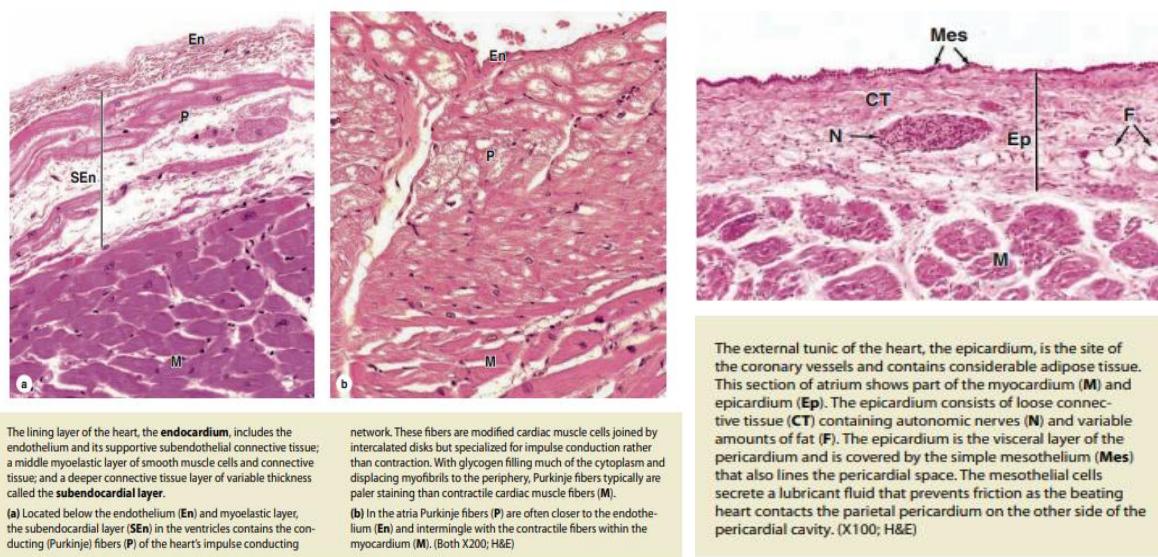


Figure 35: Histologie des tuniques cardiaques (Mescher, 2016).

III.3.2. Les vaisseaux sanguins

III.3.2.1. Les artères

Les artères conduisent le sang du cœur vers les réseaux capillaires. Leur calibre décroît de l'aorte jusqu'aux artéries et leur constitution varie selon ces niveaux. Toutefois, et quel que soit le niveau, on retrouve des structures histologiques de conduction et de conservation de la pression sanguine (fibres et lames élastiques, cellules musculaires lisses organisées en faisceaux circulaires) (Mescher, 2016).

La paroi artérielle comporte de manière concentrique et de dedans en dehors l'intima, la média et l'avventice.

* **L'intima** : constituée par un endothélium associé à une membrane basale puis à une couche sous-endothéliale formée de tissu conjonctif lâche.

* **La média** : faite de couches concentriques de cellules musculaires lisses, de fibres, de lames élastiques et des fibres de réticuline interposés entre les cellules musculaires lisses. La média possède aussi une Limitante Elastique Externe (LEE) qui la sépare de l'avventice.

* **L'avventice** : composée de tissu conjonctif dense (fibres de collagène de type I et des fibres élastiques). Autour de l'avventice existe la périavventice, relie l'artère aux structures qui l'accompagnent.

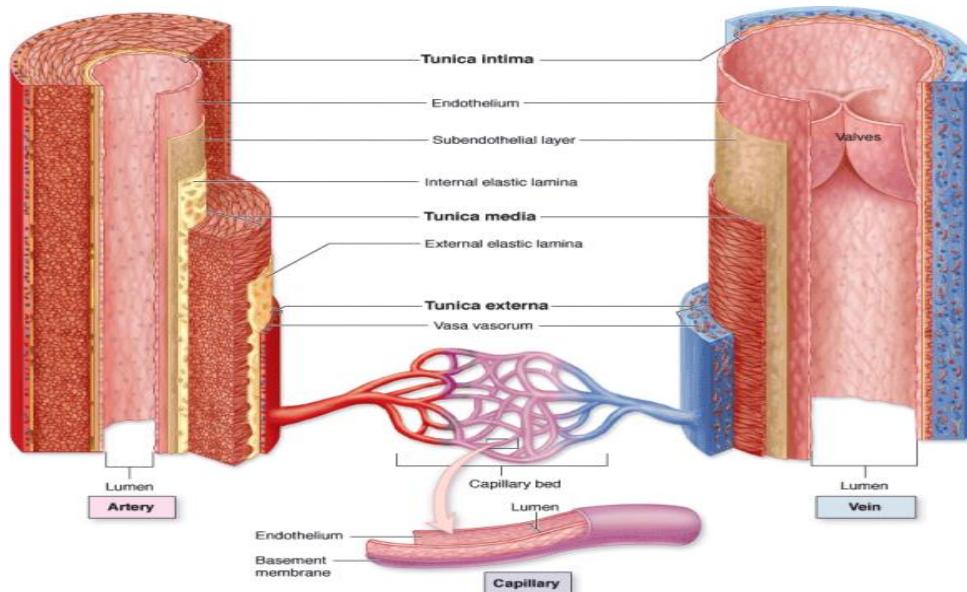


Figure 36: Histologie des vaisseaux sanguins (Mescher, 2016).

La paroi des artères est elle-même vascularisée lorsque cette paroi est relativement épaisse: c'est les vasa vasorum (vaisseaux des vaisseaux) qui siègent principalement dans l'avventice. Au niveau de la périavventice, on trouve des fibres nerveuses motrices qui sont destinées à donner des réponses motrices.

On distingue 3 différents types d'artères suivant leur calibre et leur structure : les artères élastiques (de gros calibre), les artères musculaires (de moyen et de petit calibre) et les artères de transition ou intermédiaires (Eroschenko, 2008). On observe une transition entre les différents types décrits avec une réduction progressive du tissu élastique vers l'aval.

a) Les artères élastiques : sont des vaisseaux de conduction de la pression (aident dans la stabilisation du courant sanguin), ex : (aorte et ses branches)

- L'intima est assez épaisse avec une couche conjonctive sous-endothéliale comportant aussi des cellules musculaires lisses particulières «cellules myointimales» et des histiocytes qui peuvent se charger de matière grasse.

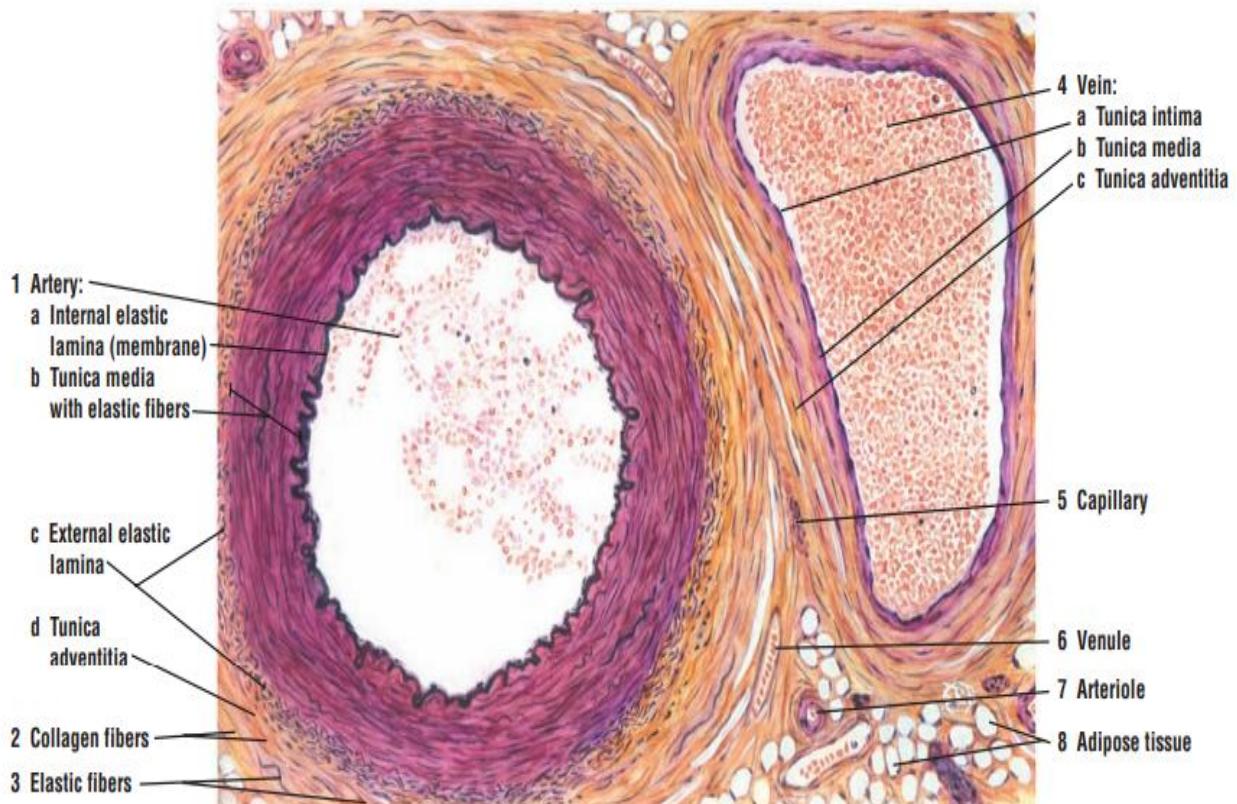
- La média est épaisse et comporte plusieurs dizaines de couches de lames élastiques concentriques anastomosées et fenêtrées associées à des faisceaux de fibres collagènes et élastiques et des cellules musculaires lisses à prolongements bifurqués «cellules rameuses».

- L'avventice, relativement mince, est riche en fibres élastiques et comporte obligatoirement des vasavasorum et des fibres nerveuses.

b) Les artères musculaires

Les artères musculaires de moyen et de petit calibre, sont les ramifications des troncs artériels précédents (par exemple les artères radiales ou fémorales ou tibiales). Ce sont des vaisseaux de distribution (contrôlent l'afflux du sang aux organes). Leur intima est fine et caractérisée par l'existence d'une Limitante Elastique Interne (LEI), c'est une lame élastique habituellement continue plissée dans le sens longitudinal. Leur média plus ou moins épais selon le calibre est constitué d'une couche à orientation circulaire de cellules musculaires lisses enrobées de quelques fibres collagènes et élastiques. Elle est limitée de part et d'autre par la LEI et limitante élastique externe (moins épaisse que l'interne).

L'avventice est épaisse et essentiellement constituée de faisceaux de fibres collagènes où se mêlent des fibres élastiques. Elle est richement innervée, et comporte aussi des vasavasorum surtout lorsque le calibre est important.



Muscular artery and vein (transverse section). Stain: elastic stain. Low magnification.

Figure 37: Coupe transversale (Artère, veine, artéiole, veinule et capillaire) (Eroschenko, 2008).

c) Les artères de transition (Artéries de transition)

Certaines artères ne sont ni purement élastiques ni purement musculaires, ce sont les artères de transition notamment les artères axillaires et le tronc iliaque. La média de ces artères comporte des cellules musculaires lisses disposées en couches concentriques à la lumière et séparées par des fibres conjonctives. Les artéries de transition sont les branches artérielles terminales qui s'ouvrent sur les lits capillaires. Elles sont reconnues d'une part par leur petit calibre (diamètre inférieur à 0,3 millimètre) et d'autre part par leur structure : Leur intima est réduite à l'endothélium reposant sur la lame basale. La LEI est absente dans les artéries de très petit calibre.

L'adventice est fine et constituée de fibres de collagène, parfois de fibres élastiques et fusionne avec le tissu conjonctif environnant. Elle reçoit des afférences neurologiques. Les artéries de transition jouent un rôle fondamental de vasomotricité et participent à la régulation du lit capillaire.

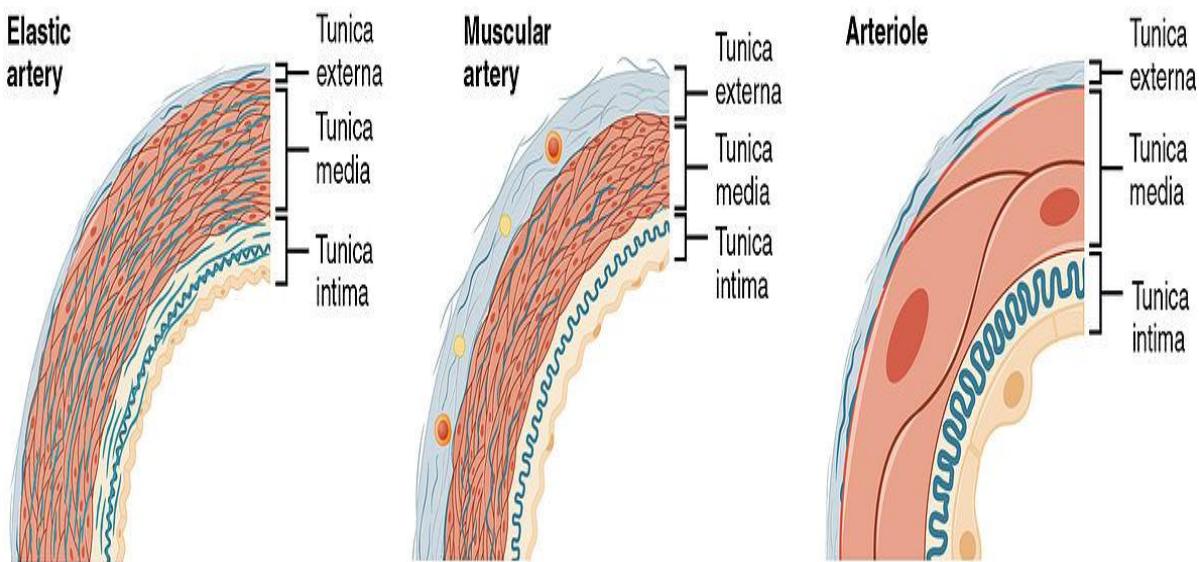


Figure 38: Structure des différents types d'artères (Schatz, 2019).

III.3.2.2. Les veines

Les veines drainent le sang des capillaires vers le cœur. Les veines contiennent des valvules qui imposent le sens de circulation du sang (empêchant son reflux). Les parois des veines sont élastiques (mais bien solides que les artères). Tout comme les artères, les veines sont constituées de trois couches de l'intérieur vers la partie la plus externe, l'intima, la média puis l'aventice (Mescher, 2016).

Les principales différences avec une artère de même calibre sont :

1. La paroi de la veine est plus mince
2. dans la majorité des veines il n'y a pas de LEI ni LEE
3. cellules musculaires lisses à disposition musculaire moindre (paroi moins tonique)
4. L'aventice est la couche la plus épaisse, contient plus de vasavasorum

a) Classification des veines

Il existe deux principales variétés de veines (selon plusieurs critères : morphologique, physiologique) :

***Veines réceptives** : ces veines vont recevoir du sang passivement, le sang va y circuler selon la loi de la pesanteur : c'est des veines supracentrales. Le tonus de la paroi est très faible, la paroi fibreuse soit fibro-élastique alors que la composante musculaire est pauvre.

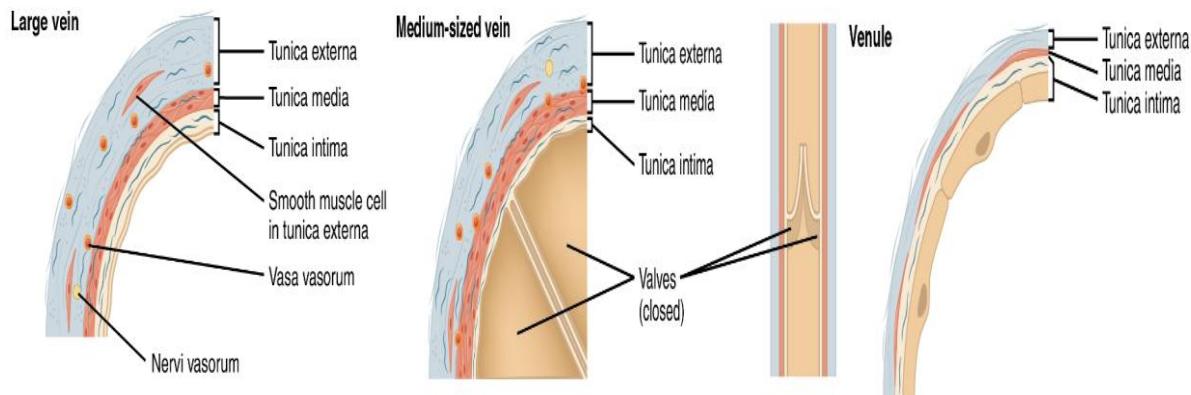
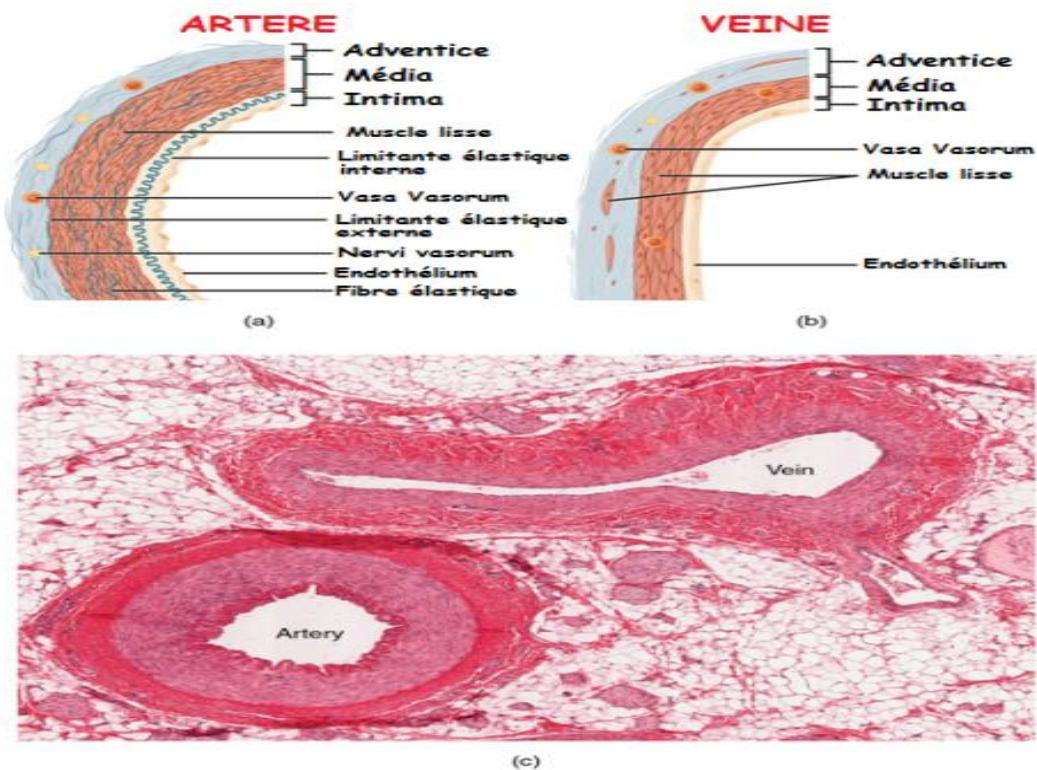


Figure 39: Classification des veines (Schatz, 2019).

***Veines propulsives** : elles ont une topographie sous cardique, caractérisées par une paroi plus épaisse, un tonus plus important, elles ramènent le sang vers le cœur contre la pesanteur. Deux structures vont assurer la propulsion : des cellules musculaires de la media à disposition circulaire et oblique et des valvules : replies de l'intima revêtues par un endothélium, elles ont un rôle antireflux : en s'écartant ou se rapprochant elles régulent la propulsion du sang dans un seul sens.



a) Arteries and (b) veins share the same general features, but the walls of arteries are much thicker because of the higher pressure of the blood that flows through them. (c) A micrograph shows the relative differences in thickness. LM $\times 160$.

Figure 40: différences histologiques entre les artères et les veines (Schatz, 2019).

III.4. Physiologie cardiovasculaire

Un cycle cardiaque commence par une activité électrique (automatisme cardiaque) qui déclenche une activité mécanique et contrôle sa chronologie.

III.4.1. Automatisme cardiaque

L'automatisme cardiaque est la production par le tissu nodal d'une activité électrique répétitive, chaque impulsion électrique (potentiel d'action) entraîne la contraction du cœur. ce sont les cellules du nœud sinusal qui commandent le rythme cardiaque appelé pour cela rythme sinusal. La fréquence de ce rythme est modulé en permanence selon les besoins de l'organisme par la régulation neuro-humorale (accélération sous l'effet du sympathique et des cathécholamines, ralentissement sous l'effet du parasympathique).

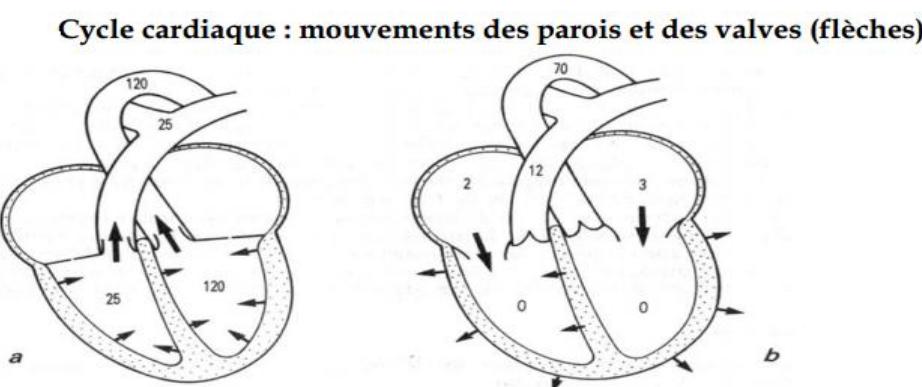
Le rythme naissant dans le nœud sinusal (figure 4) active le myocarde auriculaire puis atteint le nœud auriculo-ventriculaire et le tronc du faisceau de His. Cette activité gagne ensuite les branches droite et gauche du faisceau de His, les cellules de Purkinje et enfin les cellules du myocarde ventriculaire. Le septum inter-ventriculaire est dépolarisé en premier de la gauche vers la droite, puis les ventricules de l'endocarde vers l'épicarde. Cette voie « nodo-hissienne » est la seule voie de passage électrique possible des oreillettes vers le ventricule au travers du squelette fibreux du cœur.

III.4.2. Le cycle cardiaque (ou révolution cardiaque) comprend :

*une phase de contraction du cœur ou systole

*une phase de relâchement ou diastole

L'activité électrique périodique sus-décrise engendre l'activité mécanique du cœur, dominée par la contraction puis la relaxation des ventricules (la contraction des oreillettes n'a qu'une incidence limitée sur la fonction cardiaque normale). La succession d'une systole ventriculaire, d'une diastole ventriculaire et d'une diastole générale forme un cycle cardiaque.



Les chiffres indiquent en mm de mercure les pressions régnant dans les cavités.

Figure 41: Le cycle cardiaque (Gilles, 2006).

III.4.2.1. La phase de contraction « systole ventriculaire »

La contraction des deux ventricules est synchrone et dure environ un tiers de seconde au repos. Son début coïncide avec la fermeture des valves auriculo-ventriculaires suivie de l'ouverture des sigmoïdes aortiques et pulmonaires.

Pendant la systole, les pressions intra-ventriculaires augmentent fortement, ce qui permet l'éjection du sang du ventricule droit vers l'artère pulmonaire et celle du sang du ventricule gauche vers l'aorte.

Les valves auriculo-ventriculaires étant fermées, il n'y a pas de reflux vers les oreillettes.

III.4.2.2. La phase de relâchement « diastole ventriculaire »

Après l'éjection totale du sang, les ventricules se relâchent (relaxation isovolumétrique) et leur pression tombe subitement en-dessous de celle de l'aorte et de l'artère pulmonaire respectivement.

Pendant cette phase, les pressions intraventriculaires deviennent plus faibles que celles des oreillettes. Les valves auriculo-ventriculaires s'ouvrent alors qu'au contraire, les sigmoïdes aortiques et pulmonaires se ferment.

La durée de la diastole est normalement plus longue que la systole, mais se raccourcit lorsque la fréquence cardiaque s'accélère. La diastole est, comme la systole, un phénomène actif et consomme de l'énergie.

En fin de diastole, la contraction des oreillettes (systole auriculaire) contribue au remplissage ventriculaire.

Synthèse du cycle cardiaque : détails des phases successives du cycle et place de la systole atriale.

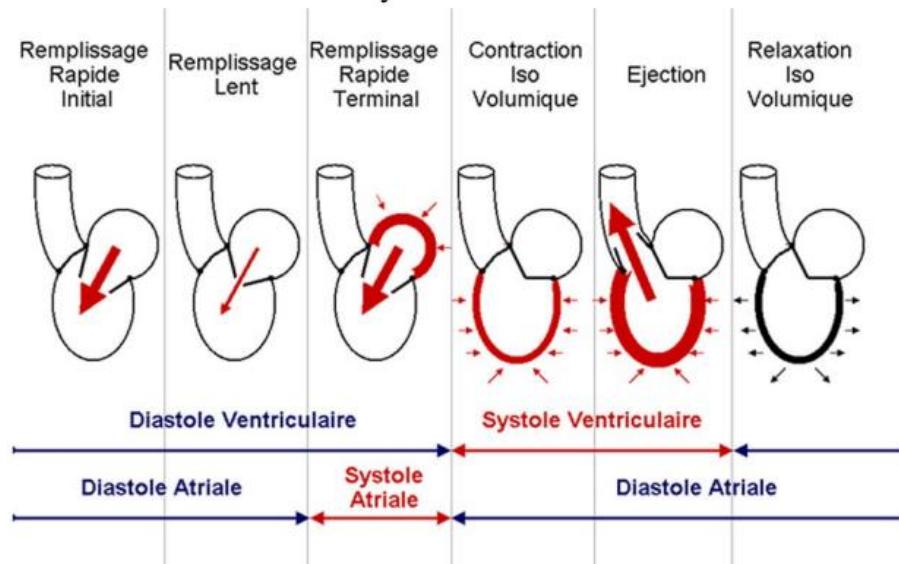


Figure 42: Les phases du cycle cardiaque (Frayon, 2012).

III.4.2.3. Diastole générale

Le cœur se remet au repos et se remplit passivement de sang.

III.4.3. Les bruits cardiaques

Le premier bruit entendu à l'auscultation (B1) (Toum) résulte de la fermeture des valvules auriculo-ventriculaires mitrale et tricuspidale, il indique le début de la systole ventriculaire.

Le 2^{eme} bruit cardiaque plus court (B2) (Ta) résulte de la fermeture des valvules sigmoïdes, il marque la fin de la systole ventriculaire et le commencement de la phase de remplissage, première partie de la diastole.

III.5. L'électrocardiogramme (ECG)

L'électrocardiographie (ECG) est une représentation graphique de l'activité électrique du cœur. Cette activité électrique est liée aux variations de potentiel électrique des cellules spécialisées dans la contraction (myocytes) et des cellules spécialisées dans l'automatisme et la conduction des influx. Elle est recueillie par des électrodes à la surface de la peau (Jacobs, 2016).

L'électrocardiogramme est le tracé papier de l'activité électrique dans le cœur.

L'électrocardiographe est l'appareil permettant de faire un électrocardiogramme.

L'électrocardioscope, ou scope, est un appareil affichant le tracé sur un écran.

A l'ECG, l'onde P témoigne de la dépolarisation des oreillettes. L'espace PR correspond au temps de conduction de l'influx du nœud sinusal au nœud auriculo-ventriculaire. Le complexe QRS témoigne de la dépolarisation ventriculaire. L'onde T correspond à la repolarisation du cœur.

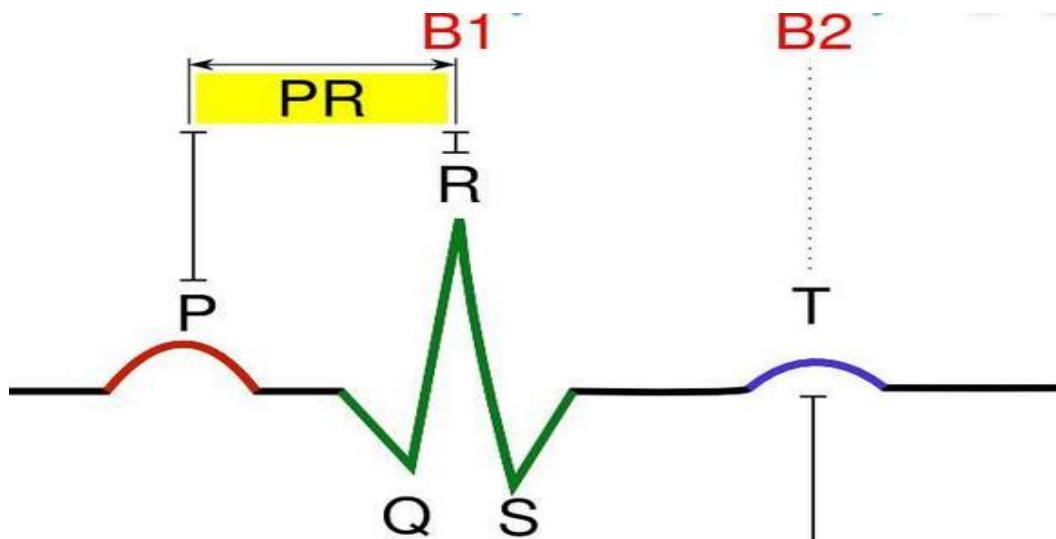


Figure 43: Tracé de l'activité cardiaque (Jacobs, 2016).

III.6. Débit cardiaque : Le débit cardiaque (Qc) est la quantité de sang éjectée par le ventricule en une minute. Normalement le ventricule droit (VDt) et le ventricule gauche (VG) ont le même débit. Au repos le débit cardiaque se situe entre 4 à 5 litres / minute.

III.7. Fréquence et rythme cardiaques : La fréquence cardiaque est le nombre de battements cardiaques (ou pulsations) par unité de temps (généralement la minute). C'est une notion quantitative qui peut aussi se définir en nombre de cycles par seconde, par l'inverse de la période.

Le rythme cardiaque est une notion qualitative qui désigne la manière avec laquelle s'effectue une révolution cardiaque, la manière dont les cycles se succèdent. Le rythme cardiaque est le mécanisme à l'origine de la contraction des ventricules.

III.8. Régulation de l'activité cardiaque

De très nombreux mécanismes neurologiques et / ou humoraux sont nécessaires pour réguler le système cardiovasculaire.

Outre le système nerveux central qui contrôle directement ou indirectement tous les équilibres biologiques, citons :

- Le système nerveux sympathique dont la stimulation augmente la fréquence cardiaque (et donc le débit cardiaque), la contractilité myocardique, et accroît la pression et les résistances artérielles.
- Le système nerveux parasympathique qui a l'effet inverse du sympathique, l'un et l'autre étant en constante opposition afin d'assurer une régulation très précise.
- Le système rénine-angiotensine-aldostérone, dont l'effet complète par voie sanguine l'action des systèmes sympathique et parasympathique, les bradykinines.
- Des régulations locales ou loco-régionales au niveau des organes, notamment par le biais de l'endothélium vasculaire.

Chapitre IV. L'appareil digestif

IV.1. Anatomie de l'appareil digestif

La digestion correspond à l'ensemble des étapes de transformation des aliments en nutriments. Elle s'effectue dans le tube digestif ; la digestion est extracellulaire et elle fait intervenir des forces mécaniques, des actions chimiques (HCl) enzymatiques (amylase, protéase, lipase...) et fermentaires (bactéries). Devenus nutriments (petites molécules solubles), les éléments issus des aliments peuvent être absorbés et l'étude de la suite de leur devenir (assimilation) dans le milieu intérieur, fait l'objet de la nutrition.

La physiologie digestive présente de grandes variabilités interspécifiques, liées à celles des régimes alimentaires. Selon l'origine des aliments (monde animal ou végétal) on classe les animaux en carnivore (aliments essentiellement d'origine animale), en omnivore (aliments d'origine végétale (type grains) et animale), et en végétariens (aliments d'origine végétale).

A ces régimes alimentaires variés correspondent des adaptations anatomiques et physiologiques du tube digestif qui sont essentiellement liées à l'importance de la digestion, le tractus digestif est un tube segmenté par des sphincters et dilaté par des poches. Il peut être vu comme une large surface d'échange appartenant au milieu extérieur et dont sont contrôlés le pH, la température et la phase liquide (eau) pour rendre optimales les activités enzymatiques. Les figures représentent les principaux types de tubes digestifs chez les mammifères et les oiseaux.

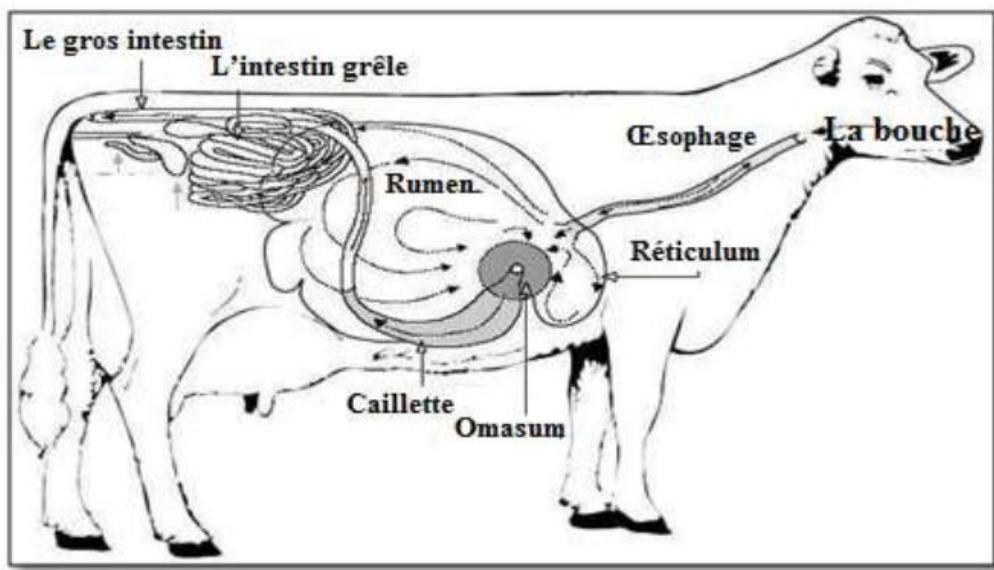


Figure 44: Anatomie de l'appareil digestif bovin (Hall et Silver, 2014).

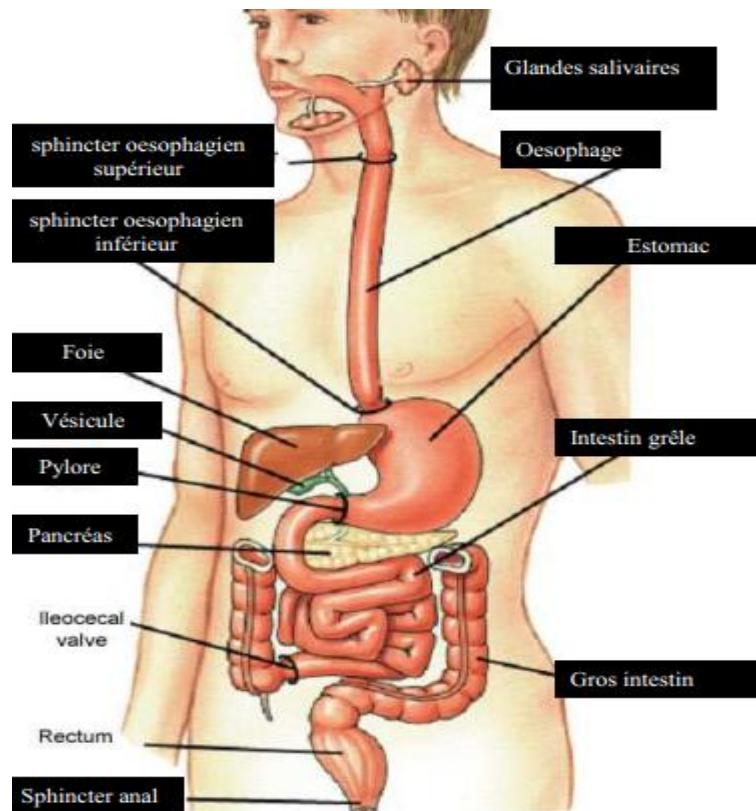


Figure 45: L'appareil digestif humain (Toutain, 2008).

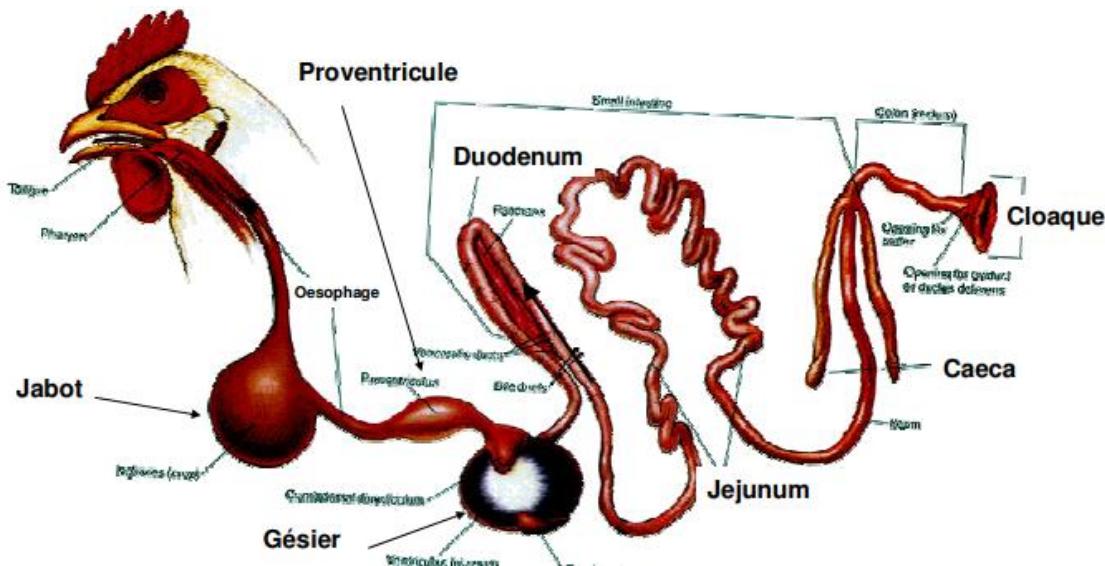


Figure 46: Anatomie de l'appareil digestif des volailles (Toutain, 2008).

IV.1.1. La cavité buccale : assure la préhension des aliments, comprend la langue qui est un muscle recouvert d'une muqueuse sèche, elle a pour rôle de faire avancer les aliments vers le pharynx, et la dentition qui assure un fin broyage des aliments.

Chez les ruminants, la formule dentaire se caractérise par l'absence d'incisives supérieures et de canines ; ce qui donne la formule dentaire suivante pour les bovins adultes : 0/4 I, 0/0 C, 3/3 PM, 3/3M.

La muqueuse tapissant la bouche contient de nombreuses petites glandes, les glandes salivaires, qui sécrètent de la salive.

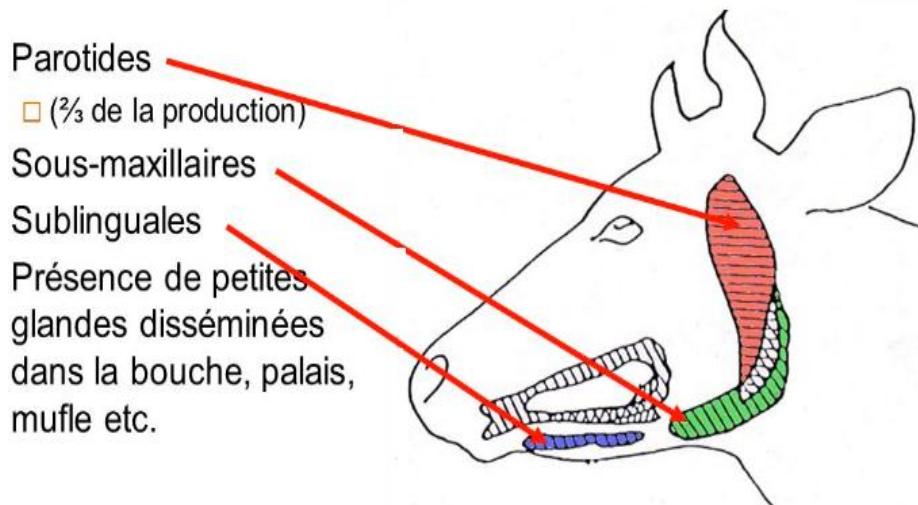


Figure 47: Localisation des glandes salivaires chez un bovin (Toutain, 2008).

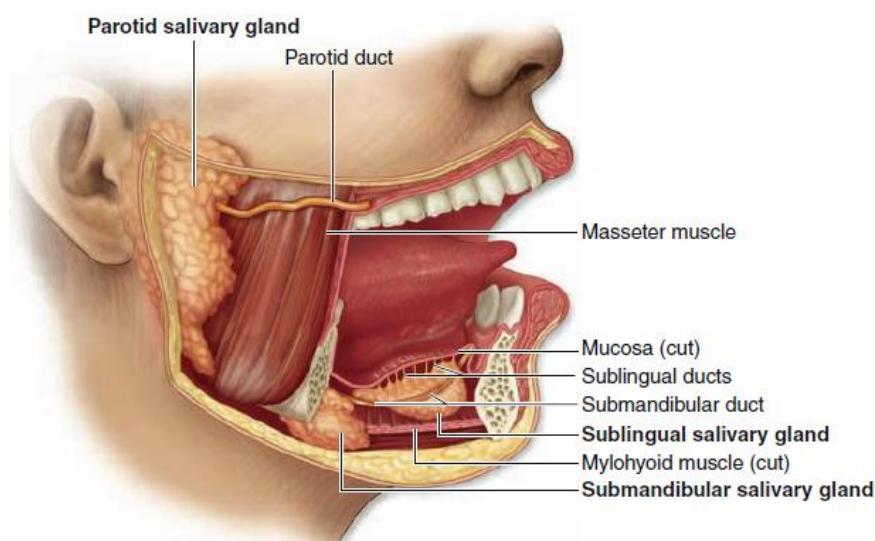


Figure 48: Localisation des glandes salivaires chez l'homme (Mescher, 2016).

La salive est presque uniquement sécrétée par les glandes salivaires qui déversent leur sécrétion dans le vestibule de la cavité buccale par des canaux, ce sont :

-les glandes parotides, (canal de Stensen) : sont les plus volumineuses des glandes appartiennent au type séreux pur sauf chez les carnivores où elle est séreuse et muqueuse. Leur nom est justifié par leur situation caractéristique au voisinage immédiat de la base de l'oreille, occupant la fosse rétro-mandibulaire ou parotidienne.

-les glandes sub-mandibulaires ou sous maxillaires (canaux de Wharton) : situées médialement et caudalement à l'angle de la mâchoire, sur le côté de la région hyoïdienne et du pharynx, elles s'étendent en générale sous la parotide voire jusque sous l'aile de l'atlas. La sous maxillaire une glande conglomérée et mixte à dominance séreuse ou muqueuse selon les espèces. Elle présente de très grandes différences quant à l'aspect et surtout au volume et poids chez les mammifères.

-les glandes sublinguales (canaux de Rivinus) : la sublinguale est la plus petite des glandes salivaires, on lui reconnaît une glande majeure dont les canaux excréteurs confluent sur le conduit unique : le canal de Bartholin et une glande mineure drainée par de multiples conduits : canaux de Rivinus.

IV.1.2. L'œsophage : c'est un conduit musculaire souple situé derrière la trachée. Sa longueur est d'environ 23 cm à 25 cm (homme). Il prend naissance à l'extrémité inférieure du laryngopharynx, traverse le médiastin situé devant la colonne vertébrale, traverse également le diaphragme par une ouverture appelée hiatus œsophagien et se termine dans la partie supérieure de l'estomac. C'est un tube qui assure le transport des aliments et de l'eau jusqu'à l'estomac à une vitesse de 35 à 40 cm/s.

Chez les ruminants, l'œsophage va du pharynx au rumen (panse) en se rétrécissant (1 à 1,5 m de long). Un bovin peut s'étrangler avec un objet arrondi tel qu'une pomme.

IV.1.3. L'estomac : C'est une poche qui assure la digestion mécanique et une partie de la digestion chimique. Elle forme un réservoir de grand volume en comparaison aux autres parties du tube digestif, il présente un contenu plus ou moins pâteux. Il est assez allongé et en forme de virgule.

L'estomac joue un rôle mécanique secondaire dans la digestion, son rôle sécrétoire est très important : en effet, la sécrétion intense et permanente de l'acide chlorhydrique par les cellules pariétales de la muqueuse fundique permet d'atteindre un pH très bas.

L'estomac se divise en quatre régions (Martini et al., 2012) :

- le cardia: entoure l'orifice supérieur de l'estomac
- le fundus: partie arrondie au-dessus et à gauche du cardia
- le corps : grande partie centrale sous le fundus
- et le pylore (pyle : porte ; ourus: garder) : partie inférieure de l'estomac qui se rattache au duodénum; Il comporte deux parties, l'antre py-lorique (antrum : caverne), qui est relié au corps de l'estomac, et le canal pylorique, qui mène au duodénum.

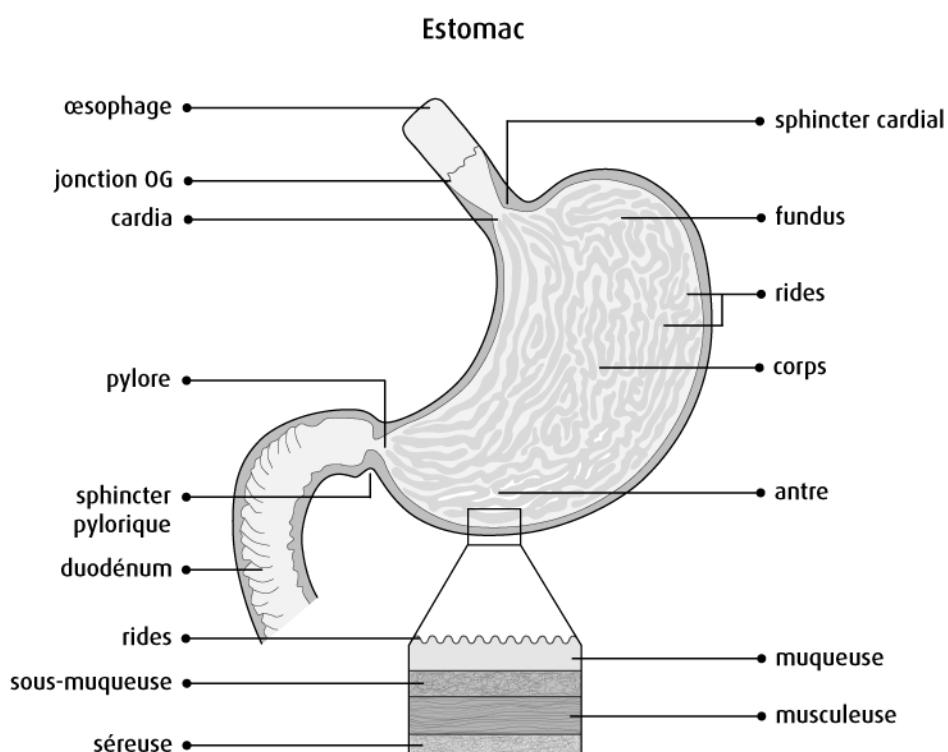


Figure 49: Structure de l'estomac (Martini et al., 2012).

L'estomac des ruminants est composé de quatre poches : la panse, le bonnet, le feuillet (**les pré-estomacs**) et la caillette. Cet ensemble est très volumineux et occupe les 2/3 de la cavité abdominale.

a) **Rumen (panse)** : ce réservoir très volumineux (90% du volume des pré-estomacs) est logé dans la partie gauche de l'abdomen. Il est bilobé et possède deux orifices (figure 50): le cardia raccordé à l'œsophage et le col de la panse qui s'ouvre sur le réseau. Il offre un milieu idéal à la prolifération intense et variée de micro-organismes grâce aux conditions regroupées dans le bio-fermenteur naturel.

b) Réseau (réticulum ou bonnet) : le plus antérieur et le plus petit, doit son nom à sa muqueuse réticulée et parsemée de papilles absorbantes. Le réseau possède une ouverture assez large sur le rumen. Les particules alimentaires qui franchissent l'orifice réticulo-omasal doivent avoir une taille moyenne inférieure ou égale à 1mm ; ils sont donc séquestrés tant qu'ils n'ont pas atteints cette taille minimale. Le réticulum assure la circulation des particules grâce à ses contractions ayant une fréquence de l'ordre d'une contraction par minute. Il assure également la motricité de l'ensemble des réservoirs gastriques et intervient dans la remontée du bol alimentaire lors de la ruminat.

c) Feuillet (Omasum) : organe ovoïde, presque entièrement occupé par des lames parallèles, de hauteurs inégales, disposées dans le sens du transit alimentaire (figure 50). Le feuillet communique en aval avec la caillette par un orifice large et dilatable. Il intervient dans la filtration et l'absorption importante de l'eau.

d) La caillette (Abomasum) : c'est le seul réservoir sécrétoire de l'estomac des ruminants .Sa cavité est tapissée par une muqueuse glandulaire, analogue à celle des monogastriques toujours recouverte d'une couche de mucus (figure 50). C'est à ce niveau qu'à lieu la sécrétion de l'HCl et du pepsinogène. La caillette est l'organe dans lequel s'effectue la digestion des protéines ayant échappé à la fermentation ruminale ainsi que la majorité des lipides.

Système digestif des ruminants

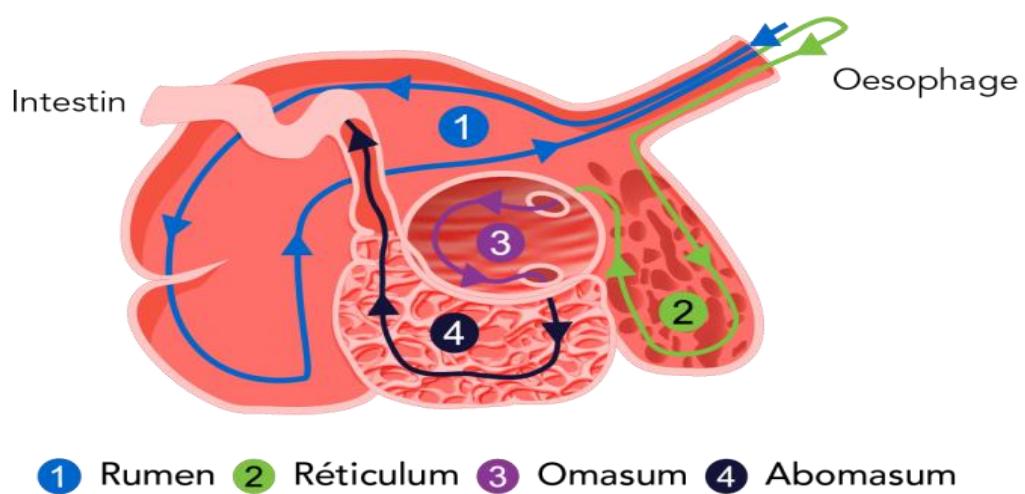


Figure 50: Réservoirs gastriques chez les ruminants (Source: Anonyme 4).

©2021 Parlons sciences

IV.1.4. L'intestin : L'intestin est très long (de 3,5 à 45 m selon les espèces animales soit 11 à 18 fois la longueur du corps). Le gros intestin est très développé

IV.1.4.1. L'intestin grêle : Il est divisé en trois segments : le duodénum, le jéjunum et l'iléon ; et il possède un contenu liquide. Chez les bovins, il est très long (de 40 à 45 m /70 L).

*Le duodénum a une longueur de 40 cm environ chez le lapin et de 0,6 à 1,2 m chez un bovin, il s'abouche par sa partie crâniale au pylore. Il enserre le pancréas très diffus. Il reçoit aussi les sels biliaires qui facilitent la digestion des lipides et de l'amidon.

*Le jéjunum puis l'iléon font suite au duodénum. L'iléon est court (15 à 20 cm), et est encadré par le caecum et la partie initiale du côlon.

IV.1.4.2. Le gros intestin : comprend le cæcum, le colon sigmoïde, le colon spiral, le colon flottant et le rectum. Sa longueur est de 10 m chez un bovin adulte, avec un diamètre de 5 à 12 cm, c'est un lieu d'absorption massive de l'eau.

***Le cæcum :** est un gros diverticule replié entre l'intestin grêle et le côlon, et aux fonctions relativement importantes. Sa position en cul-de-sac et la richesse de sa flore microbienne, il est en effet le siège de fermentations microbiennes qui transforment les éléments non digérés dans l'intestin grêle, en substances utilisables par l'animal : protéines, vitamines, acides gras volatils qui seront absorbés par la paroi digestive.

Le cæcum est un milieu particulièrement favorable au développement des micro-organismes, en raison de son pH peu variable, sa température élevée, sa richesse en eau et en éléments nutritifs provenant d'une digestion incomplète. Le contenu caecal est donc composé pour moitié de particules alimentaires de taille variable (la cellulose, la lignine et tous les autres composés végétaux non attaqués par les enzymes intestinales) qui n'ont pas été dégradées dans les portions antérieures du tube digestif, et pour l'autre moitié de bactéries - avec une prédominance de la flore anaérobiose stricte (Bactéroïdes), 103 colibacilles/g et 104 clostridies/g de contenu caecal - qui se développent aux dépens de ces particules.

Par ailleurs, le cæcum est le siège d'une réabsorption d'eau. En effet, le contenu caecal a une teneur en matière sèche de 20 - 22% contre une teneur en matière sèche de 7% pour le contenu intestinal.

I.1.4.3. Le côlon : 1,2 à 2 m de long pour un diamètre de 7 à 10 mm (lapin), et se divise en deux parties : le côlon proximal et le côlon distal séparés par le fusus coli, segment de 2 à 3 cm de long, à la paroi épaisse.

Le contenu colique est identique à celui du caecum, mais il s'épaissit en gagnant la partie distale. S'y poursuivent la digestion et l'absorption. Le colon enfin réabsorbe l'eau et stocke les excréments qui seront expulsés par l'anus.

I.1.4.4. Le rectum : l'excrétion fécale se fait au niveau du rectum par l'intermédiaire de mécanorécepteurs.

Les ruminants sont des mammifères ongulés qui régurgitent et mastiquent plusieurs fois leur nourriture après l'avoir avalée. Parmi les herbivores, ils sont les plus performants pour tirer profit de l'énergie fixée par les végétaux grâce à une communauté microbienne extrêmement abondante et diversifiée qu'ils hébergent dans leur rumen.

Outre leur façon particulière de ruminer, ce qui caractérise les ruminants, c'est une organisation très particulière de l'estomac, avec en particulier un développement très important des pré-estomacs, qui n'existent pas chez les autres mammifères, et qui se situent avant la caillette. Cette dernière a la même structure et les mêmes fonctions que l'estomac des autres espèces.

I.1.5. Glandes annexes au tube digestif

-Le foie : Le foie est « découpé » en deux ou plusieurs lobes selon les espèces animales. Il est situé contre la face abdominale du diaphragme qu'il recouvre entièrement. La vésicule biliaire est insérée profondément sous le foie.

Le canal cholédoque se forme par la jonction du conduit cystique et du conduit hépatique gauche. Il débouche dans la partie crâniale du duodénum à un centimètre à peine du pylore.

Le foie, outre son rôle de producteur de sels biliaires, stocke des réserves (lipides et glycogène), détoxifie certaines substances (en particulier les médicaments) et intervient dans de nombreuses réactions métaboliques.

-Le pancréas : le pancréas en forme de feuille, c'est est un organe situé derrière le péritoine pariétal postérieur et s'étendant transversalement depuis le cadre duodénal jusqu'au hile splénique. Il comprend une tête, un corps et une queue.

Le pancréas est disséminé en de nombreux petits lobules isolés, difficiles à discerner du tissu graisseux auquel ils sont souvent mêlés, dans presque toute l'étendue du mésoduodénum qui est ample et flottant. Il est composé de deux types de tissus différents : les îlots de Langerhans pour la fonction endocrine et qui produisent des hormones (insuline, glucagon) qui régulent le taux de glucose dans le sang et les acini séreux pour la fonction exocrine en produisant des sucs pancréatiques capables de digérer des lipides (en concordance avec les sels biliaires), des protéines et de l'amidon.

Le conduit pancréatique accessoire est l'unique conduit excréteur. Il débouche au niveau du duodénum ascendant, à 30 ou 40 cm du pylore.

IV.2. Histologie de l'appareil digestif

L'histologie de l'appareil digestif peut être schématiquement étudiée en 2 parties :

- la cavité bucco-pharyngienne : dents, langue et glandes salivaires ;
- le tube digestif : œsophage, pré-estomac, estomac, intestin grêle, côlon, rectum et canal anal

IV.2.1. Structure générale de la paroi digestive

Le tractus gastro-intestinal possède une structure caractéristique, c'est un tube creux avec une lumière de diamètre variable et entouré par une paroi formée de quatre couches principales (Mescher, 2016) :

- 1. La muqueuse** : comporte un épithélium de revêtement et un tissu conjonctif sous-jacent portant le nom de chorion. Le chorion contient du tissu lymphoïde diffus et des follicules lymphoïdes. Il peut renfermer dans certaines localisations des glandes. Il est riche en vaisseaux ayant un rôle nutritif pour ces glandes ou bien un rôle de récupération des nutriments liés à la fonction d'absorption.
- 2. La musculaire-muqueuse** : est constituée d'une mince couche de tissu musculaire lisse ; elle est absente aux extrémités du tube (1/3 supérieur de l'œsophage et canal anal).
- 3. La sous muqueuse** : est constituée de tissu conjonctif et contient le plexus nerveux de Meissner (ou « plexus sous-muqueux de Meissner ») ainsi que des vaisseaux sanguins et lymphatiques pour la muqueuse.
- 4. La muscleuse** : formé de 2 couches de tissu musculaire lisse : circulaire interne et longitudinale externe. Entre ces deux couches se situe le plexus nerveux d'Auerbach
- 5. La séreuse** : la tunique externe comporte un tissu conjonctif tapissé par un épithélium simple (mésothélium).

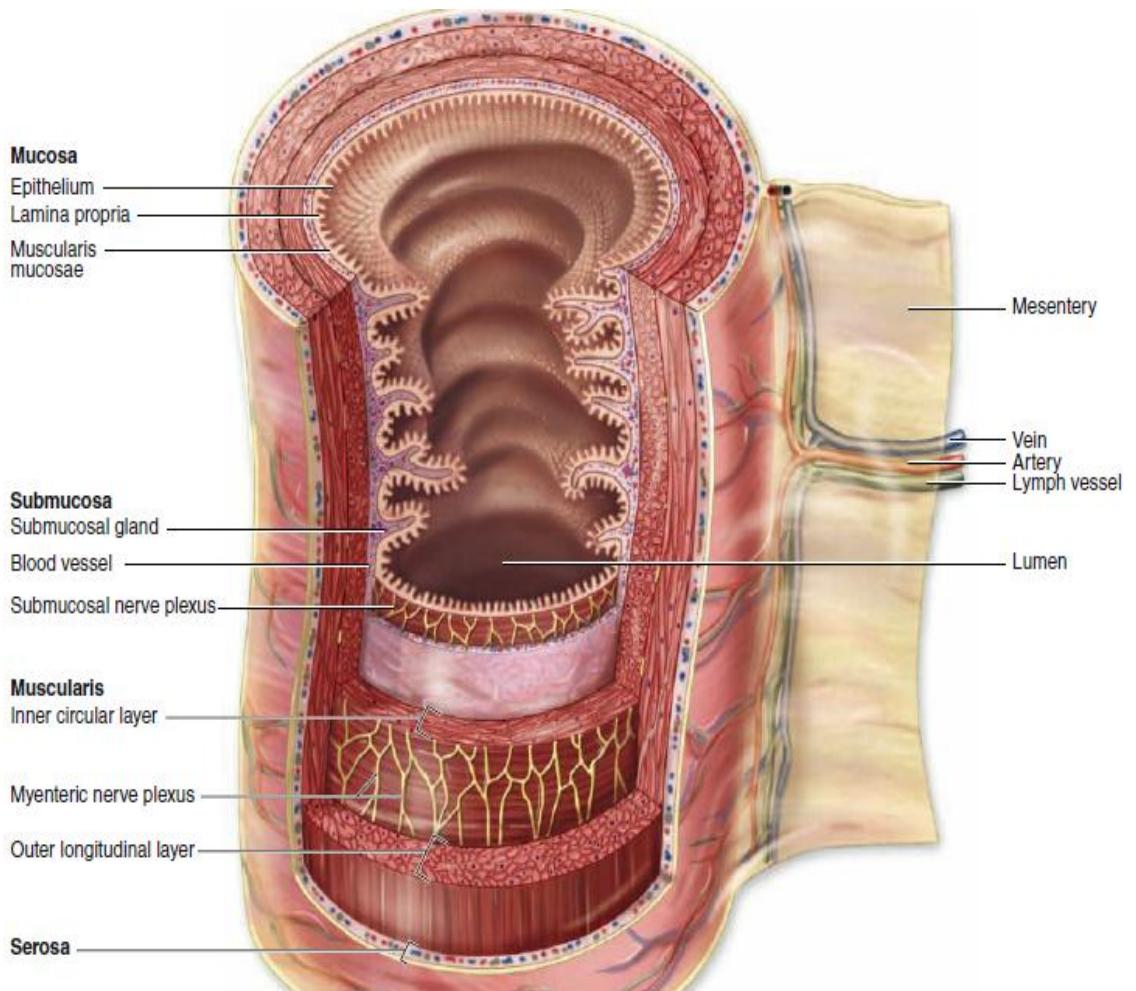


Figure 51: Structure générale de la paroi digestive (Mescher, 2016).

IV.2.2. La cavité bucco-pharyngienne

La cavité buccale est tapissée par une tunique muqueuse dont l'épithélium est malpighien (pavimenteux stratifié non kératinisé). Elle est limitée en avant par les lèvres et les arcades dentaires.

IV.2.2.1. Les dents

Toutes les dents ont la même structure de base, avec une couronne faisant saillie hors de la gencive, et une ou plusieurs racines. A la jonction de la couronne et de la racine se situe le collet de la dent.

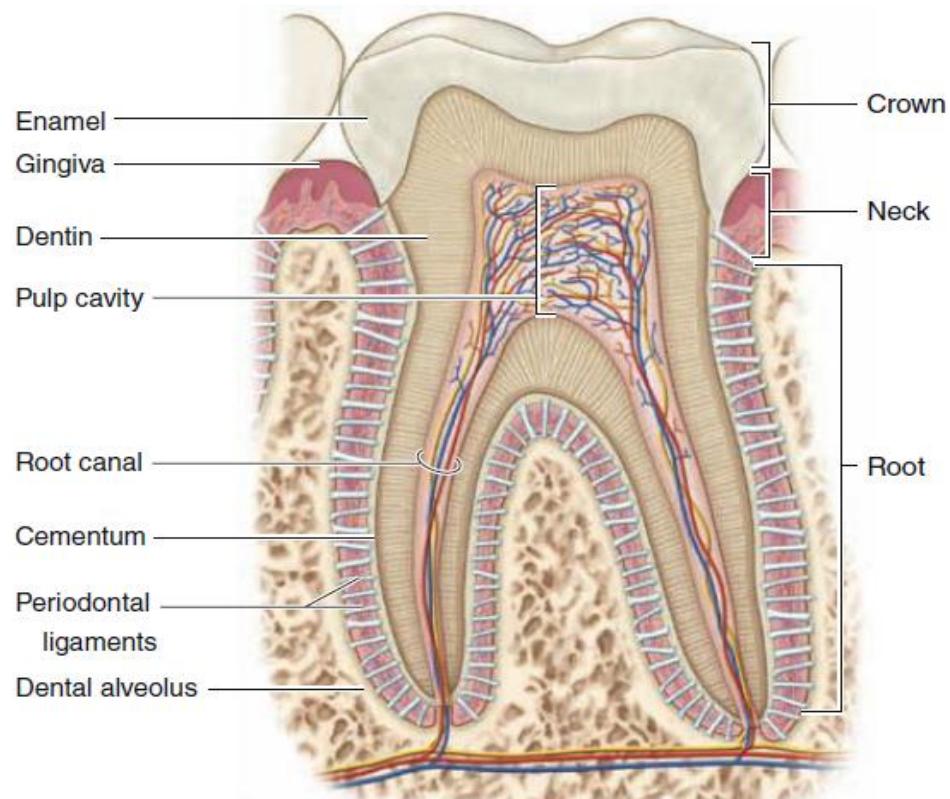


Figure 52: Structure de la dent (Mescher, 2016).

De l'intérieur vers l'extérieur, chaque dent comporte 4 types de tissus : la pulpe dentaire, la dentine, l'émail et le cément (Eroschenko, 2008).

***La pulpe dentaire** : est un tissu conjonctif lâche contenant des vaisseaux sanguins et des nerfs. Elle est limitée en périphérie par une couche de cellules sécrétant la dentine (ivoire), ce sont les odontoblastes.

***La dentine** : (ou ivoire) entoure la pulpe dentaire. C'est une matrice extra-cellulaire (substance fondamentale) produite par les odontoblastes puis calcifiée (cristaux d'hydroxyapatite).

***L'émail** : La périphérie de la dent est faite d'émail au niveau de la couronne et de cément au niveau des racines. L'émail contient près de 99 % de sels minéraux avec moins de 1 % de matrice organique

* **Le cément** : recouvre la racine de la dent. Il ressemble au tissu osseux. Il est fait de cellules (les cémentocytes), qui se disposent dans des lacunes et leurs prolongements dans des canalicules, et de matrice extra-cellulaire (collagène de type I, glycoprotéines et protéoglycane) minéralisée.

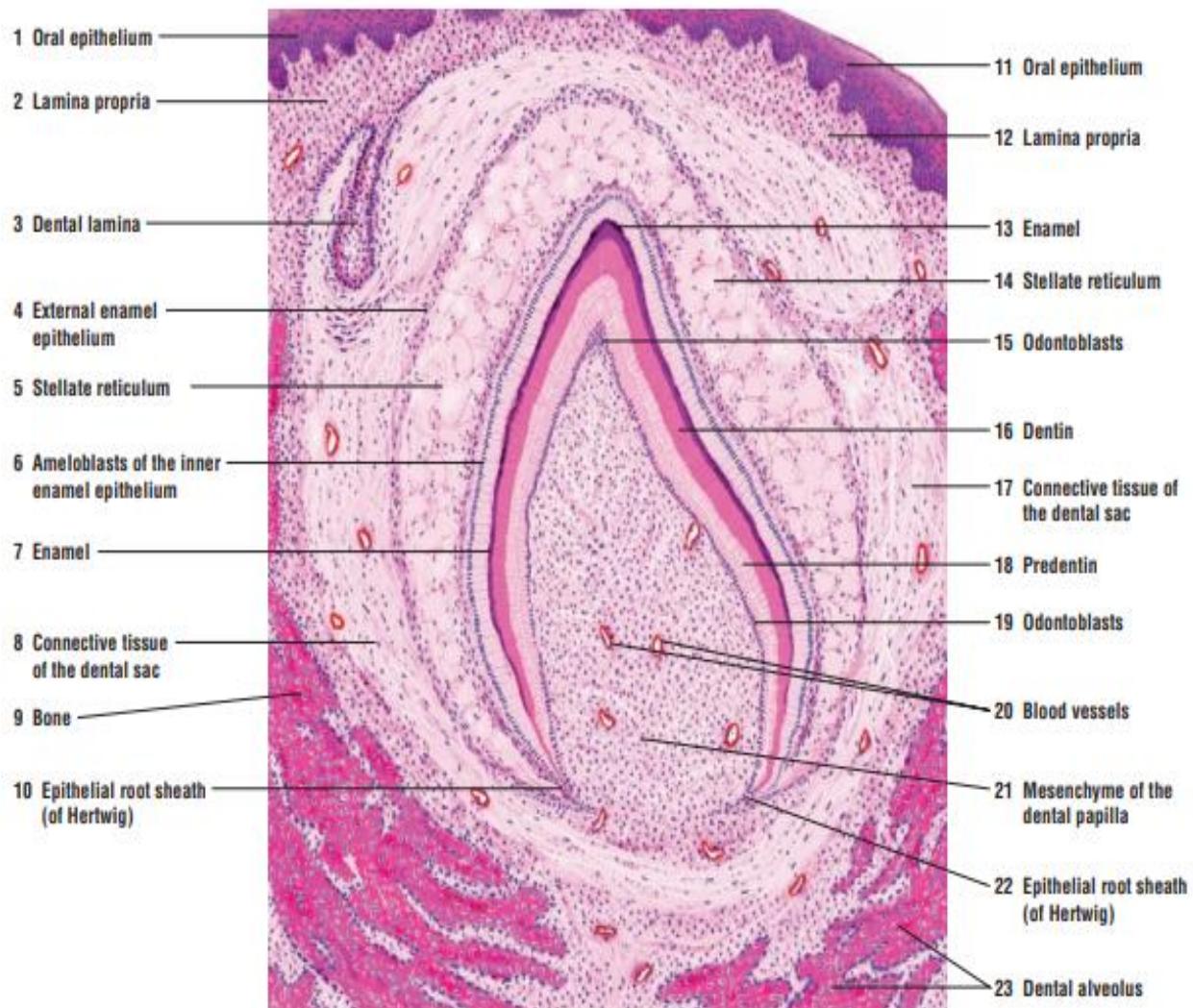


Figure 53: Le tissu dentaire (Eroschenko, 2008).

IV.2.1.2. La Langue

La muqueuse linguale comporte un épithélium malpighien non-kératinisé associé à un chorion sous-jacent. Elle se caractérise surtout par la présence à sa surface des papilles linguales filiformes, fungiformes et caliciformes. Ces deux dernières contenant les bourgeons du goût. Sous la muqueuse, les faisceaux musculaires striés squelettiques sont disposés perpendiculairement les uns aux autres. Ils sont intriqués avec de nombreux lobules glandulaires salivaires séreux et muqueux (Eroschenko, 2008).

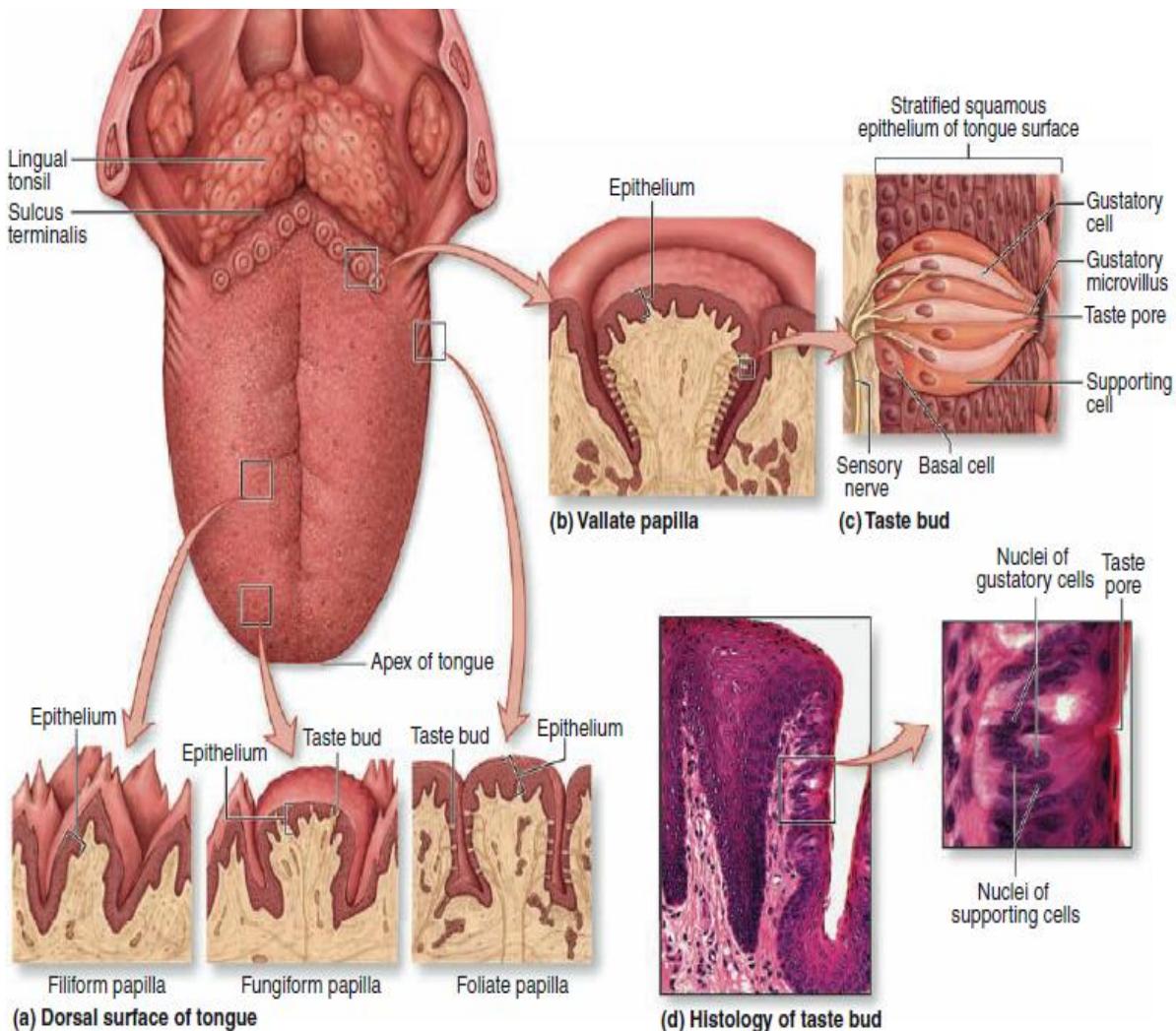
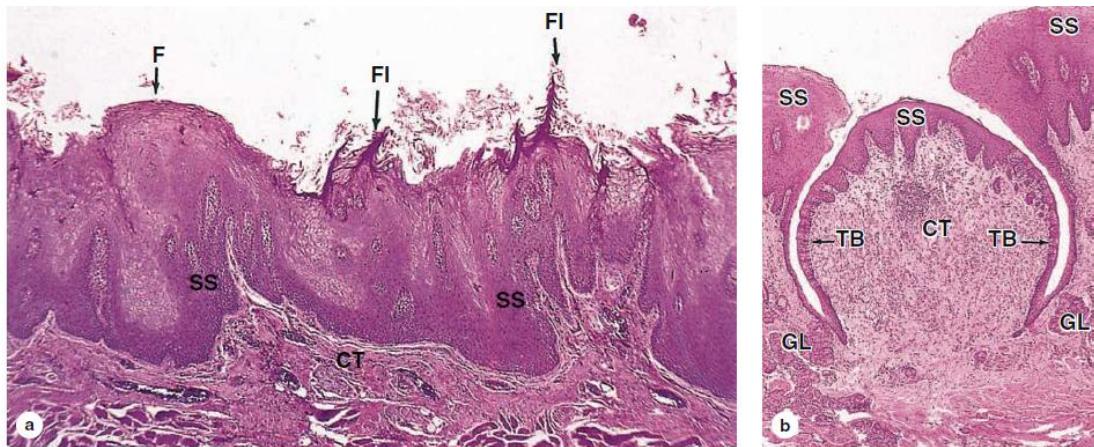


Figure 54: Structure de la langue (Mescher, 2016).

On décrit trois types différents de papilles linguales selon leur structure morphologique : les papilles filiformes, fungiformes et caliciformes :

- 1. les papilles filiformes** sont les plus nombreuses, elles sont dépourvues de bourgeons du goût et sont formées de la simple surélévation de l'épithélium lingual par un axe conjonctivo-vasculaire (ce sont des papilles coniques très kératinisés).
- 2. les papilles fongiformes** sont plus volumineuses, moins nombreuses et peuvent contenir des bourgeons du goût situés au niveau de leur partie superficielle.
- 3. les papilles caliciformes** sont peu nombreuses (une dizaine environ) exclusivement localisées au niveau du V lingual, limitées par un sillon circulaire nommé vallum, les bourgeons du goût étant situés au niveau des faces latérales de la papille dans le sillon.



(a) Section of the dorsal surface of tongue showing both filiform (FI) and fungiform papillae (F). Both types are elevations of the connective tissue (CT) covered by stratified squamous epithelium (SS), but the filiform type is pointed and heavily keratinized while the fungiform type is mushroom-shaped, lightly keratinized, and has a few taste buds.

(b) Micrograph shows a single very large vallate papilla with two distinctive features: many taste buds (TB) around the sides and several small salivary glands (GL) emptying into the cleft or moat formed by the elevated mucosa surrounding the papilla. These glands continuously flush the cleft, renewing the fluid in contact with the taste buds. (Both X20; H&E)

Figure 55: Les papilles linguales (Mescher, 2016).

IV.2.1.3. Les glandes salivaires

Les glandes salivaires sont constituées d'un tissu de type acineux composé dans les parotides, tubo- acineux composé dans les autres glandes. Des petits tubes collecteurs appelés canaux intercalaires formés d'un épithélium monostratifié aplati recueillent la salive des acini; ils confluent pour former des canaux intra lobulaires souvent striés qui deviennent des canaux inter lobulaires dans les cloisons conjonctive. Le tissu glandulaire est composé de cellules muqueuses qui élaborent du mucus et cellules séreuses qui synthétisent et excrètent un liquide filant riche en amylase (Reece et al., 2015).

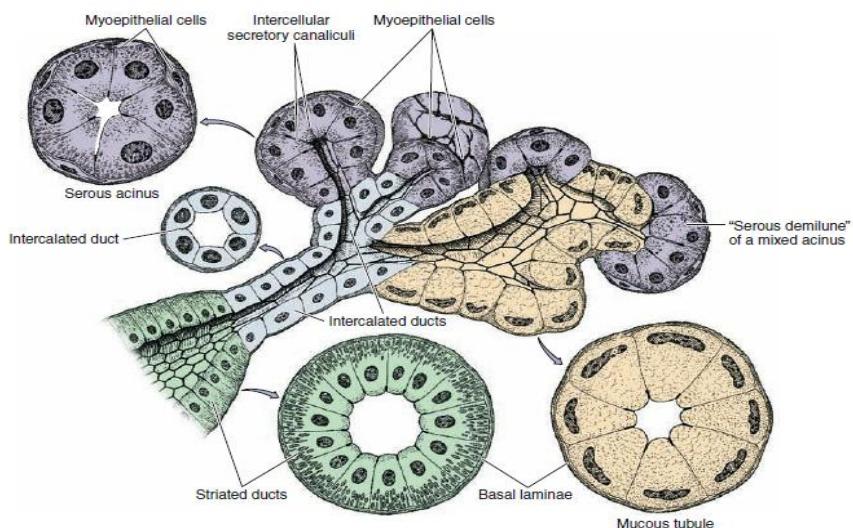


Figure 56: Le tissu glandulaire salivaire (Mescher, 2016).

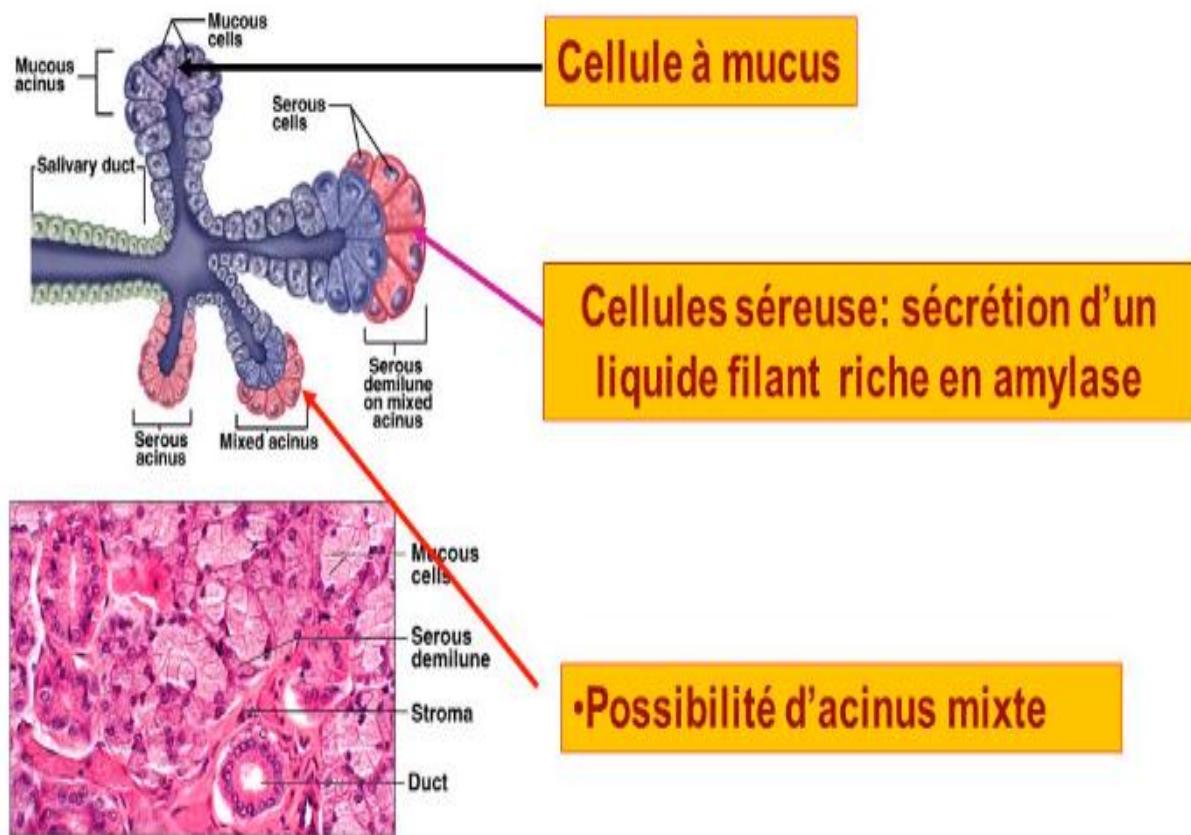


Figure 57: Histologie des glandes salivaires (Toutain, 2008).

IV.2.1.3.1. Histologie de la glande parotide

La parotide est la glande salivaire la plus volumineuse, sa sécrétion est déversée dans la bouche par un canal long : le conduit parotidien ou canal de Stenon. Elle possède des canaux excréteurs, sécréteurs et intercalaires qui produisent au-dehors la sécrétion des acini séreux.

Histologiquement, la glande parotide est entourée par une capsule conjonctive qui forme à l'intérieur, des cloisons délimitant des lobules. L'acinus est formé de cellules pyramidales. Il y a entre les cellules sécrétrices et la basale des cellules myoépithéliales. Les canaux excréteurs sont constitués par un court canal intercalaire formé par un épithélium cubique bas qui continue l'acinus et se prolonge par un canal intra lobulaire formé par un épithélium cubique ou prismatique. Les canaux inter lobulaires se trouvent dans les cloisons, sont formés par un épithélium cubique haut et convergent vers un canal parotidien excréteur (Eroschenko, 2008 ; Mansour, 2015).

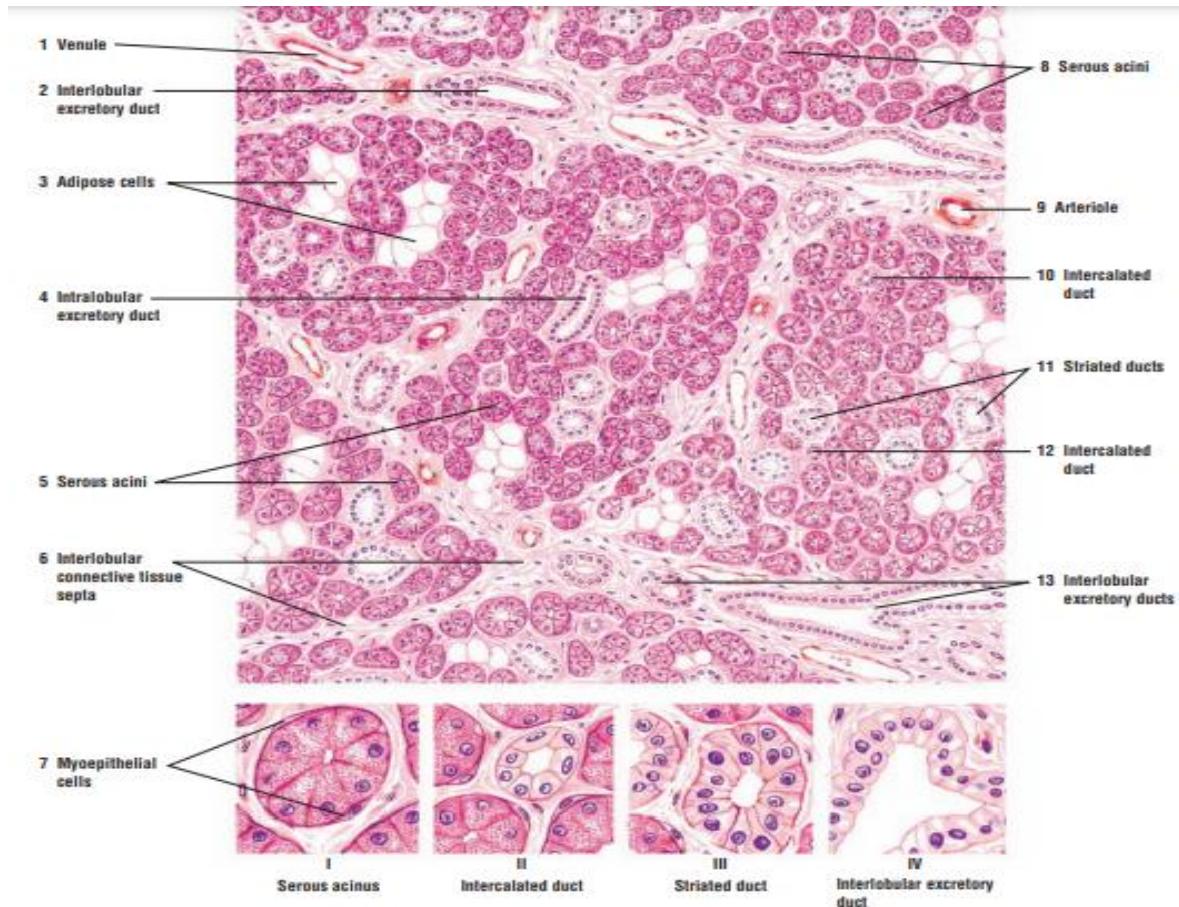


Figure 58: Histologie de la glande parotide (Eroschenko, 2008).

IV.2.1.3.2. La glande sous maxillaire ou mandibulaire

La glande est de texture lobulaire mais peut être plus lâche que celle de la parotide chez les équidés et les ruminants et au contraire plus serrée chez les carnivores et le lapin. Son conduit est le canal de Wharton qui s'ouvre dans le plancher de la bouche. La glande est formée de lobules délimités par des travées de tissu conjonctif.

Dans le tissu conjonctif lâche inter lobulaire se trouvent des canaux collecteurs plus grands, des vaisseaux sanguins et lymphatiques et des fibres nerveuses végétatives. Le TC inter lobulaire fibreux se poursuit par un tissu conjonctif intra lobulaire réticulaire. Comme dans la parotide, il y a dans la sous maxillaire des canaux excréteurs sécrétoires et intercalaires mais les derniers sont courts et difficile à trouver. Les unités sécrétoires terminales sont soit des acini séreux soit des tubules muqueux à coiffes terminales séreuses évoquant un croissant ou une demi-lune en coupe histologique croissants de Gianuzzi ou de Von Ebner. Les cellules des acini sont acidophiles comme celles de la parotide, leur noyaux ronds sont situés au pôle basal. Les cellules purement muqueuses des tubules muqueux se distinguent des cellules séreuses par leur faible coloration, leurs noyaux denses aplatis sont en disposition basale ou basolatérale.

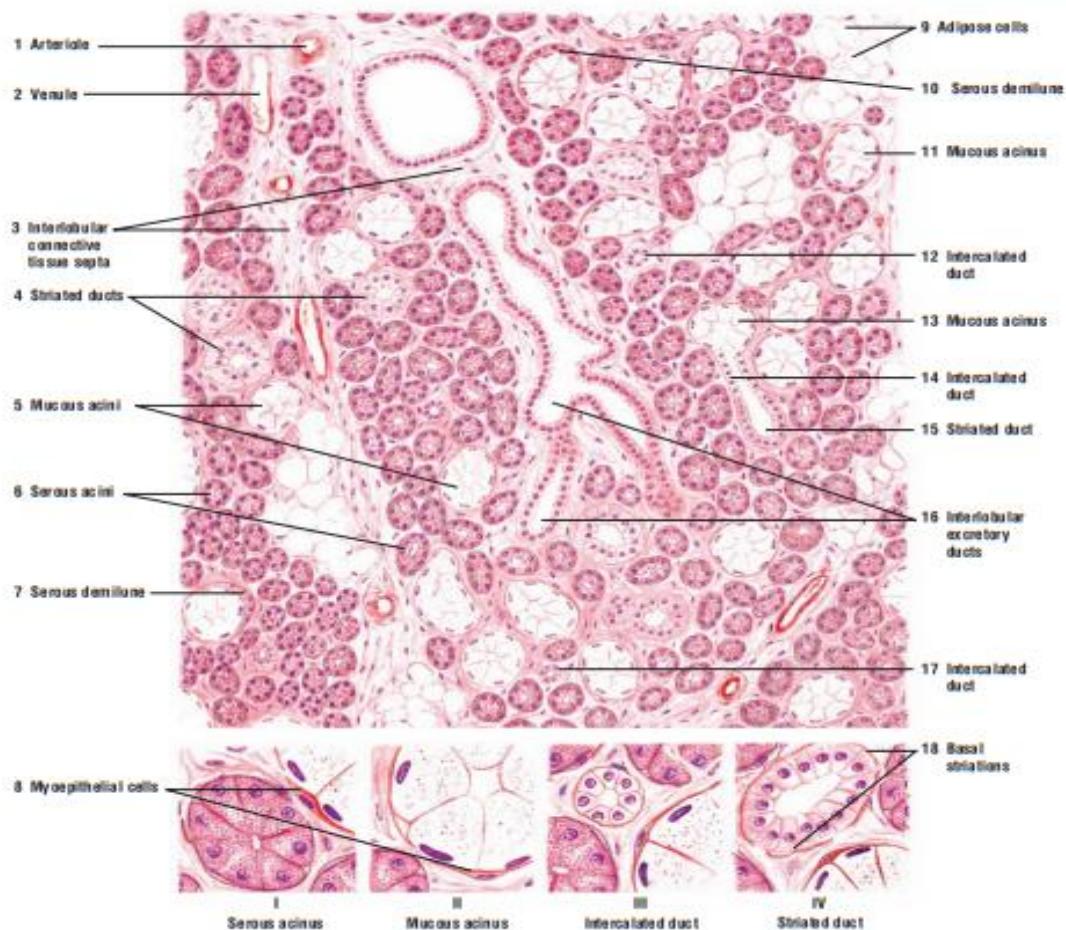


Figure 59: Histologie de la glande sous maxillaire (Eroschenko, 2008).

IV.2.1.3.3. La glande sublinguale

C'est une glande mixte, en général à dominance muqueux située sous la muqueuse du plancher de la bouche. Elle est constituée non par une glande unique mais par plusieurs lobes considérés comme des glandes distinctes, les uns conglomérées et les autres agminées, réunis en groupes ou en amas très diversement représenté selon les espèces.

Chez les ruminants (bovins, ovins) les acini sont presque tous muqueux, chez les carnivores (chien, chat) il y a des acini séro-muqueux et des acini séreux et muqueux, les canaux intercalaires manquent. Il existe chez les carnivores la glande zygomatique et chez le chat la glande molaire (Mansour, 2015).

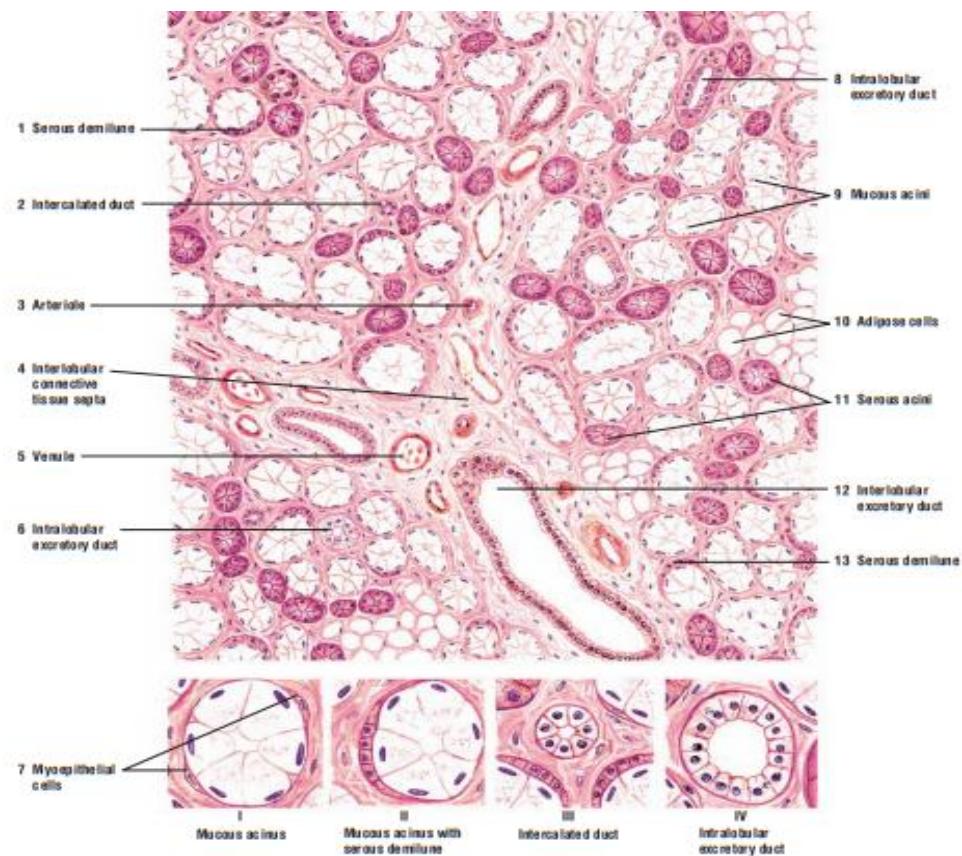


Figure 60: Histologie de la glande sublinguale (Eroschenko, 2008).

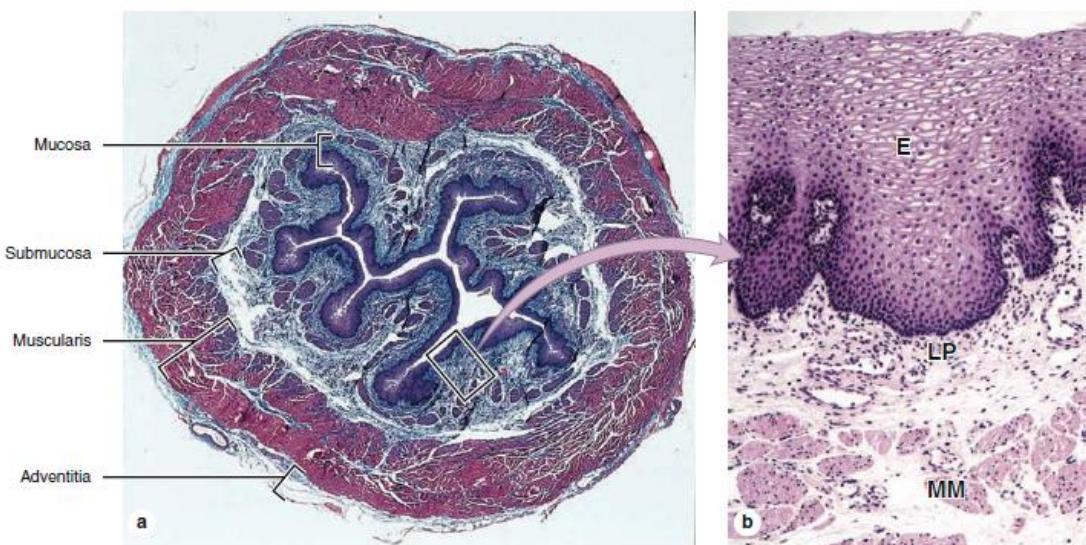
IV.2.3. Le tube digestif

IV.2.3.1. L'œsophage : sa muqueuse comporte un épithélium identique à celui de la cavité buccale c'est-à-dire pavimenteux stratifié non kératinisé, celui-ci repose sur un chorion fait d'un tissu conjonctif lâche, renfermant de nombreux lymphocytes isolées ou groupées en follicules.

Dans sa partie inférieure sont reparties des glandes tubulo-alvéolaires, composées, purement muqueuses ou glandes cardiales.

La musculaire muqueuse est absente au $\frac{1}{4}$ supérieur de l'œsophage et n'apparaît que dans les parties moyenne et inférieure, elle est constituée de faisceaux de cellules musculaires lisses longitudinales.

La sous muqueuse est faite d'un tissu conjonctif lâche riche en fibres élastiques, renferme des glandes acineuses composées, séro-muqueuses (Glandes œsophagiennes) qui sont réparties sur toute la longueur de l'œsophage et dont les canaux excréteurs traversent la muqueuse pour venir s'aboucher dans la lumière (Mescher, 2016).



(a) In cross section the four major layers of the GI tract are clearly seen. The esophageal mucosa is folded longitudinally, with the lumen largely closed. (X10; H&E)

(b) Higher magnification of the mucosa shows the stratified squamous epithelium (E), the lamina propria (LP) with scattered lymphocytes, and strands of smooth muscle in the muscularis mucosae (MM). (X65; H&E)

Figure 61: Histologie de l'œsophage (Mescher, 2016).

IV.2.3.2. L'estomac

IV.2.3.2.1. Structure générale gastrique

Les différentes parties anatomiques de l'estomac, selon leur orientation proximo distale, sont le cardia, le fundus, le corps et le pylore.

En fonction de son état de vacuité et de remplissage l'estomac présentera des plis par ailleurs observés au cours d'examen fibroscopique (gastroscopie). A cet étage du tube digestif, on observera des caractéristiques histologiques spécifiques importantes au niveau de 2 des 5 tuniques constitutives du tube.

La muqueuse : schématiquement, on peut y décrire un « étage des cryptes » et un « étage des glandes ».

L'étage des cryptes : L'épithélium de surface est un épithélium prismatique simple constitué de cellules dites « à pôle muqueux fermé » (à partie apicale contenant des grains de mucus). Il s'invagine régulièrement en dépressions appelées « cryptes gastriques » réalisant ainsi un « étage des cryptes ».

L'étage des glandes : Le chorion comporte un tissu conjonctif riche en fibres de réticuline et en cellules lymphoïdes ; son épaisseur est due à l'abondance des glandes gastriques qu'elle contient, ce qui réalise un « étage des glandes ».

La musculaire-muqueuse : c'est une assise de cellules musculaires lisses réparties en 2 couches (interne circulaire et externe longitudinale).

La sous-muqueuse : composé par un tissu conjonctif dense qui contient des vaisseaux sanguins et lymphatiques ; elle est infiltré par des lymphocytes, des macrophages et des mastocytes.

La muscleuse : composée de fibres musculaires lisses réparties en 3 couches :

- une couche interne, épaisse, oblique
- une couche moyenne circulaire
- une couche externe longitudinale.

La séreuse : faite de tissu conjonctif lâche riche en vaisseaux sanguins et lymphatiques, un tissu adipeux et un épithélium pavimenteux simple (mésothélium).

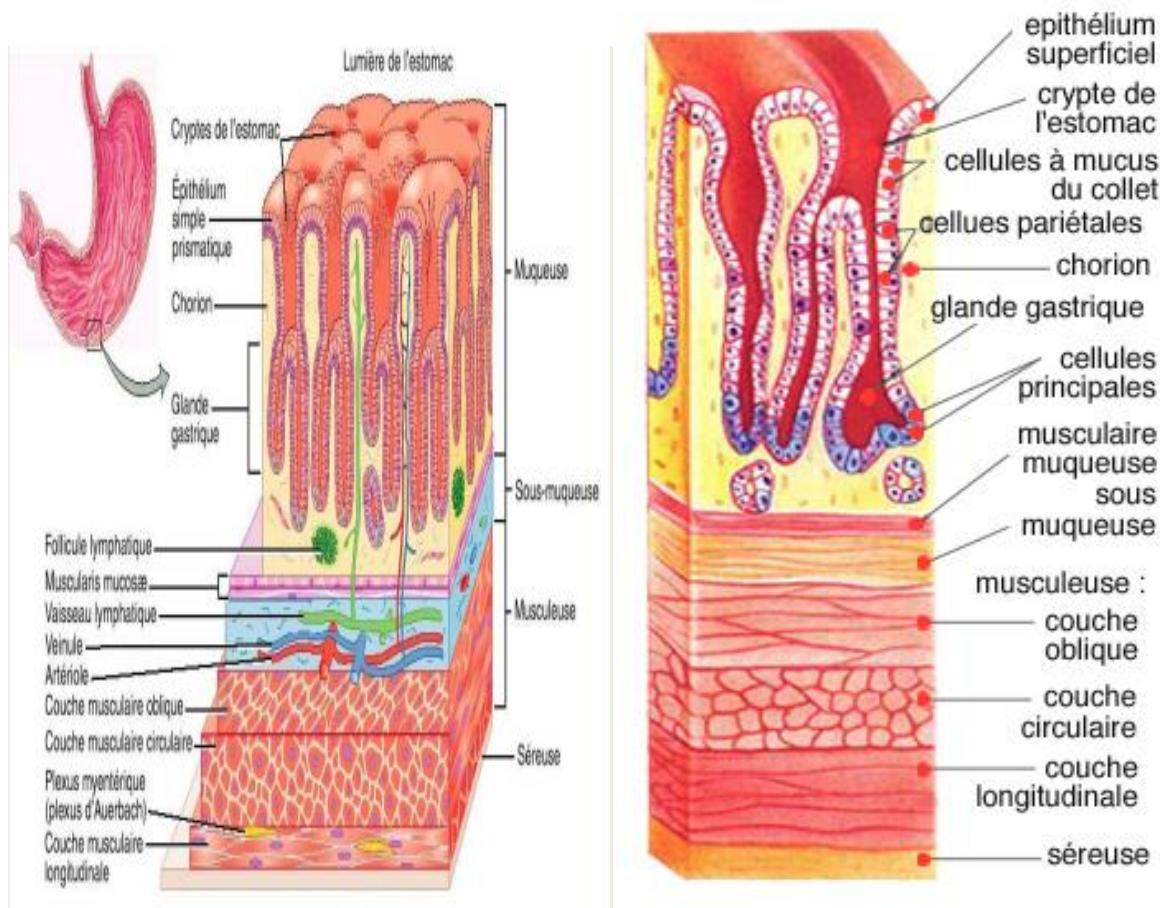


Figure 62: Structure de la paroi gastrique (Laborie, 2017)

IV.2.3.2.2. Variations structurelles en fonction des régions gastriques

a) **Le cardia** : est la zone de transition entre l'œsophage et l'estomac ; il se caractérise par un brusque passage de l'épithélium malpighien œsophagien vers l'épithélium gastrique simple ainsi que par la présence de glandes cardiales dans le chorion.

b) **L'estomac fundique** : (fundus et corps gastrique) est caractérisé par la présence, dans le chorion de la muqueuse, de glandes tubuleuses droites nommées glandes fundiques. Elles ont une fine lumière s'ouvrant au fond des cryptes.

La vascularisation de la muqueuse, compte tenu de l'importance de la sécrétion est très dense et présente une orientation des capillaires, entre les glandes fundiques, perpendiculaire à la surface de la muqueuse.

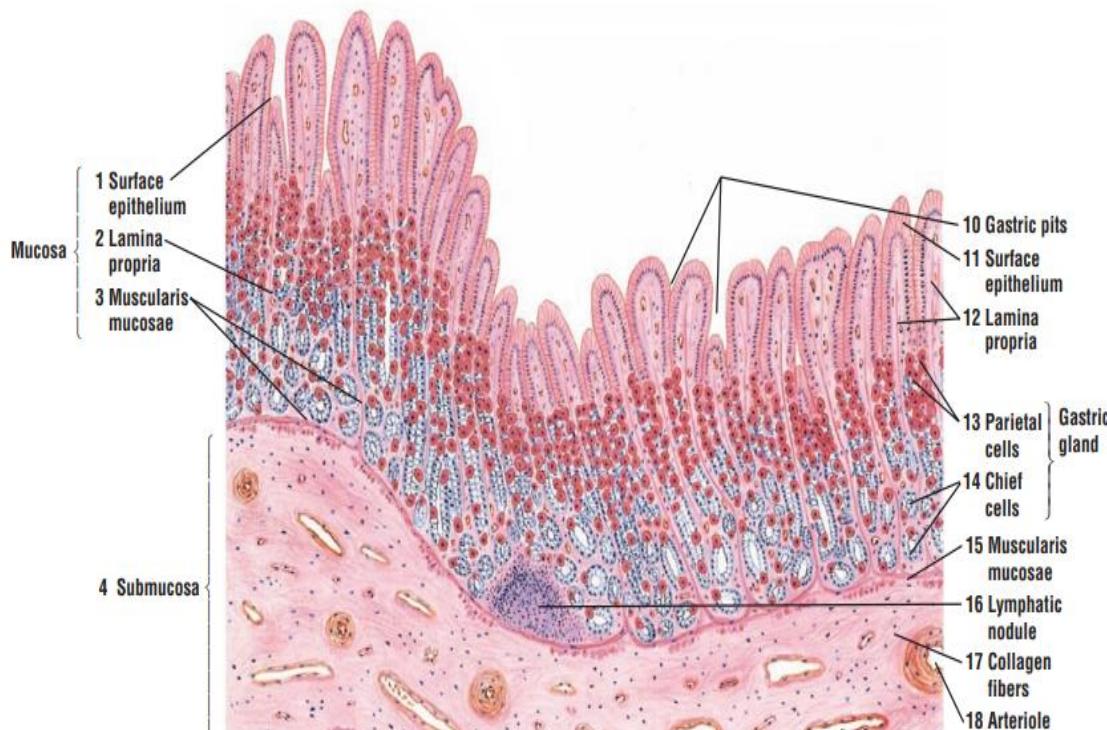


Figure 63: La muqueuse gastrique (fundus et corps de l'estomac) (Eroschenko, 2008).

Les glandes fundiques comportent 4 types cellulaires : les cellules principales, les cellules bordantes, les cellules à mucus et les cellules neuro-endocrines.

Les cellules principales sont petites, polyédriques et prédominent au milieu et au fond des glandes. Elles sont à sécrétions protéiques : elles produisent le pepsinogène (précurseur inactivé d'une enzyme protéolytique : la pepsine).

Les cellules bordantes : sécrètent de l'acide chlorhydrique

Les cellules à mucus : (« cellules du collet ») sont largement prédominantes vers le milieu et surtout le sommet des glandes.

Les cellules neuroendocrines gastriques (cellules « G ») appartiennent à l'ensemble des cellules neuroendocrines de tube digestif. Sous la stimulation du système parasympathique et des peptides gastriques, elles sécrètent dans le secteur vasculaire sanguin une hormone : la gastrine, qui aura pour effet de stimuler la production d'HCl par les cellules bordantes.

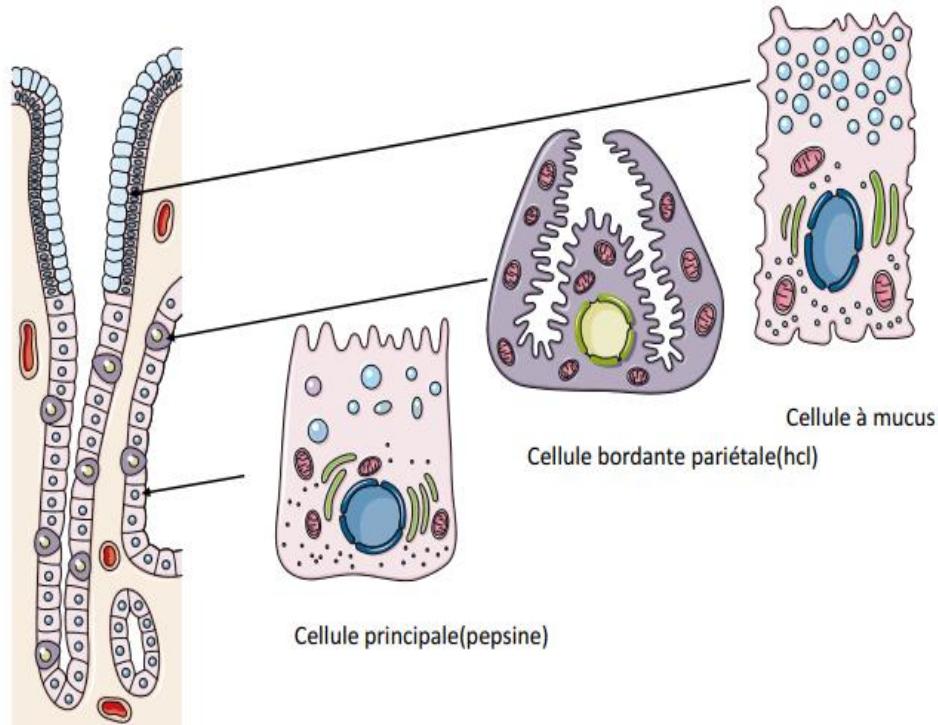


Figure 64: Cellules de la paroi gastrique (Laborie, 2017).

c) La région pylorique : dans la muqueuse de la région pylorique de l'estomac, les fosses gastriques sont plus profondes. La surface de l'estomac est recouverte d'un simple épithélium muqueux qui s'étend pour tapisser toutes les cryptes gastriques.

Les glandes pyloriques s'ouvrent au fond des invaginations gastriques. Elles sont tubulaires ramifiées ou enroulées contenant des sécrétions muqueuses semblables à celles de la région cardiale de l'estomac, un seul type de cellules se trouve dans l'épithélium de ces glandes « La haute cellule muqueuse à contenu mucigène ». Les cellules entéro-endocrines sont également présentes dans cette région et peuvent être démontrées avec une tache spéciale (Eroschenko, 2008).

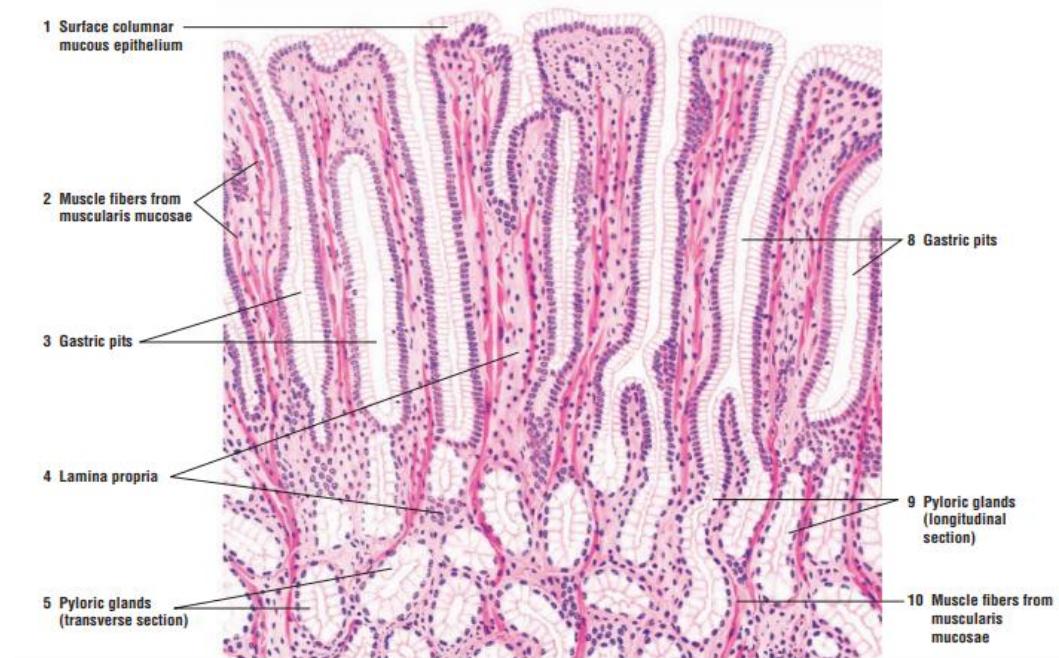


Figure 65 : La muqueuse gastrique (région pylorique de l'estomac) (Eroschenko, 2008).

IV.2.3.3. L'intestin grêle

1/ La muqueuse : peut être décrite en deux étages : un étage des villosités et un étage des glandes (ou cryptes) de Lieberkühn.

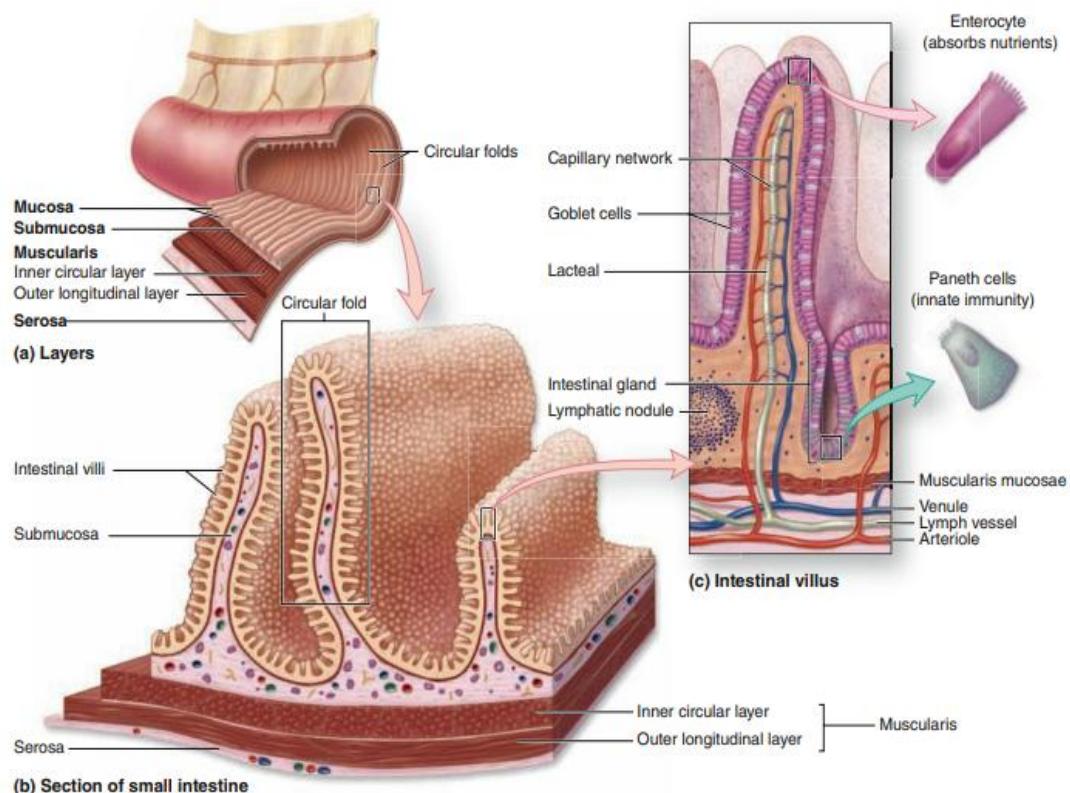


Figure 66: Structure de la paroi intestinale (Eroschenko, 2008).

L'étage des villosités : comporte les villosités intestinales, expansions de la muqueuse vers la lumière, avec un axe villositaire tapissé par l'épithélium de surface qui repose sur un chorion. L'épithélium de revêtement intestinal est un épithélium prismatique simple constitué de plusieurs types cellulaires : des entérocytes (sont responsables de la fonction d'absorption intestinale), des cellules caliciformes (cellules à mucus), des cellules neuroendocrines.

L'étage des glandes : comporte des glandes (ou cryptes) de Lieberkühn invaginées en doigt de gant. On y observe cinq types cellulaires : des cellules caliciformes, des entérocytes, des cellules « intermédiaires », des cellules entero-endocrines et au fond des cryptes, des cellules de Paneth (sont situées au fond des cryptes : ce sont des cellules sécrétaires exocrines à action antimicrobiennes surtout des lysozymes).

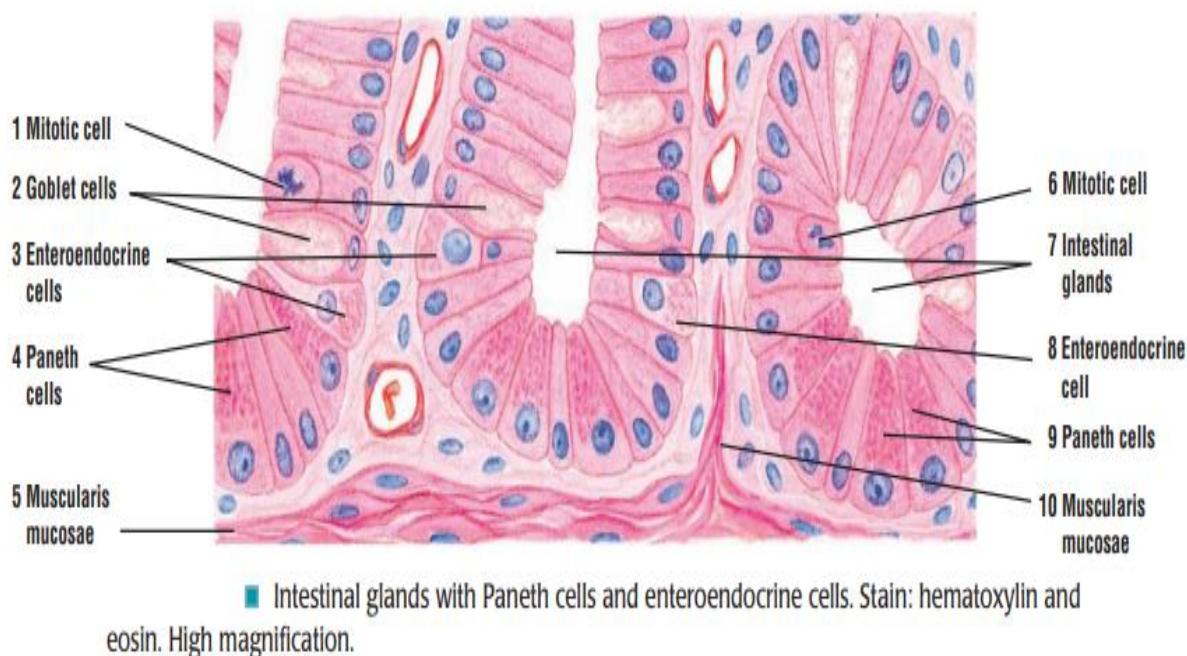
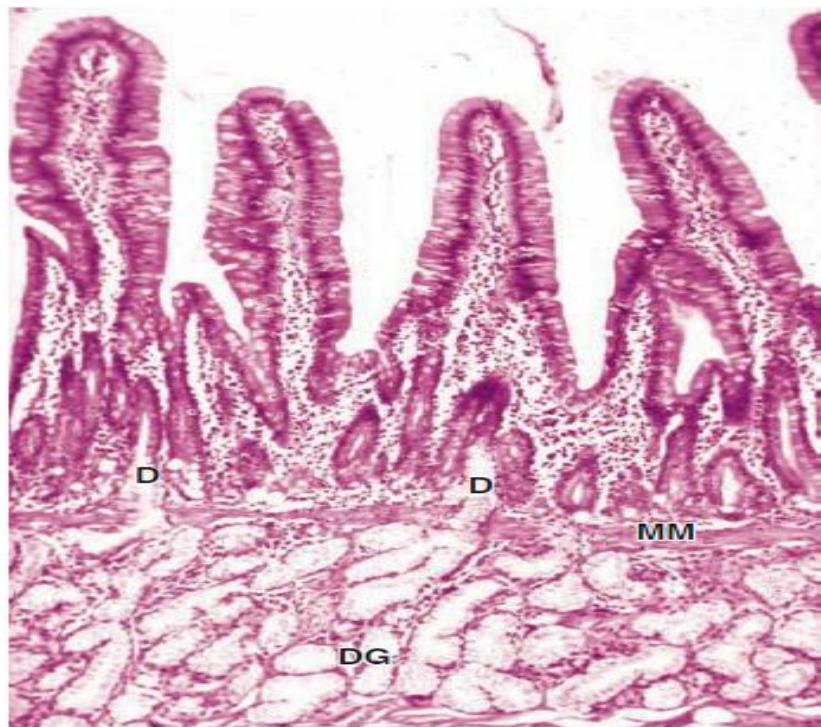


Figure 67: Des glandes intestinales avec des cellules de Paneth et des cellules entero-endocrines (Eroschenko, 2008).

2 / Musculaire muqueuse : formée de 2 couches interne circulaire et externe longitudinale

3/ La sous muqueuse : varie selon le segment considéré (au niveau du duodénum : présence de glandes tubuleuses ramifiées « glandes de Brunner » qui débouchent dans la lumière entre les glandes de Luberkuhn ; ces glandes sont absentes au niveau du jéjunio-ileon).



D : canal excréteur ; DG : glandes duodénales ; MM : musculeuse muqueuse.

Figure 68: Glandes de Brunner du duodénum (Mescher, 2016).

4/ Musculeuse ; formée également de 2 couches interne circulaire et externe longitudinale

5/ Séreuse : constituée par le péritoine viscéral.

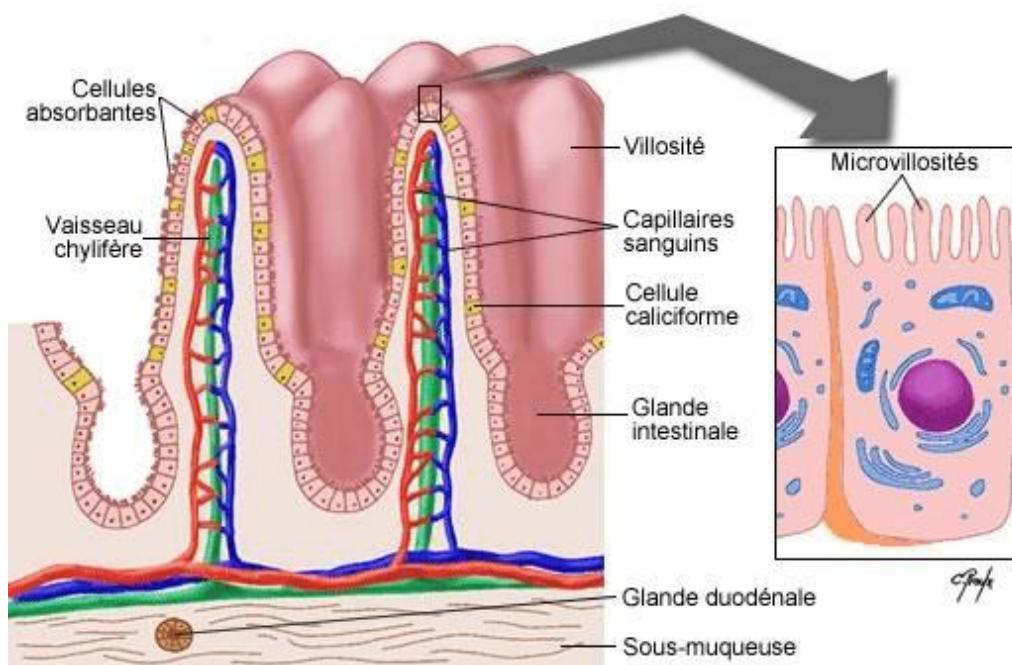


Figure 69: Structure de la paroi de l'intestin grêle (Marieb, 1993).

IV.2.3.4. Le gros intestin

Il a pour principale fonction d'absorber l'eau du bol alimentaire. Il ne possède ni valvules conniventes, ni villosités.

1/ La muqueuse : L'épithélium de recouvrement s'invagine et forme des cryptes de Lieberkühn plus profondes que celles du grêle avec absence de villosités. Il est constitué d'entérocytes et de cellules caliciformes qui fabriquent un abondant mucus indispensable pour faciliter la progression de fèces, de plus en plus consistantes au fur et à mesure que l'on se rapproche de l'anus.

Les entérocytes présentent un pôle apical couvert de microvillosités mais ne possèdent pas l'équipement enzymatique de l'intestin grêle.

Le plateau absorbant des entérocytes permet la récupération d'une grande partie de l'eau contenue dans les matières quittant l'intestin grêle. Cette absorption de l'eau dépend d'une réabsorption active de Cl^- .

2 / Musculaire muqueuse : identique à celle de l'IG

3/ La sous muqueuse : il ya abondance de cellules lymphoïdes

4/ Muscleuse : est formée par deux couches de cellules musculaires lisses l'une à disposition circulaire, l'autre à disposition longitudinale, la couche circulaire interne peut se renforcer localement et former de véritables sphincters anatomiques.

La muscleuse possède une particularité : si la couche circulaire interne est typique, sa couche longitudinale externe est très mince et présente des renforcements longitudinaux (bandelettes musculaires) lui donnant un aspect discontinu. Ces bandelettes sont reconnaissables à l'oeil nu.

- Entre les deux couches se trouve un réseau élastique puissant et bien entendu les plexus de Meissner (Figure 70).

5/ Séreuse : elle est remplacée par une adventice dans sa partie terminale.

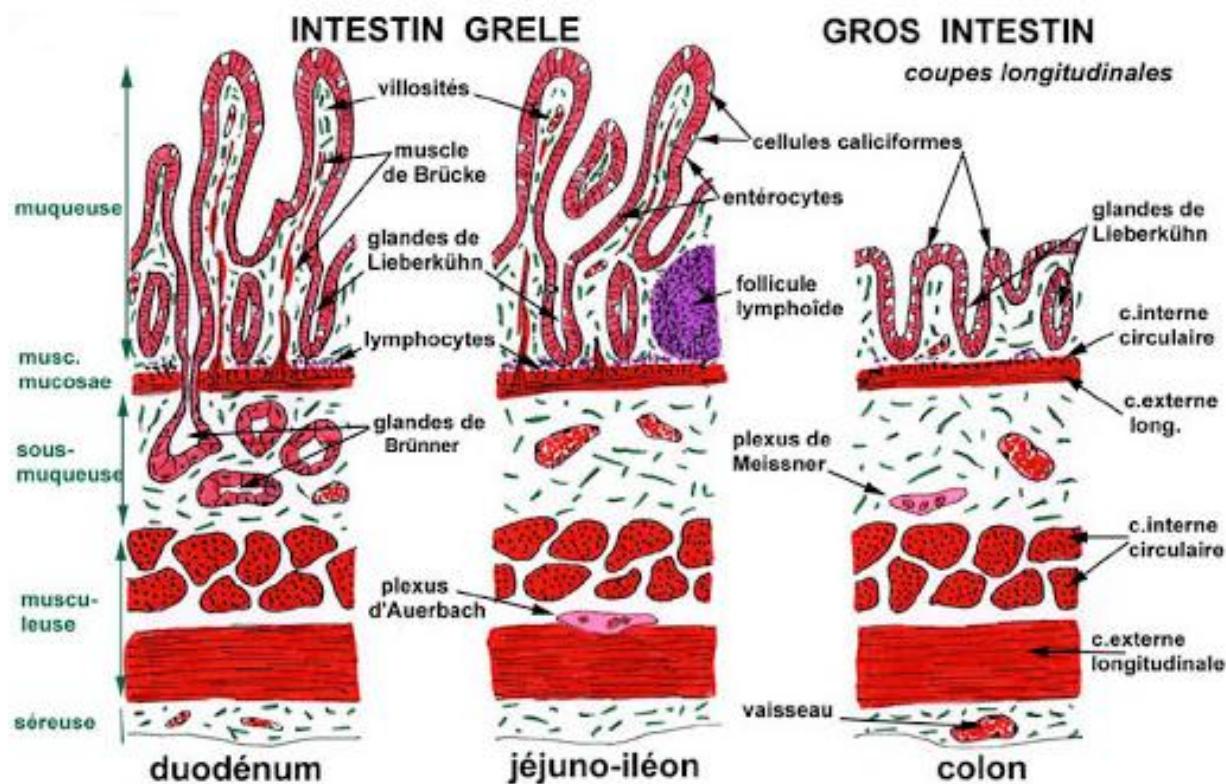
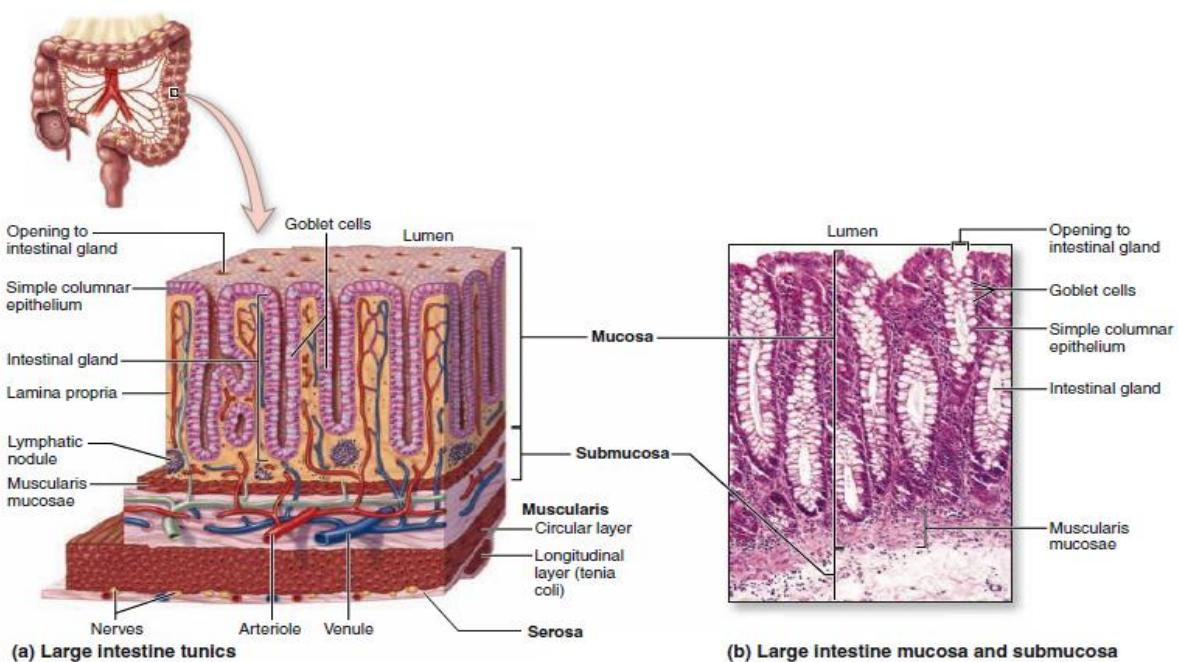


Figure 70: Structure du gros intestin (Source : Anonyme 5).



(a) Diagram shows the wall of the large intestine composed of the four typical layers. The **submucosa** is well vascularized. The **muscularis** has a typical inner circular layer, but the outer longitudinal muscle is only present in three equally spaced bands, the **teniae coli**.

(b) The **mucosa** is occupied mostly by tubular **Intestinal glands** extending as deep as the muscularis mucosae and by lamina propria rich in MALT. (X80; H&E)

Figure 71: Structure du gros intestin (Mescher, 2016).

IV.2.3. Histologie du pancréas et du foie

IV.2.3.1. Histologie du pancréas

Le pancréas est entouré par une capsule conjonctive très fine qui envoie en profondeur des travées qui servent de voies de passage pour les vaisseaux, nerfs et les canaux excréteurs, cloisonnant ainsi l'organe en lobules. Dans les lobules on décrit deux entités :

- Acini et les voies excrétrices
- Ilots de Langerhans

Le pancréas exocrine qui constitue la majeure partie de la glande tubulo-alvéolaire à sécrétion séreuse. La glande est divisée en lobules par des travées de tissu conjonctif. Chaque acinus est composé de cellules situées au centre de l'acinus, les cellules centro-acineuses forment les canaux les plus petits de la glande (Barone, 1984).

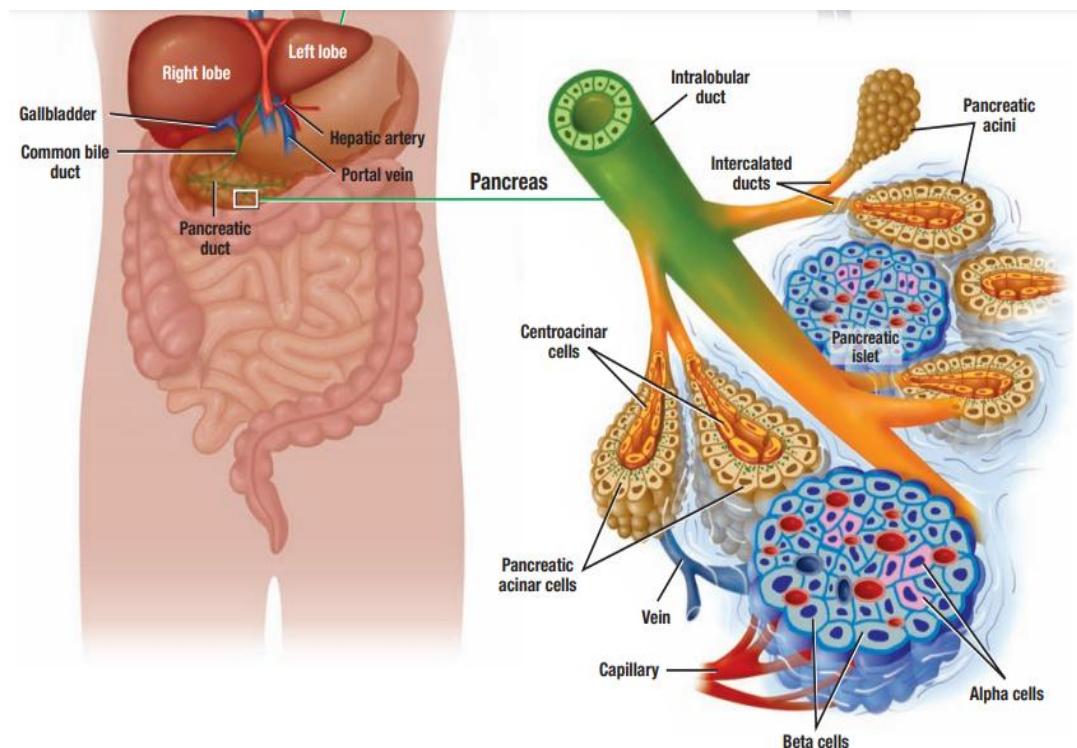


Figure 72: Le pancréas (anatomie et histologie) (Eroschenko, 2008).

a) Le lobule pancréatique : il est formé du tissu glandulaire exocrine au sein duquel se trouvent les îlots de cellules endocrines. Le tissu exocrine est constitué, comme les glandes séreuses pures, de la juxtaposition d'unités fonctionnelles qui sont les acini pancréatiques serrés les uns contre les autres. Ces acini sont pédiculés par de petits canaux excréteurs, les canaux intercalaires homologues des passages de Boll et drainent les produits de sécrétion vers les

canaux intra lobulaires. Ceux-ci à leur tour, déversent dans les canaux inter lobulaires, la sécrétion exocrine du lobule (Mansour, 2015).

b) L'acinus pancréatique : il a une forme arrondie souvent assez allongée, il est formé par une seule couche de cellules épithéliales pyramidales reposant sur une lame basale sans interposition de cellules myoépithéliales convergeant vers une lumière centrale. La taille de celle-ci varie avec le stade fonctionnel de la glande : petite au repos et difficile à observer et elle est distendue par les produits de sécrétion en période d'activité.

***Les cellules acineuses :** des cellules séreuses typiques avec une forme pyramidale à sommet arrondi bombant discrètement dans la lumière ; la partie basale, plus large, repose sur la membrane basale. Elles présentent un noyau arrondi et fortement nucléolé, le cytoplasme à leur pôle basal est relativement homogène, alors qu'au pôle apical il contient des grains de zymogène

*** Les cellules centro-acineuses :** situées dans la lumière du cul de sac glandulaire, aplatis ou fusiformes allongées parallèlement au grand axe de l'acinus, elles émettent des expansions filiformes qui pénètrent entre les cellules acineuses et allant même s'implanter sur la lame basale et prolongeant les canaux intercalaires jusque dans la cavité sécrétante sans atteindre le fond de celle-ci. Elles sont claires homogènes leur noyau est dépourvu de nucléole mais il est chargé de fines granulations de chromatine.

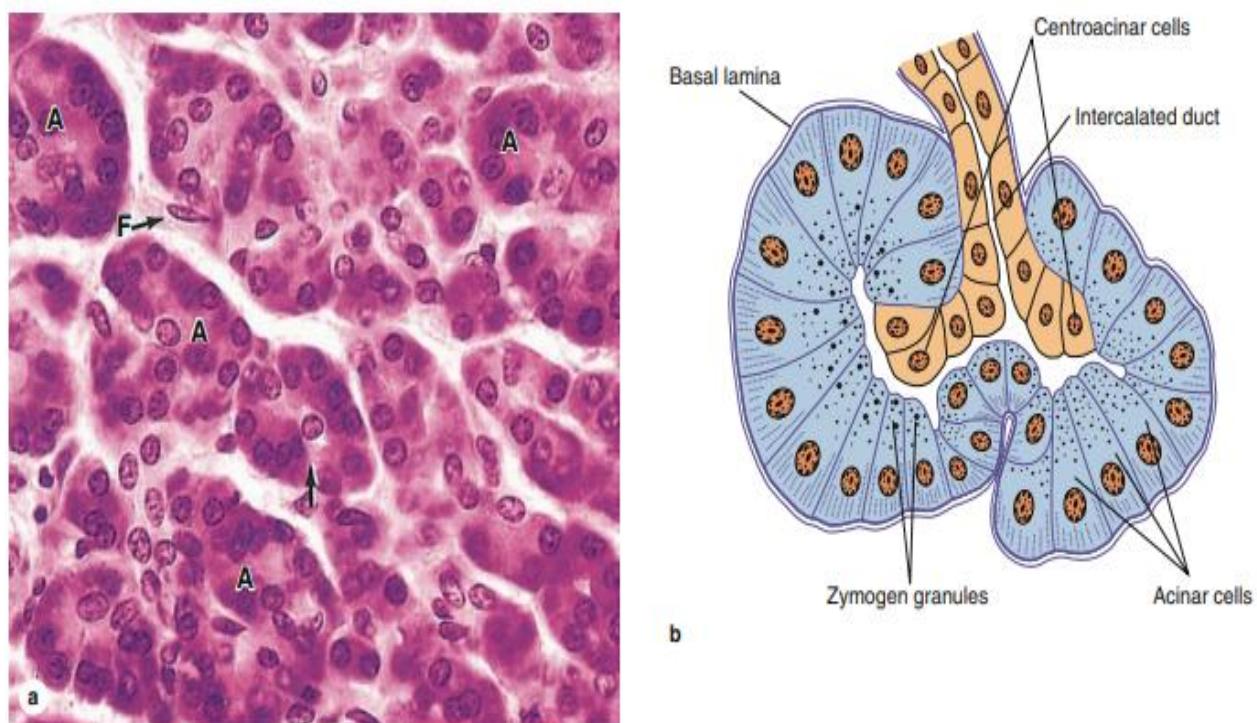
***Les canaux excréteurs :** le système de canaux excréteurs se distingue de celui des glandes salivaires par la présence de cellules centro-acineuses et l'absence des canaux striés. On distingue plusieurs segments :

1-Les canalicules intercalaires ou passage de Boll : ils font directement suite aux acini, leur paroi est composée d'un épithélium cubique simple fait de cellules à cytoplasme pâle et pauvre en organites

2-Les canaux intra lobulaires : sont plus larges et leur paroi comporte un épithélium prismatique simple. On ne trouve pas à ce niveau des cellules striées similaires à celles des canaux intra-lobulaires des glandes salivaires séreuses

3-Les canaux inter lobulaires : ils cheminent dans les travées conjonctives, leur lumière large est bordée par un épithélium prismatique simple contenant quelques cellules caliciformes et quelques cellules endocrines (épithélium intestinal). Ils sont entourés par une fine gaine conjonctive riche en fibres élastiques.

4-Canal collecteur ou canal de Wirsung : il parcourt toute la longueur du pancréas en son centre. Il draine les canaux inter lobulaires et se jette dans le duodénum (ampoule de Vater). La paroi est faite d'un épithélium prismatique simple reposant sur un chorion conjonctif contenant des fibres élastiques et quelques glandes muqueuses.



(a) Micrograph of exocrine pancreas shows the serous, enzyme-producing cells arranged in small acini (**A**) with very small lumens. Acini are surrounded by only small amounts of connective tissue with fibroblasts (**F**). Each acinus is drained by an intercalated duct with its initial cells, the centroacinar cells (**arrow**), inserted into the acinar lumen. (X200; H&E)

(b) The diagram shows the arrangement of cells more clearly. Under the influence of secretin, the **centroacinar** and **intercalated duct cells** secrete a copious HCO_3^- -rich fluid that hydrates, flushes, and alkalinizes the enzymatic secretion of the acini.

Figure 73: Structure de l'acinus pancréatique (Mescher, 2016).

IV.2.3.2. Histologie du foie

Le foie est une glande complexe, entourée d'une double enveloppe (l'une séreuse constituée par le péritoine viscéral qui tapisse le foie et l'autre fibreuse ou «capsule de Glisson», mince, transparente et résistante, qui adhère à la sous séreuse et au tissu hépatique). Le foie est composé d'un parenchyme constitué d'innombrables lobules ; de conduits excréteurs, des vaisseaux et des nerfs (Barone, 1984).

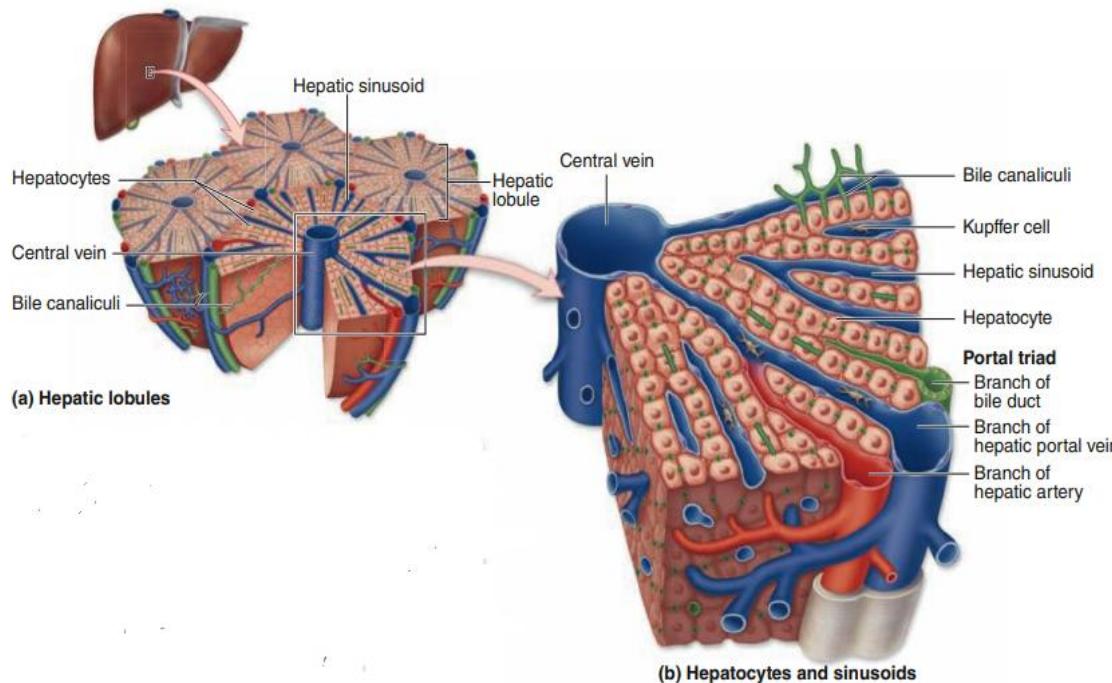


Figure 74: Structure des lobules hépatiques (Mescher, 2016).

IV.2.3.2.1. Le parenchyme hépatique

Le parenchyme hépatique est constitué d'unités microscopiques, les lobules hépatiques et parsemé d'espaces conjonctifs, les espaces portes ou espaces de Kiernan (Belarbi, 2019).

-Dans le **lobule hépatique** on retrouve :

*des travées de cellules hépatocytaires, les travées de Remak, ces travées sont rayonnantes à partir du centre du lobule occupé par une veine, la veine centro-lobulaire (la réunion des veines centro-lobulaires sera à l'origine de la veine sus hépatique).

*des capillaires sinusoïdes qui sont de gros capillaires ayant la même orientation que les travées de Remak.

-**L'espace de Kiernan** ou espace porte est formé de tissu conjonctif fibreux à l'intérieur duquel on trouve :

*Des vaisseaux sanguins : branche de la veine porte et de l'artère hépatique.

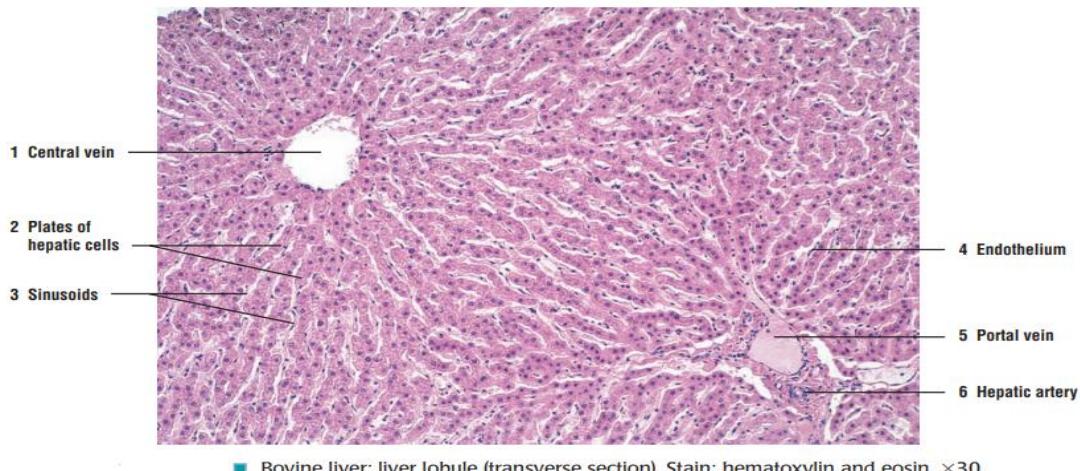
*Des vaisseaux lymphatiques.

*Un ou plusieurs canaux biliaires à lumière arrondie et épithélium cubique ou prismatique.

a)Le lobule hépatique : il a une forme hexagonale. Les cellules hépatiques sont disposées en lames entre lesquelles se localisent les sinusoïdes.

Au contact des lobules se trouve un espace conjonctivo-vasculaire : l'espace porte ou espace de Kiernan qui est constitué par un lot de tissu conjonctif ayant une forme triangulaire. Ces espaces portes constituent en quelque sorte des expansions intra hépatiques de la capsule de Glisson. Ils contiennent une branche de l'artère hépatique, une branche de la veine porte, et un canal bilaire

tapissé par un épithélium cubique, l'ensemble forme la triade portale avec généralement un vaisseau lymphatique et des filets nerveux (Barone, 1984).



■ Bovine liver: liver lobule (transverse section). Stain: hematoxylin and eosin. $\times 30$.

Figure 75: Le lobule hépatique (Eroschenko, 2008).

***Les espaces sus hépatiques :** ne comportent qu'un seul élément vasculaire : la veine sus hépatique ou centro-lobulaire. Entre ces deux espaces se trouvent disposées les travées hépatiques rayonnant autour de la veine centro-lobulaire. Chaque travée est formée par deux rangées de cellules

*** L'hépatocyte :** est une cellule polyédrique de 20 à 30 μ de diamètre. Sa taille varie suivant l'état fonctionnel et nutritionnel du corps. Chaque hépatocyte est pourvu : d'un noyau central arrondi, relativement gros, quelque fois double, possédant 1 à 2 nucléoles volumineux.

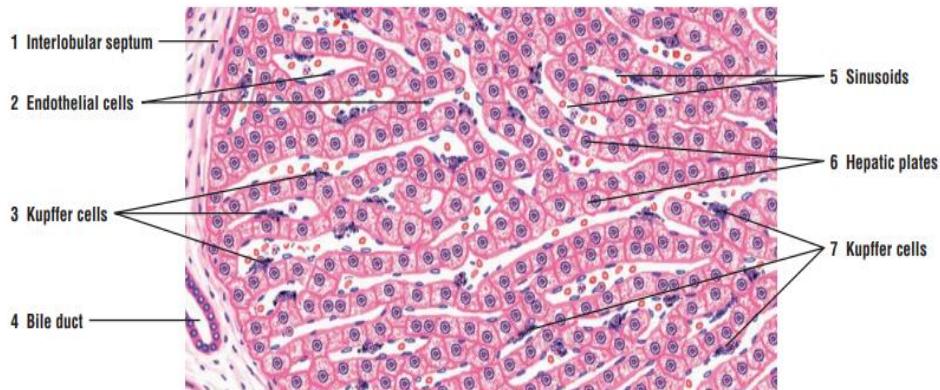
Son cytoplasme granuleux ou spongieux, contient de nombreux organites : des mitochondries, du réticulum endoplasmique rugueux et réticulum endoplasmique lisse, des ribosomes libres ou groupés en polysomes, un appareil de golgi, des lysosomes, des peroxysomes. En plus des organites, la cellule contient, du glycogène, des lipides et des pigments (biliaires et lipofuschine) (Mansour, 2015).

***Les sinusoides hépatiques :** situés entre les lames hépatocytaires, ils sont anastomosés et forment un vaste réseau interposé entre la veine porte et la veine sus hépatique (centro-lobulaire). Leur paroi est dépourvue de lame basale et contient trois types de cellules.

-Les cellules endothéliales typiques non jointives présentent de large pores fenestrées de 100 um, un noyau et des organites intra cytoplasmiques (mitochondries, vésicules de pinocytose, RE). Les cellules endothéliales sont impliquées dans le transit sélectif de macromolécules du sang vers les hépatocytes (Belarbi, 2019).

-Les cellules de Kupffer volumineuses et étoilées se caractérisent par une activité phagocytaire importante (phagocytose des pigments, des produits de dégradation des globules rouges), et interviennent dans le métabolisme du fer.

-Lymphocytes associés au foie (LAL: liver associated lymphocytes): Il s'agit de petits lymphocytes granulaires (pit cells) ou agranulaires (Belarbi, 2019).



■ Kupffer cells in a liver lobule (India ink preparation). Stain: hematoxylin and eosin. High magnification.

Figure 76: Sinusoïdes hépatiques (Eroschenko, 2008).

***Les espaces de Disse :** sont situés entre les travées de Remak et les capillaires radiés. Ils sont le lieu des échanges entre le sang et les cellules hépatiques qui ne sont pas donc séparés par une barrière anatomiquement définie puisque les capillaires sont largement ouverts vers les éléments épithéliaux (Belarbi, 2019). Ils contiennent :

- Les microvillosités de la membrane plasmique des hépatocytes
- Les cellules étoilées ou cellules de Ito (ou Stellate cells, Fat storing cell) ou les cellules péri sinusoïdales sont :

*localisées dans l'espace de Disse et établissant des contacts étroits avec les hépatocytes et les cellules endothéliales.

*Emettent des prolongements cytoplasmiques péri-sinusoïdaux

*sont caractérisés par un cytosquelette très développé, et par la présence dans le cytoplasme d'inclusions lipidiques.

Les cellules de « Ito » sont impliquées dans le métabolisme du rétinol, dans le stockage de la vitamine A.

-Rares fibres collagènes dont le nombre augmente au cours du processus de cirrhose.

IV.2.3.2.2. Les conduits excréteurs

Les voies d'excrétion de la bile constituent un système complexe comprenant en premier lieu :

- Les canalicules biliaires : situés dans les travées hépatiques, ils apparaissent comme des lumières glandulaires sans paroi propre. Ce sont des dépressions linéaires creusées entre deux cellules adjacentes.
- Les canaux périlobulaires : bordés d'un épithélium cubique, ils reposent sur une lame basale.
- Les conduits biliaires interlobulaires : cheminent dans les espaces porte et se réunissent plus loin dans les gros canaux biliaires extrahépatiques. Tous les canaux convergent vers le hile du foie où ils se réunissent en formant le canal hépatique : portion extra hépatique des voies biliaires.

IV.2.3.2.3. La circulation hépatique

Le foie possède une double vascularisation afférente, artérielle et portale, et une vascularisation efférente par les veines sus-hépatiques (Barone, 1984).

***La veine porte** : transportant du sang veineux venant de l'intestin et de la rate, accompagnée par des branches de l'artère hépatique, pénètre dans le foie au niveau du hile. Ces vaisseaux se ramifient en veines interlobulaires et cheminent entre les lobules dans les espaces porte, entourent le lobule, puis le pénètrent et se ramifient en fins capillaires : les sinusoides hépatiques qui se déversent dans la veine centro-lobulaire.

La veine centro-lobulaire se jette dans une veine sublobulaire qui chemine entre les lobules. Les veines sublobulaires se rejoignent et constituent les veines sus hépatiques qui aboutissent dans la veine cave inférieure.

***L'artère hépatique** : approvisionne le foie en sang oxygéné provenant des branches du tronc cœliaque issu de l'aorte. Elle pénètre par le hile hépatique et se ramifie pour donner naissance aux branches de l'artère hépatique situées aussi dans les espaces portes avant de se déverser dans les sinusoides par leurs branches courtes artério-sinusoidales.

***Vascularisation lymphatique** : elle débute au sein des lobules hépatiques dans l'espace de Disse, se poursuit par des vaisseaux lymphatiques de l'espace porte de Kiernan et aboutit au lymphatique efférent qui quitte le foie au niveau du hile.

IV.2.3.2.4. Les voies biliaires

1- Les voies biliaires intra-hépatiques

* Canalicules biliaires sans paroi, situés entre deux hépatocytes, réalisant un réseau intralobulaire drainant la bile vers l'espace porte (Bennacer, 2022).

* Les passages de Hering : situés à la périphérie du lobule classique, reçoivent la bile des canalicules intra-lobulaires et l'acheminent vers les canaux biliaires de l'espace porte. Leur lumière est limitée par un épithélium cubique simple.

*Les canaux biliaires inter-lobulaires : (espaces porte), limités par un épithélium cubique simple qui devient prismatique simple lorsque la taille du canal augmente par confluence de plusieurs canaux.

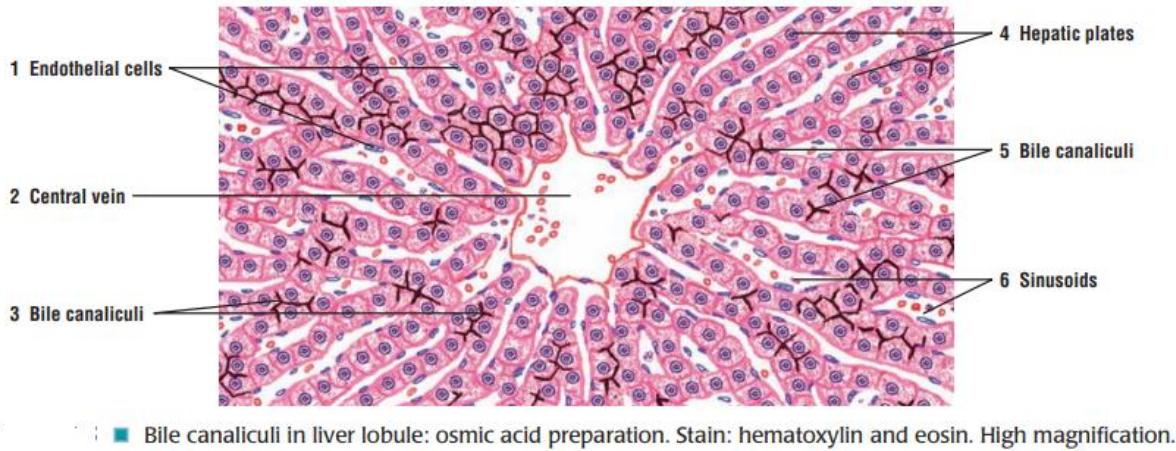


Figure 77: Les voies biliaires intra-hépatiques (Eroschenko, 2008).

2- Les voies biliaires extra-hépatiques

On distingue :

*Les voies biliaires principales : canal hépatique et canal cholédoque.

Les canaux hépatiques droit et gauche se rejoignent au niveau du hile du foie, pour former le canal hépatique commun qui devient par la suite le canal cholédoque. Le cholédoque mesure 6 à 7 cm de long, et s'ouvre dans le duodénum au niveau de l'ampoule de Vater, embouchure commune des canaux cholédoque et pancréatique. La paroi des voies biliaires extra-hépatiques comprend :

*Une muqueuse avec un épithélium prismatique simple reposant par l'intermédiaire de sa lame basale sur un chorion riche en fibres élastiques et contenant des glandes muqueuses.

*Une couche musculaire, à disposition longitudinale et oblique, d'importance progressivement croissante.

A l'extrémité du cholédoque, un renforcement musculaire lisse forme le sphincter d'Oddi.

*Les voies biliaires accessoires : canal cystique et vésicule biliaire

-Le canal cystique : de 3 cm de longueur, il relie le col de la vésicule au canal cholédoque.

-La vésicule biliaire : est un réservoir placé sous la face inférieure du foie, ayant une forme allongée de 8 à 10 cm de long. Elle reçoit la bile aqueuse diluée du canal hépatique commun, l'emmagsine, la concentre et évacue une bile épaisse dans le canal cholédoque. La vidange de la vésicule biliaire met en jeu la contraction de la musculeuse et l'ouverture du sphincter d'Oddi. La paroi de la vésicule biliaire est formée de trois tuniques :

*une muqueuse : avec un épithélium simple prismatique dont les cellules présentent des microvillosités apicales, des inter-digitations, des complexes de jonction apicaux et de nombreuses vésicules apicales.

* un chorion : tissu conjonctif lâche bien vascularisé, renfermant des replis de l'épithélium donnant un aspect faussement glandulaire : les fausses glandes de Luschka, et au niveau du col des glandes muqueuses.

* une musculeuse : est formée de fibres musculaires lisses plexiformes.

* une séreuse : sur la face non adhérente au foie.

Sur sa face d'accolement au foie, elle est revêtue d'une adventice qui se lie à la capsule hépatique.

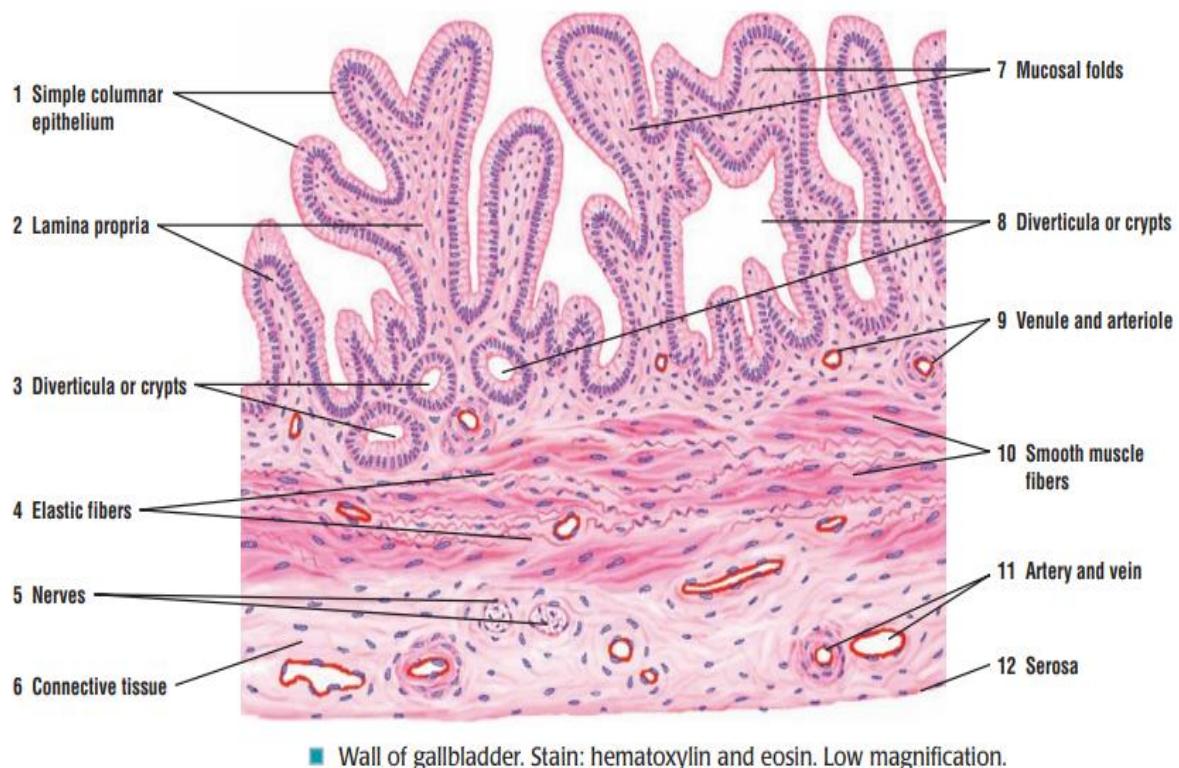


Figure 78: Structure de la paroi de la vésicule biliaire (Eroschenko, 2008).

IV.3. Processus de la digestion

La digestion se fait en 4 étapes essentielles :

- la digestion buccale (mécanique) : Au cours de la mastication, les aliments sont déplacés par la langue, broyés par les dents et mélangés avec de la salive.
- la digestion gastrique
- la digestion intestinale
- l'absorption intestinale : c'est le passage des nutriments vers le milieu intérieur (sang ou lymph).

IV.3.1. Digestion dans la cavité buccale

IV.3.1.1. La préhension des aliments

Chez les bovins, la langue est longue et mobile, elle représente l'organe de la préhension des aliments, les touffes d'herbes et les tiges végétales sont entourées par la langue puis tirées dans la cavité buccale sectionnées par la pression des incisives sur le bourrelet incisif du maxillaire supérieur. La surface de la langue porte des papilles qui ne laissent pas les touffes d'herbe glisser. Ils arrachent l'herbe d'un coup de tête plus qu'ils ne la coupent, ils ne peuvent couper l'herbe plus ras que 2cm.

Les petits ruminants se servent de leurs lèvres très fines et mobiles, pour prendre les aliments, lorsqu'ils broutent l'herbe, ils se servent de leurs incisives inférieures et de leur langue mais à un degré moindre que les bovins. Les incisives des petits ruminants sont très fines et coupantes. Les moutons et les chèvres coupent l'herbe très ras, et de là ils tirent partie des pâturages pauvres.

Pour la préhension des liquides, les bovins comme les équidés pour boire ils n'introduisent que la partie médiane de l'ouverture labiale, ils aspirent le liquide grâce à une dépression réalisée dans la cavité buccale.

IV.3.1.2. La mastication

La mastication résulte de l'action combinée des dents et de la langue. Les dents sont des structures spécialisées pour fonction de déchirer, couper et broyer les aliments. La langue est un organe musculeux puissant et dont la partie antérieure retrouve libre dans la cavité buccale ; cette partie est mobile, elle est constituée des papilles linguales qui ont des fonctions mécaniques ; elles aident au broyage et au malaxage des aliments ainsi qu'au mélange des aliments avec la salive (Boukefoussa, 2023).

La mastication est en fait une succession de contractions des muscles masticateurs dont les plus importants sont les muscles masséters et les muscles temporal.

***Composition et rôle de la salive :** la salive se compose de 99,5 % d'eau et de 0,5 % de solutés (ions tels que le sodium, le potassium, le chlorure et le bicarbonate). La salive contient également quelques gaz dissous et diverses substances organiques (l'urée, l'acide urique, l'albumine et la globuline sériques, la mucine, le lysozyme, une enzyme bactériolytique, et l'amylase salivaire, une enzyme digestive et des phosphates) (Toutain, 2008).

La salive est la première sécrétion digestive. Sa production quotidienne est de 1L chez l'homme, 40L chez le cheval et 200L chez les bovins. Elle débute la digestion de l'amidon par la α -amylase (ptyaline) et la digestion des triglycérides par la lipase linguale. Elle lubrifie, par le mucus, les aliments ingérés et protège la bouche et l'œsophage en diluant et en tamponnant les aliments ingérés.

La salive est produite en grande quantité, elle est hypotonique et a une forte concentration en K^+ et HCO^- 3 et une faible concentration en Na^+ et Cl^- . Elle contient α -amylase, lipase linguale, et Kalékréine.

IV.3.1.3. La déglutition

La déglutition est un processus complexe dont le résultat est le passage du bol alimentaire de la cavité buccale dans le tube digestif. La déglutition comprend une activité volontaire et une activité réflexe elle nécessite la participation des muscles de joues de la langue et des muscles masticatoires du pharynx et de l'œsophage (Boukefoussa, 2023).

On reconnaît trois étapes à la déglutition :

- Une première étape volontaire ; qui est le transfert bol alimentaire depuis la cavité buccale vers le pharynx.
- Une deuxième étape, réflexe, qui est la traversée du pharynx ;
- Une troisième, également réflexe, qui constitue le début du transit œsophagien.

IV.3.2. La digestion gastrique

L'estomac assure une fonction motrice et une fonction de sécrétion du suc gastrique.

IV.3.2.1. La digestion mécanique

L'estomac possède trois couches de muscles lisses : une couche longitudinale, une couche circulaire et une troisième couche oblique.

Les ondes de mélange, qui sont des mouvements péristaltiques modérés et ondulants, se propagent le long de l'estomac toutes les 15 à 25 secondes, quelques minutes après l'entrée des

aliments. Ces ondes macèrent les aliments, les mélangent avec les sécrétions des glandes gastriques et les réduisent en une bouillie appelée chyme.

La région orale de l'estomac est chargée de recevoir le repas ingéré. La région caudale est chargée des contractions qui malaxent les aliments et propulsent le chyme vers le duodénum.

***Le fundus et le corps** : assurent 2 fonctions (Boukefoussa, 2023) :

a) Remplissage progressive : les aliments arrivé de SIO (sphincter œsophagien inférieur), se répartissent en strates plus ou moins concentriques.

b) Stockage : le contact de bol alimentaire avec la paroi déclenche un réflexe qui détend la muscleuse gastrique et permet l'accumulation des aliments avec une pression constante jusqu'à un volume d'aliments de 1,5 litres.

***L'antre** : assure une fonction de brassage et de broyage où les ondes péristaltiques deviennent plus intenses dans cette zone, la disposition des fibres musculaires permet d'obtenir des mouvements de propulsion, de segmentation et de brassage.

***Le pylore** : grâce à des ondes contractile au niveau de pylore, que pylore assure :

-Une fonction anti reflux qui protègent l'estomac de l'effet de détergent des sels biliaires et des enzymes pancréatiques et

-Une fonction régulatrice de vidange gastrique : le contrôle de la vidange gastrique a pour objectif de limiter la quantité d'aliments provenant dans le duodénum en fonction de la capacité de digestion et d'absorption de l'intestin grêle. La présence d'un chyme trop volumineux, trop acide, irritant inhibe la vidange gastrique pour permettre le bon fonctionnement du l'intestin grêle.

IV.3.2.2. La sécrétion du suc gastrique (digestion chimique)

La muqueuse gastrique révèle un épithélium cylindrique simple (cellules à mucus superficielles) contenant un grand nombre d'étroits canaux, appelés fosses gastriques, qui se prolongent jusqu'au chorion. À la base de ces canaux se trouvent les orifices des glandes gastriques, celles-ci contiennent quatre types de cellules sécrétrices :

- les cellules principales,
- les cellules pariétales (bordantes),
- les cellules à mucus
- et les cellules G.

Les trois premiers types de cellules déversent leurs sécrétions dans la lumière de l'estomac, tandis que les cellules G sécrètent l'hormone gastrine dans le sang.

Les cellules principales (zymogéniques) sécrètent :

- Le précurseur de la principale enzyme gastrique, le pepsinogène,

- La lipase gastrique enzyme de moindre importance.

NB : La pepsine est sécrétée sous forme de pepsinogène par les cellules principales de l'estomac. Le pepsinogène est activé en pepsine par les ions H⁺ gastriques. Le pH optimal pour l'activation de la pepsine est compris entre 1 et 3. La pepsine est dénaturée quand le pH est > 5. Elle est inactivée dans le duodénum par la sécrétion de bicarbonates. Elle n'est pas essentielle à la digestion des protéines en hydrolysant les liaisons peptidiques intérieures.

Les cellules pariétales sécrètent (Kolb, 1975) :

- l'HCL, qui intervient dans la conversion du pepsinogène en pepsine, une enzyme active.
 - et le facteur intrinsèque, jouant un rôle dans l'absorption de la vitamine B12 par l'iléon qui est utilisée pour la formation de globules rouges.
- Les cellules à mucus sécrètent du mucus.

L'ensemble des sécrétions des cellules principales, pariétales et à mucus est appelé **suc gastrique**. Sa quantité est environ de 2 000 à 3 000 ml par jour.

Les cellules G, qui sont principalement situées dans l'antre pylorique, sécrètent la gastrine, hormone à l'origine de plusieurs aspects de l'activité gastrique.

*Mécanisme de synthèse et de sécrétion de l'HCL

Les cellules pariétales sécrètent du HCL dans la lumière de l'estomac grâce à des pompes distinctes servant au transport actif pour le Cl⁻ et pour le transport de H⁺ et de K⁺ dans des directions opposées, c'est-à-dire les antiports H⁺/K⁺

Le CO₂ et H₂O sont convertis en H⁺ et HCO⁻₃ par une enzyme, l'anhydrase carbonique.

Le H⁺ est sécrété dans la lumière par la pompe H⁺ -K⁺ -ATPase.

Comme le Cl⁻ est sécrété en même temps que le H⁺, le produit de sécrétion des cellules pariétales est l'HCl. HCO⁻₃, produit dans la cellule est absorbé et rejeté dans le courant sanguin en échange de Cl⁻.

L'ajout des HCO₃ augmente le pH sanguin veineux et aboutit la vague alcaline postprandiale.

Plus tard le HCO₃ retournera dans la lumière du TD par les sécrétions pancréatiques pour neutraliser les H⁺ dans l'intestin.

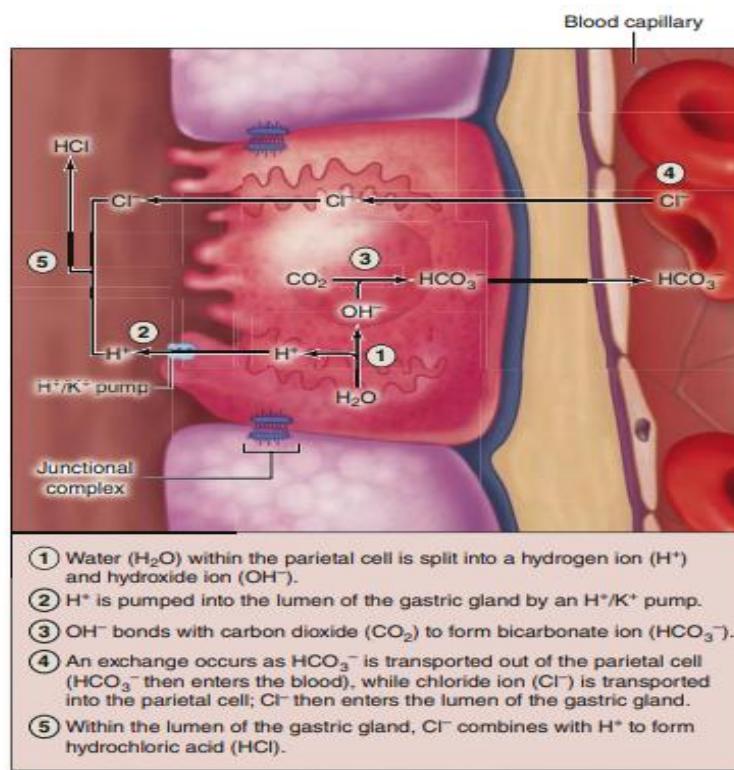


Figure 79 : Synthèse de l'HCl par la cellule pariétale (Mescher, 2016).

L'HCL dénature partiellement les protéines présentes dans la nourriture et stimule la sécrétion d'hormones qui favorise la sécrétion de la bile et de suc pancréatique. Il possède également une forte action bactéricide.

La sécrétion d'HCl par les cellules pariétales est inhibée par un mécanisme de rétroaction à effet négatif. Un faible pH dans l'estomac ($<3,0$) inhibe la sécrétion de gastrine et par conséquent, la sécrétion de H^+ .

Après l'ingestion d'un repas, la sécrétion de H^+ est déclenchée. Une fois le repas digéré et l'estomac vidé, la sécrétion de H^+ qui continue abaisse le pH du contenu gastrique. Quand le pH descend au-dessous de 3.0, la libération de gastrine est inhibée et la rétroaction à effet négatif empêche la sécrétion supplémentaire de H^+ .

L'arrivée du chyme gastrique dans le duodénum inhibe la sécrétion de H^+ soit directement soit par des intermédiaires du GIP (libéré par la présence d'acides gras dans le duodénum) et de la sécrétine (libérée par la présence de H^+ dans le duodénum).

-La digestion enzymatique des protéines : commence dans l'estomac principalement par la pepsine, une enzyme sécrétée par les cellules principales.

La pepsine brise certaines liaisons peptidiques entre les acides aminés qui forment les protéines. Une chaîne protéique formée d'un grand nombre d'acides aminés est donc brisée en petits fragments appelés peptides.

La pepsine assure également la coagulation et la digestion des protéines du lait.

La pepsine est très efficace dans l'environnement très acide de l'estomac (pH 2). Elle devient inactive à un pH plus élevé.

Tout d'abord, la pepsine est sécrétée sous une forme inactive, appelée pepsinogène, pour empêcher la digestion des protéines des cellules principales qui la produisent.

Le pepsinogène ne se transforme en pepsine active qu'au contact de molécules de pepsine active ou d'acide chlorhydrique sécrété par les cellules pariétales. Ensuite, les cellules de l'estomac sont protégées par une couche de mucus alcalin qui recouvre la muqueuse et l'isole des sucs gastriques en formant une barrière de 1 à 3 mm d'épaisseur.

Une autre enzyme de l'estomac, la lipase gastrique, scinde les triglycérides à chaîne courte qui se trouvent dans les matières grasses du lait. Cette enzyme est particulièrement efficace quand le pH est situé entre 5 et 6.

-Sécrétion de mucus : le mucus est un ensemble de mucines (glycoprotéine), phospholipides, eau et électrolytes sécrétés par les mucocytes. Il forme une barrière de protection de la muqueuse gastrique contre les ions H⁺ et la pepsine. Les HCO⁻₃ produits par les mucocytes neutralisent localement les ions H⁺ qui franchissent la barrière et inactivent la pepsine.

IV.3.3. La digestion intestinale

IV.3.3.1. Digestion mécanique

Les mouvements de l'intestin grêle sont de deux types :

- **La segmentation :** elle assure le mélange du chyme et des sucs digestifs, et met les nutriments en contact avec la muqueuse pour qu'ils soient absorbés (se répète de 12 à 16 fois par minute).
- **Le péristaltisme :** propulse le chyme vers l'avant le long du tube digestif (3 à 5 h).

IV.3.3.2. Digestion chimique

La paroi de l'intestin grêle est formée des quatre mêmes tuniques que la plus grande partie du tube digestif.

La muqueuse contient de nombreuses dépressions délimitées par un épithélium glandulaire.

Les cellules qui tapissent ces cavités forment les glandes intestinales (cryptes de Lieberkuhn) et sécrètent le suc intestinal.

La sous-muqueuse du duodénum contient des glandes duodénales (glandes de Brunner) qui sécrètent un mucus alcalin (neutralise l'acidité du chyme gastrique).

Quelques-unes des cellules épithéliales de la muqueuse sont des cellules caliciformes qui sécrètent, elles aussi, du mucus (Laborie, 2017).

La muqueuse est recouverte d'un épithélium cylindrique simple et renferme

- des cellules absorbantes,
- des cellules caliciformes,
- des cellules entéro-endocrines
- et des cellules de Paneth (sécrètent du lysozyme, une enzyme bactéricide, également capable de phagocytose pour réguler la population bactérienne).

Pour finaliser la digestion qui a déjà commencé au niveau de l'estomac, l'intestin grêle est le lieu de rencontre de trois sucs digestifs :

- le suc intestinal
- le suc pancréatique
- la sécrétion biliaire

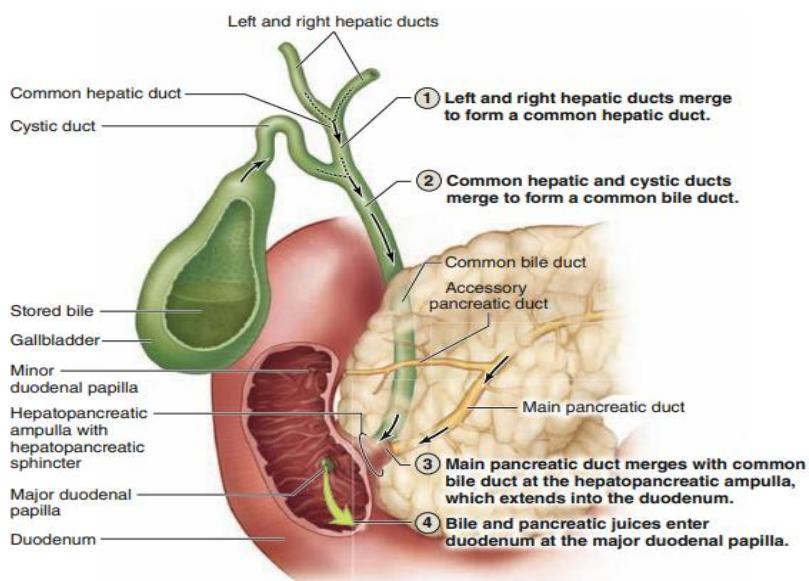


Figure 80 : Duodénum : lieu de rencontre des sécrétions digestives (Mescher, 2016).

IV.3.3.2.1. Le suc intestinal et les enzymes de la bordure en brosse

Le suc intestinal est un liquide jaune clair sécrété au rythme de 1 à 2 l par jour. Il est légèrement alcalin (son pH est de 7,6) et il renferme de l'eau et du mucus.

Le suc pancréatique et le suc intestinal fournissent ensemble un véhicule destiné à l'absorption des substances contenues dans le chyme lorsqu'elles entrent en contact avec les villosités.

Les cellules épithéliales absorbantes qui tapissent les villosités synthétisent plusieurs enzymes digestives, appelées enzymes de la bordure en brosse, et les introduisent dans la membrane plasmique des microvillosités.

- quatre enzymes assurent la digestion des glucides : la dextrinase, la maltase, la sucrase (saccha-rase) et la lactase.
- des enzymes capables de digérer les protéines, les peptidases (aminopeptidases et dipeptidases)

- deux types d'enzymes capables de digérer les nucléotides, les nucléosidases et les phosphatases.

IV.3.3.2.1.2. Le suc pancréatique

C'est un fluide incolore visqueux à pH alcalin (7.1 à 8.2 chez le chien, 7.6 à 8.4 chez les bovins) produit en grand volume (6L chez les bovins et le chien). Il est isotonique contenant de fortes concentrations en HCO_3^- , plus fortes que celles du plasma dont la fonction est de neutraliser le contenu du duodénum. Il contient également :

- quelques enzymes capables de digérer les protéines « des protéases » : la trypsine, la chymotrypsine et la carboxypeptidase ;
- une enzyme capable de digérer les glucides, l'amylase pancréatique ;
- la principale enzyme chargée de digérer les triglycérides chez l'adulte, la lipase pancréatique
- et des enzymes capables de digérer les acides nucléiques : la ribonucléase et la désoxyribonucléase.

NB : Les enzymes pancréatiques capables de digérer les protéines sont produites sous une forme inactive. **La trypsine**, l'enzyme active, est sécrétée sous une forme inactive appelée **trypsinogène**. Son activation est effectuée dans l'intestin grêle lorsque le chyme entre en contact avec l'enzyme activatrice, **l'entérokinase**, sécrétée par la muqueuse intestinale.

La chymotrypsine est activée dans l'intestin grêle par la trypsine à partir de sa forme inactive, **le chymotrypsinogène**.

La carboxypeptidase est également activée dans l'intestin grêle par la trypsine. Sa forme inactive est appelée **procarboxypeptidase**.

La sécrétion du suc pancréatique est sous la commande neuro-hormonale :

• **La sécrétine** : sécrétée par les cellules « S » du duodénum agit sur les cellules canaliculaires du pancréas pour accroître la sécrétion de bicarbonates. Ainsi, quand l'estomac fournit des ions H^+ au duodénum, il y a libération de sécrétine qui provoque la sécrétion de HCO_3^- dans la lumière duodénale, ce qui neutralise les ions H^+ .

• **La cholécystokinine « CCK »** : La stimulation vagale et la présence d'acides gras et d'acides aminés dans l'intestin grêle stimulent la sécrétion de cholécystokinine dans le sang. Elle est sécrétée par les cellules du duodénum = cellules I, stimule les sécrétions exocrines de l'intestin (molécules qui vont digérer les aliments). Elle agit sur les cellules des acini pancréatiques pour augmenter la sécrétion d'enzymes (amylase, lipase, protéase). La CCK potentialise l'action de la sécrétine sur les cellules canaliculaires pour stimuler la sécrétion de bicarbonates.

IV.3.3.2.1.2.3. La bile

C'est la sécrétion exocrine du foie, un fluide jaune-vertâtre, neutre (pH compris entre 7 et 8,5) qui participe à la digestion des graisses. Produite en continu par le foie à raison de 0,5 à 1 L par jour et stockée dans la vésicule biliaire. Elle est composée de (Laborie, 2017):

- Eau: 97% (sang)
- Électrolytes: surtout HCO_3^- neutralisant l'acidité duodénale
- Sels biliaires : cycle entéro-hepatique 6 à 10 fois/24H (foie)
- Acides biliaires (l'acide cholique et l'acide chénodésoxycholique)
- Leucithine et cholestérol (foie)
- Déchets : Produits de dégradation de l'hémoglobine : pigments biliaires (bilirubine) (donnant à la bile sa couleur).

Rôle de la bile dans la digestion

- La bile neutralise le chyme gastrique acide, grâce à des ions bicarbonates.
- Augmentation du pH duodénale ce qui favorise l'action des enzymes pancréatiques.
- Les sels biliaires et les acides biliaires jouent un rôle dans l'émulsification « formation de micelles », la dégradation de volumineux globules de graisses en une suspension de fines gouttelettes graisseuses, d'environ 1 ppm de diamètre, et dans l'absorption des graisses après leur digestion. Ils stimulent aussi la lipase pancréatique
- Elle favorise l'absorption des lipides par l'intestin grêle.

La bile est produite en continu et est stockée dans la vésicule biliaire. Relâchée sous l'action du sympathique, le sphincter d'Oddi étant fermé. La bile est concentrée par réabsorption de H_2O , Na^+ et Cl^- par les cellules épithéliales. Au cours des repas, la vésicule biliaire se contracte et le sphincter d'Oddi se relâche sous l'action du SNA parasympathique et la CCK.

IV.3.4. L'absorption au niveau de l'intestin grêle

Les glucides, les protéines et les lipides sont digérés et absorbés dans l'intestin grêle. La surface offerte à l'absorption dans l'intestin grêle est considérablement augmentée par la présence de la bordure en brosse.

L'enterocyte est la cellule absorbante, sa membrane plasmique au pôle apical a une bordure en brosse faite de microvillosités. Elles incluent les enzymes et les transporteurs selon une « mosaïque fluide ».

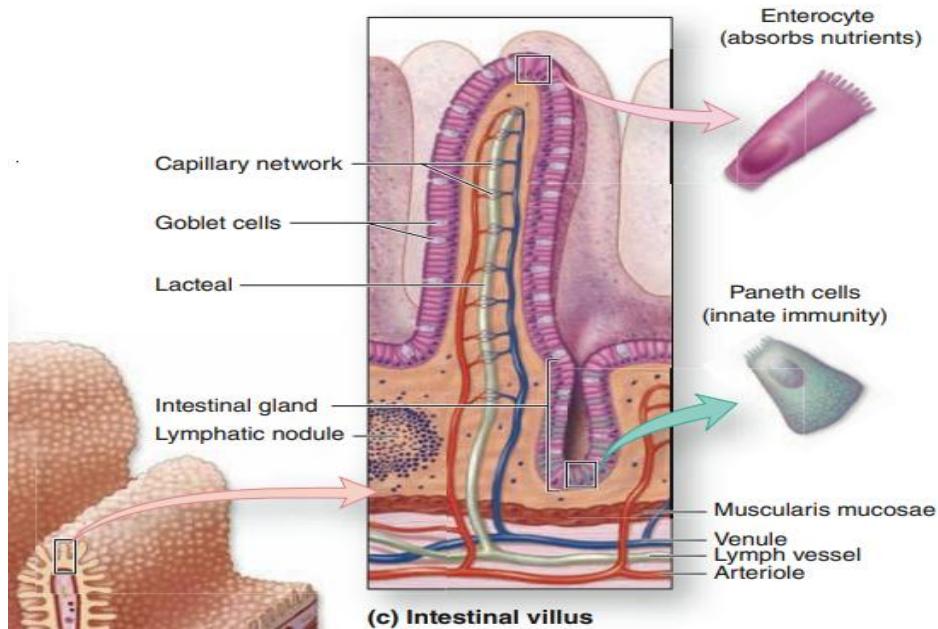


Figure 81: Les villosités intestinales (Mescher, 2016).

IV.3.4.1. Absorption des glucides

La digestion des glucides est complétée avant qu'ils entrent dans l'entérocyte (Richard, 2014).

- Lumière intestinale : l'amidon y est transformé en oligomères de glucose grâce à l'amylase salivaire et pancréatique.
- Bordure en brosse : plusieurs enzymes interviennent sur les différents types de sucre afin de les dégrader en glucose, en fructose ou en galactose :
 - Sucrase : Elle dégrade le sucre en glucose et en fructose.
 - Glucoamylase : Elle transforme les oligomères de glucose en glucose.
 - Lactase : Elle transforme le lactose en glucose et en galactose.

Le glucose et le galactose sont absorbés, à partir de la lumière intestinale, dans les cellules par un co-transport actif secondaire dépendant de Na qui se fait dans la membrane lumineuse. Le sucre est remonté vers le haut et le Na est descendu. Ils sont ensuite transportés de la cellule vers le sang par une diffusion facilitée (Kellali, 2022).

La pompe Na-K ATPase de la membrane basolatérale garde le Na intracellulaire à une faible valeur, maintenant ainsi le gradient Na à travers la membrane lumineuse.

Le fructose est exclusivement absorbé par diffusion facilitée. Il ne peut pas, par conséquent, être absorbé par un gradient de concentration.

La digestion des carbohydrates s'effectue dans la lumière intestinale
et sur la bordure en brosse

Les monosaccharides sont absorbés du côté apical et basolatéral des entérocytes par des transporteurs spécifiques

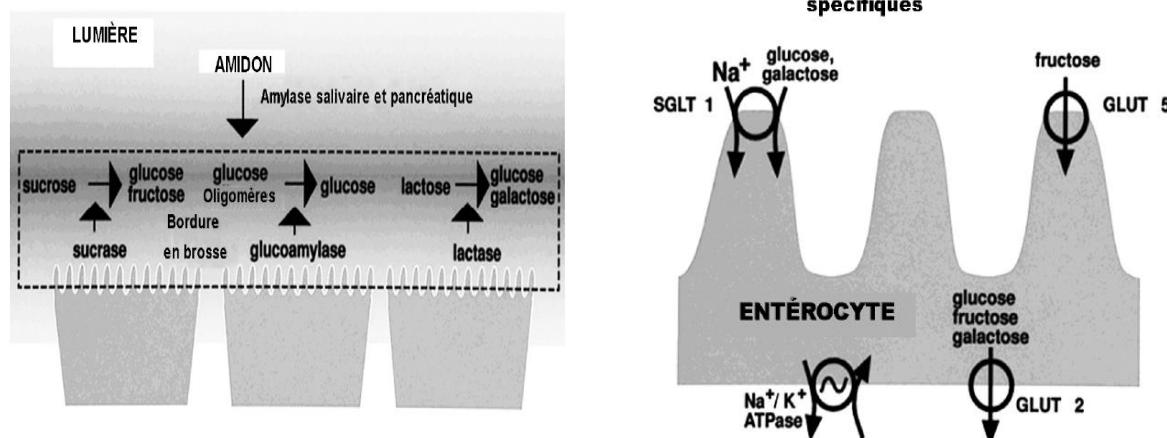


Figure 82 : Digestion et absorption des glucides (Richard, 2014).

IV.3.4.2. Absorption des protéines

La digestion des protéines débute dans l'estomac grâce à la pepsine et elle se poursuit dans l'intestin. Les protéines digérées ne proviennent pas uniquement de l'alimentation, mais également des enzymes présents dans la lumière intestinale et des débris cellulaires. La digestion de ces protéines s'effectue à 3 niveaux dans l'intestin (Richard, 2014):

- Lumière intestinale : la digestion s'y fait principalement grâce aux enzymes protéolytiques du pancréas. Les protéines sont transformées en oligopeptides et en une petite proportion d'acides aminés.
- Bordure en brosse : les peptidases de la bordure en brosse dégradent les oligopeptides en dipeptides et en tripeptides.
- Cytoplasme des entérocytes : les dipeptides et les tripeptides sont ensuite hydrolysés en acides aminés dans l'entérocyte par la peptidase cytoplasmique.

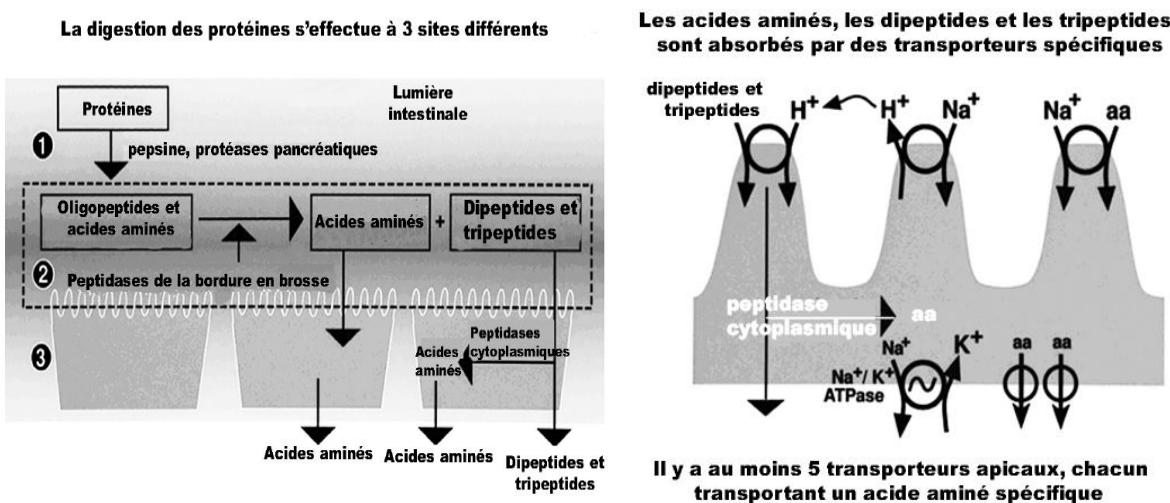


Figure 83: Digestion et absorption des protéines (Richard, 2014).

*Transport des peptides de la lumière intestinale au cytoplasme des entérocytes

Le côté basal (côté opposé à la lumière intestinale) présente des pompes Na+/K+ ATPase qui rejettent le Na+ hors de la cellule et internalise le K+. Ceci crée un gradient de concentration favorable à l'entrée du Na+ par le côté apical (côté près de la lumière intestinale) de l'entérocyte. Le Na+ peut pénétrer dans l'entérocyte de 2 manières (Richard, 2014) :

- Par un cotransporteur Na+/acides aminés qui internalise un acide aminé en même temps qu'un ion Na+ (il existe au moins 5 cotransporteurs selon l'acide aminé).
- Par une pompe Na+/H+ qui fait sortir un H+ pour chaque Na+ qui pénètre dans l'entérocyte. Le H+ ainsi expulsé de la cellule ne s'accumule pas dans la lumière intestinale, car il retourne dans l'entérocyte par électrotraction (l'intérieur de l'entérocyte est négatif) entraînant avec lui les dipeptides et les tripeptides grâce à un cotransporteur.

IV.3.4.3. Absorption des lipides

Les micelles portent les produits de la digestion des lipides au contact de la surface d'absorption des cellules intestinales. Puis, les acides gras, les monoglycérides et le cholestérol diffusent vers l'intérieur des cellules à travers la membrane lumineuse. Le glycérol hydrophile n'est pas contenu dans les micelles.

Une fois arrivées au niveau de la bordure en brosse, les micelles se vident de leur contenu à proximité du côté apical de l'entérocyte. Les lipides pénètrent ensuite dans les cellules intestinales par diffusion. Une fois à l'intérieur, le cholestérol est estérifié à nouveau et les acides gras se lient aux 2-monoacylglycérols pour reformer des TG. Ces 2 groupes de molécules sont incorporés dans les chylomicrons qui pénètrent dans la circulation lymphatique.

IV.3.5. L'absorption dans le gros intestin et la formation des fèces

Après être resté dans le gros intestin pendant environ 3 à 10 h, le chyme forme une masse solide ou semi-solide, surtout à cause de l'absorption d'eau.

A ce stade, il porte le nom de fèces ; formées

- d'eau,
- de sels inorganiques,
- de débris en provenance des cellules épithéliales de la muqueuse du tube digestif,
- de bactéries,
- de produits de la décomposition bactérienne et de nourriture non digérée.

L'absorption d'eau joue un rôle important dans le maintien de l'équilibre hydrique, toute l'eau qui pénètre dans le gros intestin (de 0,5 à 11 chez l'homme) est absorbée, sauf une quantité approximative de 100 à 200 ml.

L'absorption est maximale dans le caecum et le côlon ascendant.

Le gros intestin absorbe aussi des électrolytes, dont le sodium et le chlorure, et quelques vitamines.

IV.6. Particularités digestifs chez les polygastriques « ruminants »

La digestion est réalisée grâce à des enzymes cellulolytiques que les micro-organismes du rumen, du réseau et du gros intestin peuvent sécréter. La présence de la dégradation microbienne dans les pré-estomacs avant la dégradation chimique par les sécrétions gastriques dans la caillette modifie fortement la digestion et l'utilisation des aliments par les ruminants par rapport aux monogastriques. A cet effet, la digestion met en jeu des phénomènes mécaniques, microbiens et chimiques.

IV.6.1. Les phénomènes mécaniques : sont résumés en trois étapes majeurs

IV.6.1.1. Le broyage : par l'intervention de deux types de mastication :

- **La mastication ingestive** : cette mastication sert à la fragmentation des aliments mais de manière incomplète. Elle est réalisée grâce à des mouvements rapides des mâchoires (125 à 150 mouvements par minute chez les petits ruminants). Elle dure environ 8 heures par jour avec une mastication rapide au cours de laquelle les aliments s'entassent dans le rumen.

- **La mastication mérycique ou rumination** : c'est l'acte par lequel les aliments stockés dans le rumen et le réseau subissent une seconde mastication et une nouvelle insalivation. Elle est indispensable pour le bon déroulement des phénomènes biochimiques.

IV.6.2. La digestion microbienne

La population bactérienne du rumen est comprise entre 8×10^9 et 4×10^{10} /ml de contenu ruminal, elle constitue 50% de la biomasse microbienne et c'est la catégorie la plus complexe et la plus importante. Différentes espèces bactérienne sont présentes dans le rumen. Plus de 300 espèces bactériennes sont connues et sont généralement des anaérobies strictes non sporulées. Elles représentent la flore la plus performante pour digérer la cellulose des fourrages compte tenu de leur nombre dans le rumen. Les bactéries se fixent par leur glycocalyx aux fragments végétaux. L'attaque se fait par érosion des surfaces endommagées et la surface bactérienne s'enfonce alors dans la paroi végétale. En effet, sur les parois intactes, les différents polymères glucidiques ne peuvent pas se lier à la surface bactérienne en raison de leur faible concentration, de leur liaison avec d'autres composants ou de leur configuration stérique incompatible avec les polymères extrêmes de la surface bactérienne.

Les protozoaires sont des eucaryotes unicellulaires, mobiles grâce à leurs cils et leurs flagelles. Parmi les ciliés on distingue, les ***holotriches*** qui fermentent les sucres solubles, les fructosanes ainsi que les grains d'amidon de petite taille et ils stockent l'excédent sous forme d'amylopectine, et les ***entodiniomorphes*** qui participent également dans la dégradation de la cellulose, l'hémicellulose, et les substances pectiques. Les flagellés se trouvent en concentration plus faible, 10³ à 10⁴ cellule/ml. Ce sont des organismes pouvant ingérer des bactéries.

La stratégie d'attaque de tissus végétaux par les protozoaires est différente de celle des autres microorganismes du rumen. Les protozoaires ciliés entodiniomorphes possèdent l'essentiel des enzymes impliquées dans la cellulolyse. Ils ingèrent les fibres, les mettant ainsi en contact étroit avec les enzymes dans le sac digestif, puis ils les digèrent dans leurs vacuoles digestives. Les champignons du rumen sont anaérobies stricts et se fixent sur les particules végétales et les crampons appelés rhizoïdes. Ils représentent 8% de la biomasse microbienne total du rumen. Tous les champignons sont presque des cellulolytiques et leurs cellulases sont les plus actives. Ils peuvent utiliser plusieurs variétés de glucide autant que source d'énergie, comme la cellulose, le cellobiose et le maltose. Certaines souches peuvent même utiliser l'amidon.

IV.6.2.1. Les phénomènes chimiques

Les principaux phénomènes chimiques sont dus à des sécrétions digestives. Ces sécrétions contiennent d'une part des enzymes intestinales (pepsine, amylase pancréatique, lipase, trypsine, protéase, nucléase,...), d'autre part des substances non enzymatiques: acide chlorhydrique de la caillette, la bile et le mucus produit en différents segments du tube digestif (caillette, intestin).

L'intérêt de ces phénomènes (mécaniques, microbiens et chimiques) est la dégradation et la transformation des aliments aux nutriments simples facilement utilisable par l'hôte et les microorganismes.

IV.6.3. Digestion dans le rumen-réseau

IV.6.3.1. Digestion des glucides

Grâce à un extraordinaire équipement enzymatique, la population microbienne (cellulase, hémicellulase, des pectinases, des amylases...) du rumen-réseau hydrolyse tous les glucides en oses (hexoses ou pentoses).

Les glucides solubles sont hydrolysés de manière très rapide et en totalité (amidon des céréales est dégradé à 90-95% dans le rumen par une amylase bactérienne). Les glucides pariétaux (cellulose, hémicelluloses et pectines) sont dégradés en oses. Les sucres libérés par hydrolyse vont être absorbés et ensuite fermentés en anaérobiose et les produits terminaux de cette fermentation sont,

-Les acides gras volatils (AGV): essentiellement l'acide acétique, l'acide propionique et l'acide butyrique, dont les proportions dépendent de la nature des glucides alimentaires.

-Le gaz carbonique et le méthane.

Les acides gras volatils, issus de la fermentation ruminale, sont absorbés dans le sang surtout à travers la paroi du rumen. Ils constituent la principale source d'énergie pour l'animal hôte puisqu'ils fournissent de 70 à 80% de l'énergie totale absorbée chez le ruminant. Par opposition, le monogastrique tire son énergie essentiellement du glucose et des lipides alimentaires absorbés au niveau de l'intestin grêle.

IV.6.3.2. Digestion des matières azotées

Les matières azotées alimentaires dans le rumen sont d'abord hydrolysées en peptides, puis acides aminés, ensuite sont désaminés en ammoniac « NH₃ », qui est le produit terminal de la protéolyse microbienne. La résistance à la dégradation ruminale varie fortement en fonction de la nature de l'aliment. En général, les protéines des fourrages sont plus dégradées (60 à 80%) que celles des concentrés (20 à 60%). L'ammoniac formé est soit utilisé par la population microbienne, ou, passe vers le foie où il est convertit en urée. L'absorption de l'ammoniac est conditionnée par sa concentration dans le rumen (50 à 80 mg/ 100 ml de jus de rumen), et par le pH du rumen (pH élevé, absorption rapide) (Gadoud et al., 1992).

Au niveau intestinal, en moyenne, 60% des acides aminés absorbés dans l'intestin grêle proviennent des bactéries ruminales, et les 40% qui restent sont les protéines alimentaires qui ont échappé à la dégradation ruminale. En général, plus de 80% des protéines qui arrivent dans l'intestin sont digérées ; le reste passe dans les matières fécales.

IV.6.3.3. Digestion des lipides

La majorité des lipides alimentaires ne sont pas digérés, mais ils sont hydrolysés complètement et quasi totalement par des lipases extracellulaires secrétées par des souches bactériennes lipolytiques (comme *Anaerovibrio lipolytica*). Cette hydrolyse permet la libération de glycérol et des acides gras. Le glycérol fermenté rapidement en AGV principalement le propionate et le butyrate. Pour les acides gras, une partie est utilisée par les bactéries pour la synthèse des phospholipides de la membrane bactérienne. En plus, les bactéries hydrogénisent les acides gras pour former des acides gras saturés. L'autre partie des acides gras semble être catabolisée et/ou absorbée à travers la paroi ruminale (Gadoud et al., 1992).

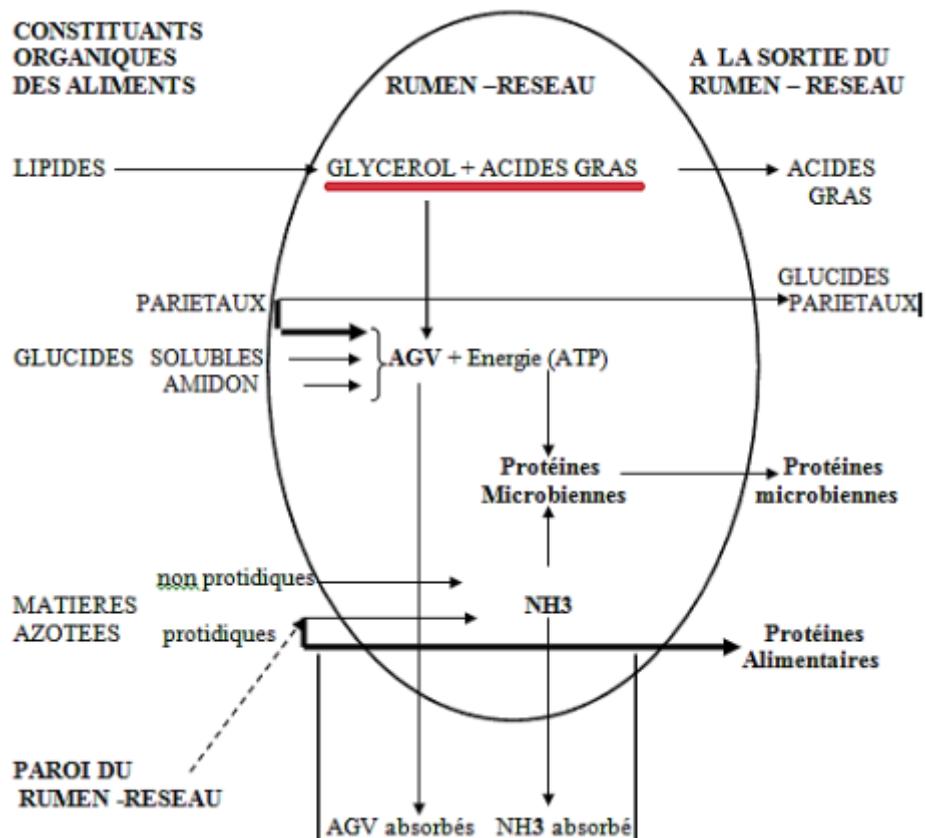


Figure 84 : Dégradation des constituants organiques alimentaires dans le rumen-réseau (Gadoud et al., 1992).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aurélie V (2007). Physiologie animale. Université D'Auvergne Institut Universitaire de Technologie de Clermont-Ferrand Antenne Aurillac Département Génie biologique. 62P.
- Barone R (1984).** Anatomie comparée des mammifères domestiques ; Splanchnologie/ Appareil digestif/Appareil respiratoire.2^{ème} édition Paris Vigot.879P
- Bautz AM, Bautz A (2015).** Mini manuel de biologie animale. Editions Dunod, Paris. 224P.
- Beaumont A, Dauça M, Truchot JP et Cassier P (2004). Biologie et physiologie animale : cours et questions de révisions. Dunod Édition, Paris. 512P.
- Cummings B (2001). La vascularisation du rein https://www.researchgate.net/profile/Mathias_Strupler/publication/45378382/figure/fig26/AS:669532624535576@1536640425537/La-vascularisation-du-rein-source-Benjamin-Cummings-Addison-Wesley-Longman.ppm.
- Belarbi AN (2019).** Cours d'Histologie 2^{ème} année medecine « Le foie » ; Service d'Histologie-Embryologie, Université d'Oran ; 15P.
- Bennacer S (2023).** Cours d'histologie FOIE ET VOIES BILIAIRES 2éme année de Médecine ; Université de Constantine ; 8P.
- Boukeffoussa Z (2023).** Physiologie de la digestion L3ANP ; Université de Chlef ; 22P.
- Catala M, André JM, Katsanis G, Poirier J (2007).** Histologie : organes, systèmes et appareils. Cours faculté de medecine ; Université Pierre et Marie Curie. 102P.
- Dupuis G (2015). La ventilation et les échanges gazeux (https://images.slideplayer.fr/33/10476754/slides/slide_2.jpg).
- Eroschenko VP (2008).** Atlas of histology with functional correlations 11th edition; Lippincott Williams & Wilkins. 552P.
- Foucquier A (2011).** Dynamique du transport et du transfert de l'oxygène au sein de l'acinus pulmonaire humain ; Thèse présentée pour obtenir le grade de docteur de l'école polytechnique Spécialité : Physique. HAL Id: pastel-00568656<https://pastel.hal.science/pastel-00568656>.
- Frayon S (2012).** Physiologie cardiovasculaire : Sang, cœur et vaisseaux. Université de la nouvelle Calédonie. 49P.
- Gadoud, R.; Joseph, M.M.; Jussiau, R.; Lisberney, M.J.; Mangeol, B.; Montméas, L.; Tarrit, A. (1992).** Nutrition et alimentation des animaux d'élevage. Tome 2. Fourcher Editeur. pp 222.
- Hall J.B., Silver S (2014).** Nutrition and Feeding of the Cow-Calf Herd: Digestive System of the Cow. Virginia Cooperative Extension.10 : 1-2.
- Montméas L., Tarrit A. (1992).** Nutrition et alimentation des animaux d'élevage.Tome 2, les éditions Foucher, Paris, p: 191-211.
- Gilles R (2006).** Physiologie animale ; Editions de Boeck université-Bruxelles.Belgique. 207P.
- Hilber P (2012).** Physiologie animale. Editions de Boeck université-Bruxelles.Belgique. 79P.
- Jacobs H (2016).** Le cœur son fonctionnement et ces cellules. https://cdn.futura-sciences.com/buildsv6/images/mediumoriginal/c/e/6/ce651728d5_28587_10400_image013.jpg
- Kolb E (1975).** Physiologie des animaux domestiques.Vigot frères éditions-Paris. 974p.
- Kellali N (2022). Cours de physiologie de la digestion
- Laborie C (2017).** Physiologie de la nutrition. Chapitre II : description et fonctionnalité du tractus gastro-intestinal. 36P
- Mansour DH (2015). Polycopié de cours « Histologie de l'appareil digestif et ces glandes annexes ; Univ de Constantine ; 73P.
- Marieb E N (1993).** Anatomie et physiologie humaine. 2ème édition. Editions de Boeck supérieur université-Bruxelles. Belgique. 1014P.
- Martini FH, Timmons MJ, Tallitsch RB.** (2012). Human Anatomy. (7th Édition). San Francisco: Pearson Benjamin Cummings.
- Mescher AL (2016).** Junqueira's Basic Histology 14th edition, McGraw-Hill Education 573 P.

- Menche N (2017).** Biologie Anatomie Physiologie 6ème édition. Maloine Editions. 424P.
- Michaud MP (2014).** Les systèmes respiratoire et circulatoire. <https://cdn.thinklink.me/api/image/618830513620123648/1240/10/scaletowidth>
- MLIH M (2012).** Implication de LRP1 et ShcA dans deux pathologies cardiovasculaires : l'athérosclérose et l'insuffisance cardiaque. Pour obtenir le grade de : Docteur de l'Université de Strasbourgpp136. file:///C:/Users/Admin/Downloads/Implication_of_LRP1_and_ShcA_in_two_cardiovascular.pdf
- Muller A (2017).** Anatomie et physiologie en fiches pour les étudiants en IFSI. Elsevier Masson. 568P.
- Netter FH (2012).** Atlas of humain anatomy 5th edition; Publisher: Elsevier Health Sciences, pp 425.
- Ovalle WK and Nahirney PC (2013).** Netter's Essential Histology: with Student Consult Access (Netter Basic Science). ISBN-13. 978-1455706310 · Edition. 2nd · Publisher. Saunders.
- Pucelle E, Zahm J-M, Coraux C, Abely M, Maurin P (2011).** Physiopathologie et physiologie de l'épithélium respiratoire : structure et fonctions. Flammarion.
- Reece W.O. (2009).** Functional Anatomy and Physiology of Domestic Animals, 4th edn. Wiley-Blackwell, Ames, IA.
- Reece WO, Erickson HH, Goff JP, Uemura EE (2015).** Dukes' physiology of domestic animals. – 13th edition, Publisher by by John Wiley & Sons, Inc pp 763.
- Richard D (2013).** Neurosciences. Editions Dunod, Paris. 30P.
- Richard D (2014).** Physiologie digestive. 29P
- Rohen JW, Yokochi C, Lütjen-Drecoll E (2011).** Color Atlas of Anatomy 7th edition, Lippincott Williams & Wilkins, a Wolters Kluwer business pp 548.
- Sacchi R, Galeotti P, Fasola M, and Gerzeli G (2004).** Larynx Morphology and Sound Production in Three Species of Testudinidae. JOURNAL OF MORPHOLOGY 261:175–183 (2004).
- Schatz P (2019).** Anatomy and Physiology, an OpenStax resource, licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY) license; Rice University. <https://philschatz.com/anatomy-book/contents/m46597.html>.
- Schenk MP, Smith DG (2001).** Dissection Guide & Atlas to the Rat: Morton Publishing Company.
- Sherwood L (2005).** Physiologie humaine Editions deBoeck supérieur université-Bruxelles. Belgique. 750P.
- Sherwood L, Klandorf H et Yancey PH (2016).** Physiologie animale. Editions deBoeck supérieur université-Bruxelles. Belgique. 757P.
- Stenfeldt Carolina and Arzt Jonathan (2020).** The Carrier Conundrum; A Review of Recent Advances and Persistent Gaps Regarding the Carrier State of Foot-and-Mouth Disease Virus. Pathogens, 9, 167 ; doi:10.3390/pathogens9030167
- Tanguy S (2011).** Bases de physiologie cardivascular. Département STAPS – Université d'Avignon et des pays de Vaucluse. 31P.
- Tortora GJ, Derrickson B (2017).** Manuel d'anatomie et de physiologie humaine. Editions deBoeck supérieur université-Bruxelles. Belgique. 824P.
- Toutain PL (2008).** La physiologie digestive, vue générale.
- Vincke G, Depiereux E, Thibaut R, Raes M, Lepièce D, Troussart JP ().** Atlas d'Histologie humaine et animale (<http://webapps.unamur.be/umdb/histohuma/>)

Wikipedia.org (2014). Cited in : Youenn Alexandre. Développement d'une application oropharyngée de lactobacilles pour lutter contre les infections respiratoires à *Pseudomonas aeruginosa*. Bactériologie. Université de Bretagne occidentale - Brest, 2014. Français. ffNNT : 2014BRES0046

Wehner R et Gehring W (1999). Biologie et physiologie animales Bases moléculaires, cellulaires, anatomiques et fonctionnelles. Editions deBoeck supérieur université-Bruxelles. Belgique. 844P.

SITES INTERNET

Anonyme 1: http://static1.assistancescolaire.com/t/images/tst2s_bio_01i02.png

Anonyme2 : https://patricehardouin.canoprof.fr/eleve/HR/2_STHR/Grandes_fonctions_eleve/activities/Grandes_fonctions.xhtml#).

Anonyme3 : https://www.google.com/search?sca_esv=7065ff04b747ac94&q=histologie+du+nephron&tbo=isch&source=lnms&sa=X&ved=2ahUKEwi6prmd0u6FAxXMSPEDHcRsBTgQ0pQJegQIDB
AB&biw=1360&bih=600&dpr=1#imgrc=zXg2NcPMsv-LfM).

Anonyme 4: <https://parlonssciences.ca/ressources-pedagogiques/documents-dinformation/la-digestion-chez-les-animaux>).

Anonyme5: https://www.google.com/search?sca_esv=33d761b251b7bc29&q=HISTOLOGIE+du+gr
os+intestin&tbo=isch&source=lnms&sa=X&ved=2ahUKEwiyvtaTwp-GAxUyQvEDHQnuCOYQ0pQJegQICxAB#imgrc=TWIRB9hNYjrnEM