
ANATOMIE FONCTIONNELLE COMPAREE DE L'ANGLE IRIDO-CORNEEN DU CHIEN ET DE L'HOMME

THESE
pour obtenir le grade de
DOCTEUR VETERINAIRE

DIPLOME D'ETAT
*présentée et soutenue publiquement en 2006
devant l'Université Paul-Sabatier de Toulouse*

par

Thomas Patrick DULAURENT
Né le 20 avril 1981 à MARSEILLE (Bouches-du-Rhône)

Directeur de thèse : Monsieur le Professeur Alain REGNIER

JURY

PRESIDENT :
M. Jean Louis ARNE

Professeur à l'Université Paul Sabatier de TOULOUSE

ASSESEUR :
M. Alain REGNIER
M. Jean SAUTET

Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE
Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

MEMBRE INVITE
Mme Isabelle RAYMOND

Maître de Conférences de l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

L' Anatomie de l'Oeil

*L'œil est dans un château que ceignent les frontières
De ce petit vallon clos de deux boulevards,
Il a pour pont-levis les mouvantes paupières,
Le cil pour garde-corps, les sourcils pour remparts.*

*Il comprends trois humeurs, l'aqueuse, la vitrée,
Et celle de cristal qui nage entre les deux,
Mais ce corps délicat ne peut souffrir l'entrée
A cela que nature a fait de nébuleux.*

*Six tuniques tenant notre œil en consistance
L'empêchent de glisser parmi ses mouvements,
Et les tendons poreux apportent la substance
Qui le garde, et nourrit tous ses compartiments.*

*Quatre muscles sont droits, et deux autres obliques,
Communicant à l'œil sa prompte agilité,
Mais par la liaison qui joint les nerfs optiques,
Il est ferme toujours dans sa mobilité.*

*Bref l'œil mesurant tout d'une même mesure,
A soi même inconnu, connaît tout l'univers,
Et conçoit dans l'enclos de sa ronde figure
Le rond et le carré, le droit et le travers.*

*Toutefois ce flambeau qui conduit notre vie
De l'obscur de ce corps emprunte sa clarté.
Nous serons donc ce corps, vous serez l'œil, Marie,
Qui prenez de l'impur votre pure beauté.*

Pierre de MARBEUF.

*Le rire est dans le cœur,
Le mot, dans le regard.*

Jacques BREL.

REMERCIEMENTS

A notre président de thèse,

Monsieur le Professeur Jean-Louis ARNE

Professeur des Universités

Praticien hospitalier

Ophthalmologie

Qui nous a fait l'honneur d'accepter la présidence de notre jury de thèse,

Hommages respectueux

A notre jury de thèse,

Monsieur le Professeur Alain REGNIER

Professeur de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse,

Ophthalmologie

Qui a accepté de reprendre la direction de ce travail, nous a guidé et conseillé avec beaucoup de patience.

Hommages respectueux.

Monsieur le Professeur Jean SAUTET

Professeur de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse,

Anatomie, embryologie

Qui a suivi la réalisation de cette thèse avec enthousiasme et a accepté de faire partie du jury.

Hommages respectueux.

Madame le Docteur Isabelle RAYMOND-LETRON

Maître de Conférences de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse,

Anatomie pathologique, histologie

Qui nous a soutenu et conseillé avec une disponibilité exemplaire et un intérêt manifeste pour ce travail.

Hommages respectueux.

A mes parents,

A Maman pour ton soutien indéfectible et permanent, pour ta confiance et ta patience depuis 24 années,

A Papa pour m'avoir fait tomber dans la marmite de l'Ophtalmologie étant petit, pour m'avoir encouragé à être meilleur et à persévérer,

A votre Amour constant et invariable.

A Emilie,

A toi sans qui je serais un hère aujourd'hui. Merci pour ta patience, ta complicité et tes encouragements quotidiens,

A ton amour.

A Monsieur le Professeur Alain REGNIER, mon Maître,

Pour votre passion de l'Ophtalmologie que vous savez transmettre avec un talent singulier,

Pour votre érudition inépuisable, votre gentillesse et votre disponibilité sans faille,

Pour l'honneur que vous me faites de me permettre de travailler à vos côtés,

Merci.

A Monsieur le Docteur Laurent MONNEREAU,

Pour m'avoir guidé depuis toujours et m'avoir donné de si précieux conseils,

Pour l'honneur que tu me fais de me compter parmi tes amis.

A mon Frère Erwan et ma Sœur Anne-Maïmiti,

Pour m'avoir supporté et épaulé pendant ces longues années,

Pour votre bonne humeur et tous ces bons moments passés et à venir.

A mon ami Julien,

Pour ton intelligence, ton mauvais caractère et toutes tes passions qui sont aussi les miennes.

A Monsieur le Docteur Guillaume CAZALOT,

Pour cette merveilleuse année passée à tes côtés,

Pour tes connaissances incroyables, ta disponibilité et ton flegme légendaire,

Pour ces matchs de badminton endiablés (que je te laissais gagner..., parfois).

Pour le Russe Blanc.

A Madame le Docteur Isabelle RAYMOND-LETRON,

Pour ces leçons d'histologie oculaire instructives et passionnantes,

Pour votre aménité quotidienne.

Aux Parents GUILLOT,

Pour votre présence permanente et salvatrice en de nombreuses occasions,

Pour vos encouragements et votre compréhension.

A Cédric AMESLANT, Jean-Yves DOUET et Emmanuelle SMADJA,

Pour essayer les plâtres au quotidien, pour votre patience et votre indulgence à mon égard,

Pour le plaisir que vous me procurez lorsque je vous retrouve tous les matins.

A Aurélie, Claire, Jennifer, Laurent, Gautier, Serge et Julien,

Pour votre amitié qui m'a permis de passer bien des épreuves.

A Stéthro, Collyre et Théo...

Introduction.....	15
I. Anatomie générale du bulbe de l'œil (figure 1).....	17
I.1. Tuniques du bulbe de l'œil	17
I.1.1. Tunique fibreuse du bulbe (<i>Tunica fibrosa bulbi</i>).....	17
I.1.2. Tunique vasculaire du bulbe (<i>Tunica vasculosa bulbi</i>)	17
I.1.3. Tunique interne du bulbe (<i>Tunica interna bulbi</i>)	18
I.2. Chambres et milieux du bulbe de l'œil	18
I.2.1. Chambres du bulbe de l'œil.....	18
I.2.2. Milieux du bulbe de l'œil	19
II. Organisation comparée de l'Angle Irido-cornéen du Chien et de l'Homme	22
II.1. Développement normal de l'A.I.C.....	22
II.1.1. Formation de la chambre antérieure.....	22
II.1.2. Formation de l'angle irido-cornéen	23
II.2. Architecture de l'angle irido-cornéen	33
II.2.1. Jonction cornéo-sclérale.....	33
II.2.2. Corps ciliaire.....	34
II.2.3. Fente ciliaire	35
II.2.4. Iris.....	36
II.2.5. Réseau trabéculaire	38
II.2.6. Drainage de l'humeur aqueuse.....	47
II.3. Vascularisation	57
II.3.1. Artères.....	57
II.3.2. Veines	60
II.4. Innervation	60
II.5. Conclusion	61
II.6. Terminologie.....	64

III.	Physiologie comparée de l'angle irido-cornéen chez le Chien et l'Homme....	65
III.1.	Caractéristiques de l'humeur aqueuse.....	65
III.1.1.	Propriétés physiques.....	65
III.1.2.	Composition chimique de l'humeur aqueuse.....	67
III.1.3.	Humeur aqueuse seconde.....	71
III.2.	Mécanismes de production de l'humeur aqueuse.....	71
III.2.1.	Notion de barrière hémato-aqueuse.....	71
III.2.2.	Mécanisme de production de l'humeur aqueuse.....	74
III.3.	Dynamique de l'humeur aqueuse.....	86
III.3.1.	Rôle de la cornée.....	86
III.3.2.	Rôle de l'iris.....	87
III.4.	Voies d'élimination de l'humeur aqueuse.....	91
III.4.1.	Voie de drainage conventionnelle.....	91
III.4.2.	Voie de drainage non conventionnelle ou uvéo-sclérale.....	97
	Conclusion.....	100

TABLE DES ILLUSTRATIONS

FIGURES

Figure 1 : Structure générale du bulbe de l'œil.....	21
Figure 2 : Illustration représentative de la photographie 1 montrant le drainage de l'humeur aqueuse chez le Chien	27
Figure 3 : Illustration représentative de la photographie 2 montrant le drainage de l'humeur aqueuse chez le Singe	32
Figure 4 : Représentation du "canal de Schlemm" et de ses efférents	51
Figure 5 : Détail du "canal de Schlemm" et de ses efférents	55
Figure 6 : Artères de la région de l'angle irido-cornéen chez l'Homme.....	59
Figure 7 : Comparaison de l'architecture de l'angle irido-cornéen chez l'Homme et le Chien.....	63
Figure 8 : Gradient de pression intervenant dans l'ultrafiltration plasmatique.....	78
Figure 9 : Mécanisme de sécrétion active de l'humeur aqueuse par les cellules non pigmentées de l'épithélium ciliaire.....	82
Figure 10 : Composition chimique de l'humeur aqueuse et du cristallin.....	85
Figure 11 : Mouvements d'eau depuis la cornée vers la chambre antérieure, et entre les chambres antérieure et postérieure par la pupille et l'iris.....	90

PHOTOGRAPHIES

Photographie 1 : Région de l'angle irido-cornéen du Chien.....	25
Photographie 2 : Région de l'angle irido-cornéen du Singe.....	30
Photographie 3 : Angle irido-cornéen du Chien.....	40
Photographie 4 : Ligament pectiné et réseau trabéculaire du Chien.....	41
Photographie 5 : Angle irido-cornéen du Singe.....	45
Photographie 6 : Réseau trabéculaire et "canal de Schlemm" du Singe.....	46
Photographie 7 : Région de l'angle irido-cornéen du Cheval.....	99

TABLEAU

Tableau 1 : Terminologie des principaux constituants de l'angle irido-cornéen.....	64
Tableau 2 : Volumes d'humeur aqueuse dans les chambres antérieure et postérieure de l'œil de l'Homme et du Chien.....	66
Tableau 3 : Concentrations protéiques plasmatiques et dans l'humeur aqueuse chez l'Homme et le chez Chien.....	67
Tableau 4 : Concentrations des substances non électrolytiques dans l'humeur aqueuse et le plasma chez l'Homme et chez le Chien.....	69
Tableau 5 : Concentrations des substances électrolytiques dans l'humeur aqueuse et le plasma chez l'Homme et chez le Chien.....	70

INTRODUCTION

Par souci de clarté et dans le but d'homogénéiser les termes anatomiques nombreux, propres à l'organe visuel, nous utiliserons les termes de la nomenclature officielle publiée dans les *Nomina Anatomica Veterinaria* et les *Nomina Histologica*. Les termes latins sont ainsi mentionnés en italique et entre parenthèses. Cependant, certaines structures anatomiques de l'angle irido-cornéen ne sont pas mentionnées dans ces références et portent des noms parfois différents selon les auteurs; pour celles-ci, nous utiliserons dans la mesure du possible les termes qui nous paraissent les plus justes. Aussi la légende des différents schémas présentés dans ce développement propose les termes latins lorsqu'ils existent -ils sont mentionnés en italique- et les termes usuels dans le cas contraire -ils sont mentionnés en caractère normal-.

De même, et pour des raisons légales, les photographies qui illustrent la région de l'angle irido-cornéen humain ont été réalisées sur des supports simiens, la manipulation de matériel humain étant interdite dans les écoles vétérinaires.

Avant d'appréhender la description de l'angle irido-cornéen, il convient de définir la notion d'organe visuel; l'organe visuel (*Organum visus*), pair, céphalique et symétrique, est l'appareil sensoriel destiné à percevoir les influx lumineux en association avec le cortex cérébral occipital (*Cortex occipitalis*). L'organe visuel est constitué de l'œil (*Oculus*) et des organes oculaires accessoires (*Organa oculi accessoria*). L'œil est lui même composé du nerf optique (*Nervus opticus*) et du bulbe de l'œil (*Bulbus oculi*), tandis que les organes oculaires accessoires sont les muscles du bulbe (*Musculi bulbi*), les fascias orbitaires (*Fascia orbitales*), les paupières (*Palpebrae*), la tunique conjonctive (*Tunica conjunctiva*) et l'appareil lacrymal (*Apparatus lacrimalis*) [36].

L'angle irido-cornéen (*Angulus iridocornealis*) (AIC), anciennement "angle caméculaire" ou "angle de filtration", est la structure située sur toute la circonférence du bulbe de l'œil entre la jonction cornéo-sclérale et la racine de l'iris. Son rôle est de drainer l'humeur aqueuse (*Humor aquosus*) produite par le corps ciliaire (*Corpus ciliare*) à la faveur de mécanismes d'ultra-filtration et de synthèse active [36].

Il est aujourd'hui admis que l'angle irido-cornéen a évolué parallèlement avec l'évolution de la taille des bulbes oculaires des différentes espèces de mammifères,

et les capacités d'accommodation de chacune. Ces différents facteurs ont été associés aux mœurs de ces espèces. Ainsi les prédateurs, représentés par les carnivores et les primates, présentent des capacités d'accommodation relativement importantes et des yeux proportionnellement de petite taille, tandis que les herbivores dont les capacités d'accommodation sont médiocres, possèdent des yeux proportionnellement plus volumineux. Les facultés d'accommodation sont liées au développement du muscle ciliaire (*Musculus ciliaris*). Or, plus le muscle ciliaire est développé, plus il déborde vers les structures antérieures de l'œil et modifie ces dernières. Ainsi sont apparus différents "modèles" d'angle irido-cornéen, classés en relation avec le développement du muscle ciliaire [45].

L'équilibre de la pression intra-oculaire est un facteur indispensable pour le maintien de l'intégrité des structures anatomiques de l'œil et de leur fonction (cornée (*Cornea*), choroïde (*Choroidea*) et surtout rétine (*Retina*)). La pression intra-oculaire procède de l'égalité entre la quantité d'humeur aqueuse sécrétée par les procès ciliaires (*Processus ciliares*) et celle drainée par le système veineux [36].

Par ailleurs, la différence entre les pressions du segment antérieur (15 millimètres de mercure, noté mm Hg) et du système veineux collecteur (8 à 12 mm Hg) s'explique par la présence d'une structure complexe appartenant à l'AIC. Cette structure doit permettre de réguler le drainage de l'humeur aqueuse en faisant en partie obstacle à son écoulement, afin de maintenir le différentiel des pressions [24].

Lorsque le système de drainage de l'humeur aqueuse, pour des raisons diverses, devient déficient, la pression intra-oculaire augmente et provoque le glaucome. Véritable acteur du maintien de la pression intra-oculaire, l'AIC intervient dans les mécanismes physio-pathologiques de cette affection tant chez l'Homme (*Homo sapiens sapiens*) que chez le Chien (*Lupus familiaris*). Néanmoins, de nombreuses différences anatomiques et physiologiques existent entre l'AIC du Chien et de l'Homme, différences qui pourraient expliquer la relative inefficacité des traitements médicaux et chirurgicaux du glaucome chez le Chien, pourtant usuels chez l'Homme.

Notre travail a pour objectif de décrire les différences anatomiques et physiologiques entre l'AIC du Chien et celui de l'Homme, après avoir rappelé l'anatomie générale de l'organe visuel.

I. ANATOMIE GENERALE DU BULBE DE L'ŒIL (FIGURE 1)

Le bulbe de l'œil est l'organe pair et symétrique responsable de la vision. Il est composé de différentes tuniques, chambres et milieux. L'organisation anatomique générale du bulbe de l'œil est relativement constante chez les Mammifères [2, 36, 46].

I.1. Tuniques du bulbe de l'œil

I.1.1. Tunique fibreuse du bulbe (*Tunica fibrosa bulbi*)

La tunique fibreuse est la plus externe et la plus épaisse des trois tuniques du bulbe de l'œil. Elle est constituée de la sclère (*Sclera*) et de la cornée.

- La sclère est la plus résistante des structures oculaires, essentiellement protectrice des éléments sensoriels de l'œil, elle est la partie postérieure la plus étendue de la tunique fibreuse. Le bord antérieur de la sclère sert d'ancrage à la cornée. La zone de transition constitue le limbe cornéen (*Limbus corneae*), encore appelé limbe scléro-cornéen ou limbe cornéo-scléral.
- La cornée, également résistante, représente le premier dioptré traversé par les rayons lumineux. C'est la partie la plus antérieure de la tunique fibreuse. Elle est plus convexe que la sclère et présente une forme presque ronde chez le Chien et l'Homme.

I.1.2. Tunique vasculaire du bulbe (*Tunica vasculosa bulbi*)

Il s'agit de la tunique moyenne de l'œil. Elle est composée de la choroïde, du corps ciliaire et de l'iris (*Iris*). Il s'agit de la tunique nourricière de l'œil par la choroïde, elle permet aussi l'accommodation et la production de l'humeur aqueuse par le corps ciliaire ainsi que le contrôle par l'iris de la quantité de lumière reçue par la rétine.

- La choroïde est la partie postérieure de la tunique vasculaire. Elle a un rôle principalement nourricier mais sa forte pigmentation en fait une véritable chambre noire.

- Le corps ciliaire, grâce aux muscles ciliaires qui le composent en partie, est responsable de l'accommodation. Il est responsable en outre de la synthèse de l'humeur aqueuse grâce aux cellules de l'épithélium non pigmentaire des procès ciliaires, par des mécanismes enzymatiques divers.
- L'iris représente le diaphragme de l'œil et sépare les chambres postérieure (*Camera posterior bulbi*) et antérieure (*Camera anterior bulbi*). Il laisse s'écouler l'humeur aqueuse par son orifice central, circulaire chez l'Homme et le Chien et de taille variable, la pupille (*Pupilla*).

I.1.3. Tunique interne du bulbe (*Tunica interna bulbi*)

La tunique interne, aussi appelée tunique nerveuse ou sensorielle, est constituée par la rétine. Celle-ci est composée d'une partie aveugle (*Pars caeca retinae*), antérieure à l'*ora serrata* (*Ora serrata*) chez l'Homme et à l'*ora ciliaris retinae* (*Ora ciliaris retinae*) chez le Chien, et d'une partie optique (*Pars optica retinae*), postérieure à cette dernière. La rétine est responsable de la transformation de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Cet encodage est réalisé par des cellules spécialisées de la rétine optique et conduit aux centres encéphaliques par le nerf optique grâce à des mécanismes de conduction électrique.

I.2. Chambres et milieux du bulbe de l'œil

Les tuniques de l'œil délimitent des espaces comblés par différentes structures dont l'intégrité est indispensable au fonctionnement de l'organe visuel. Deux chambres et trois milieux spécifiques sont ainsi délimités.

I.2.1. Chambres du bulbe de l'œil

Le segment antérieur de l'œil est délimité dans sa partie antérieure par l'épithélium postérieur de la cornée et dans sa partie postérieure par la capsule antérieure du cristallin (*Capsula lentis*) prolongée par une ligne virtuelle passant par l'équateur du cristallin (*Equator lentis*). Le segment antérieur, baigné par l'humeur aqueuse, est divisé en deux chambres. La chambre postérieure s'étend depuis la capsule antérieure du cristallin prolongée par la zonule (*Zonula ciliaris*), jusqu'à la face

postérieure de l'iris. La chambre antérieure s'étend de la face antérieure de l'iris jusqu'à l'épithélium postérieur de la cornée.

I.2.2. Milieux du bulbe de l'œil

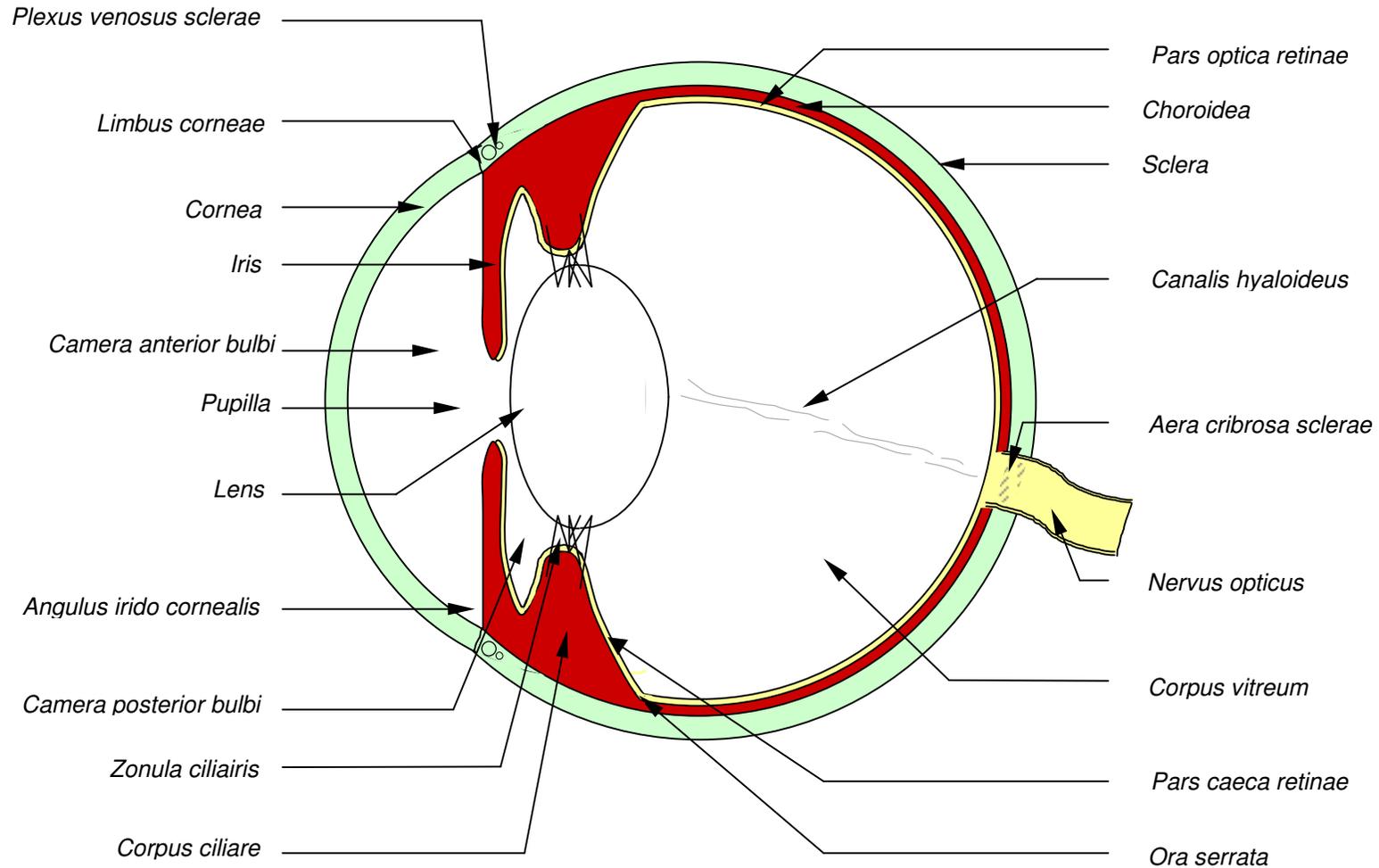
Il existe trois types de milieux : l'humeur aqueuse (le plus antérieur), le cristallin (milieu intermédiaire), et le corps vitré (*Corpus vitreum*) (le plus postérieur). Tous ces milieux sont transparents et autorisent ainsi le passage des rayons lumineux.

- L'humeur aqueuse est un milieu liquide contenu dans les chambres antérieure et postérieure.
- Le cristallin est un milieu solide qui délimite les segments antérieur et postérieur. Il est maintenu en place par la zonule qui s'attache au corps ciliaire. Il est composé d'une capsule (*Capsula lentis*) antérieure (deuxième dioptré de l'œil après la cornée), d'une capsule postérieure (troisième dioptré de l'œil), d'un cortex (*Cortex lentis*) et d'un noyau (*Nucleus lentis*).
- Le corps vitré est un milieu semi-liquide qui comble le segment postérieur et maintient en place la rétine. Il est délimité antérieurement par une pseudo-membrane constituée de fibrilles vitréennes appelée hyaloïde antérieure [37].

Figure 1 : Structure générale du bulbe de l'œil (d'après [36])

Cette figure montre l'organisation générale de l'œil chez les Mammifères. Cependant, les proportions entre les différents constituants de l'organe visuel varient considérablement d'une espèce à l'autre. Ici n'est représenté schématiquement qu'un modèle d'œil.

La tunique fibreuse est colorée en vert, la tunique vasculaire en rouge et la tunique nerveuse en jaune.



II. ORGANISATION COMPAREE DE L'ANGLE IRIDO-CORNEEN DU CHIEN ET DE L'HOMME

L'A.I.C. est une structure oculaire complexe, délimitée antérieurement par la jonction cornéo-sclérale et postérieurement par la jonction irido-ciliaire. Il s'étend sur toute la circonférence de la chambre antérieure et a pour rôle de drainer l'humeur aqueuse, produite en amont par les procès ciliaires. Il s'agit d'une région anatomique d'importance de par son rôle dans la physiologie et la pathologie de l'écoulement de l'humeur aqueuse, mais aussi grâce à sa visualisation par gonioscopie [40,51] .

II.1. Développement normal de l'A.I.C.

Le développement embryonnaire de l'AIC répond à des mécanismes comparables chez l'Homme et le Chien. Cependant, chez le Chien, espèce nidicole, le développement de l'AIC se poursuit dans les quelques jours après la naissance, alors qu'il est presque complet à la naissance chez l'Homme [5]. D'autre part, la durée de gestation étant différente dans les deux espèces, les délais d'apparition des constituants de l'œil divergent logiquement.

II.1.1. Formation de la chambre antérieure

Sur l'embryon humain de 12 mm vers la cinquième semaine, et sur l'embryon canin de moins de sept semaines, apparaissent des cellules mésenchymateuses d'origine endodermique entre l'ectoderme et la vésicule cristallinienne. Le mésenchyme comble alors l'espace compris entre le cristallin et l'ectoderme superficiel. S'en suivent une cavitation du mésenchyme par clivage ou dégénérescence, et une différenciation des cellules mésenchymateuses en trois vagues :

- les deux premières vagues aboutissent à la formation de la cornée (endothélium-stroma), l'épithélium cornéen dérivant de la différenciation de l'ectoderme superficiel ;
- la troisième aboutit à la formation de l'iris.

Entre la cornée et l'iris se délimite alors un espace qui deviendra la chambre antérieure à partir du 45° jour de gestation chez le Chien, et avant le 56° jour de

gestation chez l'Homme. L'AIC n'est pas encore délimité à ce stade de développement [2, 36, 40, 52].

II.1.2. Formation de l'angle irido-cornéen

Le schéma général de la formation de l'angle irido-cornéen est comparable chez les deux espèces. Cependant, les délais divergent dans la mesure ou le développement se poursuit jusqu'à plusieurs mois après la naissance chez le Chien tandis qu'il est presque complet à la naissance chez l'Homme.

L'ensemble des structures qui comblent l'AIC provient de deux feuillets d'origine mésodermique qui se mettent en place successivement.

II.1.2.1. Chez le Chien

A partir de la cinquième semaine de gestation se tend un feuillet unicellulaire entre l'endothélium cornéen et l'épithélium de la face antérieure de l'iris au sein de l'angle. Ce feuillet est ensuite recouvert d'un fin filet de fibrilles au 53^{ème} jour de gestation. Au 62^{ème} jour, le feuillet unicellulaire primitif devient discontinu par raréfaction cellulaire, et se perce de trous séparés par des brins de faible calibre. Le filet de fibrilles, apparu au 53^{ème} jour, continue de progresser postérieurement.

Vingt quatre heures après la naissance, le filet couvre la majorité de l'angle et s'attache de façon diffuse à l'iris tandis que les points d'ancrage cornéens sont regroupés en "paquets". A ce stade, des veines trabéculaires sont visibles à hauteur de la partie la plus externe du futur réseau trabéculaire cornéo-scléral. Elles possèdent de larges vacuoles enchâssées dans l'endothélium, attestant déjà de la fonctionnalité du système de drainage [47].

Le filet de fibrilles se perforé à son tour 5 jours après la naissance. Les trous sont bordés par des ligaments qui semblent renforcer le filet.

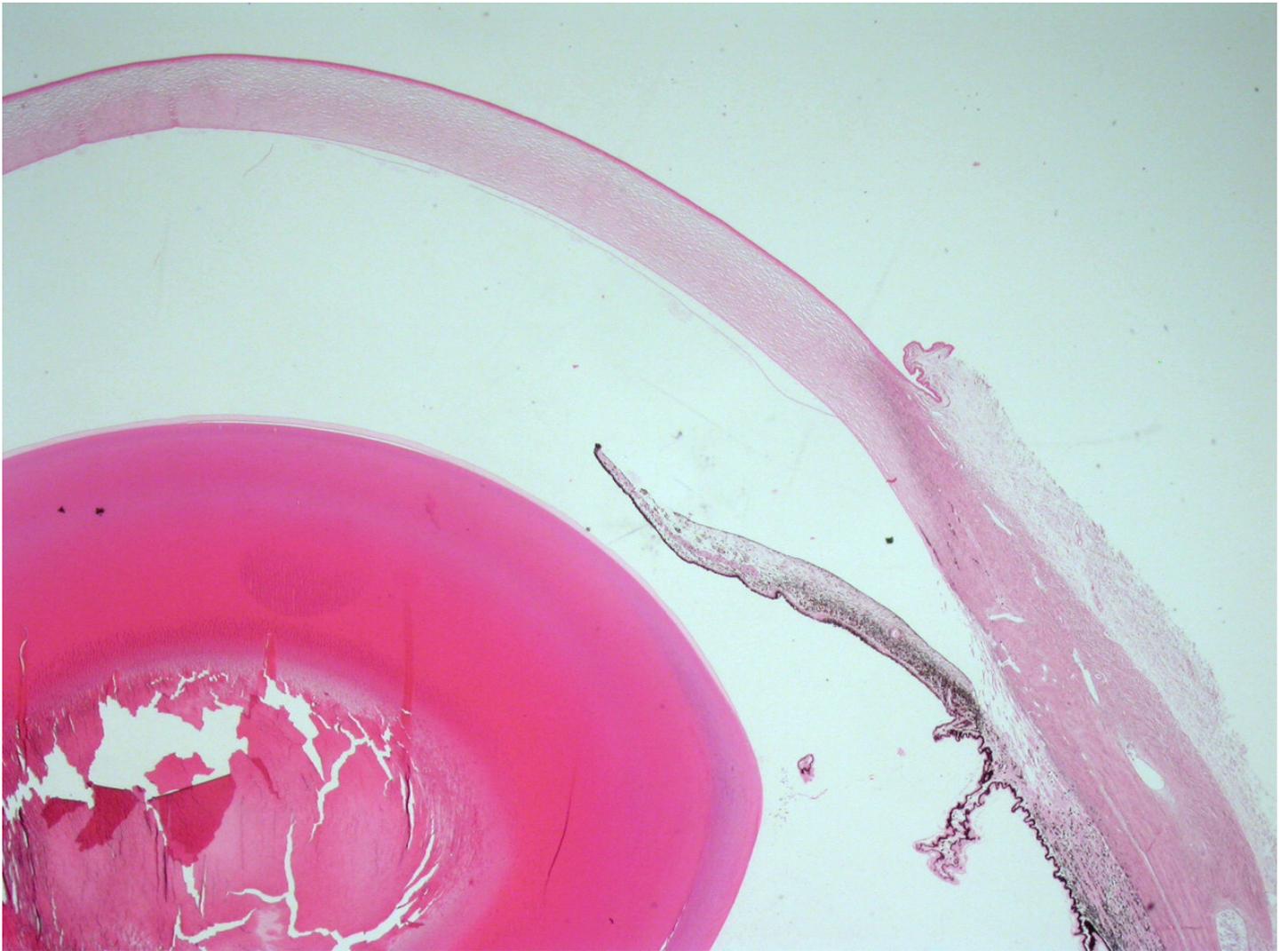
Tout le filet est ajouré 14 jours après la naissance. Les ligaments sont alors épaissis et forment le ligament pectiné de l'AIC (*Lig. pectinatum anguli iridocornealis*), inconstant chez l'Homme. Les fibres du ligament s'élargissent et deviennent plus robustes dans les premiers mois suivant la naissance [28, 47].

Les vacuoles des veines trabéculaires sont plus proéminentes et font saillie dans la lumière vasculaire.

Les réseaux trabéculaires uvéal et cornéoscléral s'individualisent nettement 19 jours après la naissance, alors que jusqu'à la première semaine au moins, ces deux structures étaient confondues. Après le 19^{ème} jour, les espaces inter-trabéculaires s'élargissent peu à peu pour trouver un développement définitif après quelques mois [48]. L'élargissement des espaces se fait par des phénomènes de nécrose cellulaire et de phagocytose par des macrophages [15].

Le plexus veineux de la sclère (*Plexus venosus sclerae*) est mature à la quatrième semaine [52].

La disposition et la forme générales de l'angle irido-cornéen du Chien à la fin de son développement sont montrées sur la photographie 1 et sur la figure 2.



Photographie 1 : Région de l'angle irido-cornéen du Chien.

Coloration standard Hémalun Eosine x1

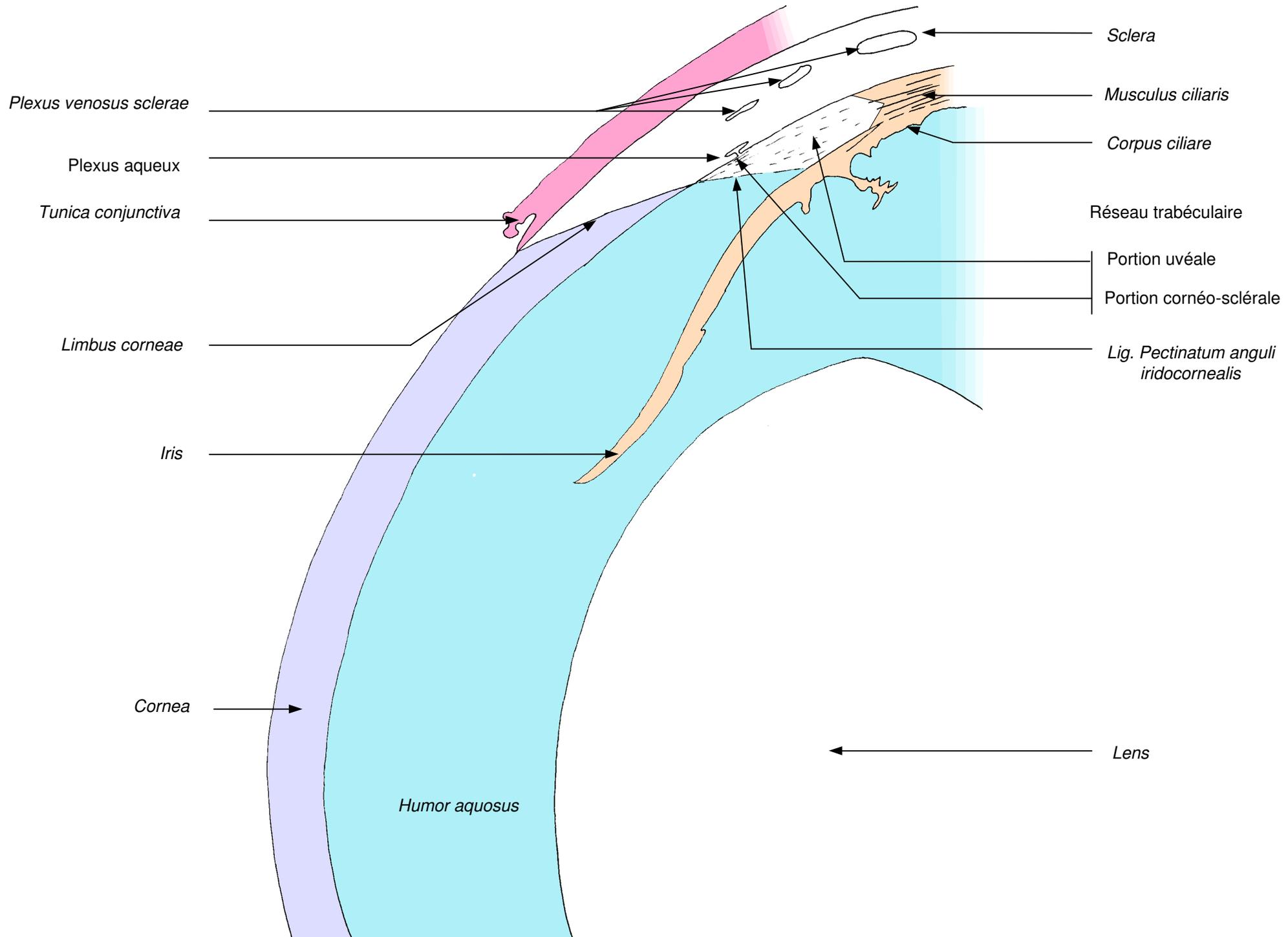
Photographie I. RAYMOND

Figure 2 : Illustration représentative de la photographie 1 montrant le drainage de l'humeur aqueuse chez le Chien

Sur cette figure sont montrés l'insertion de la cornée sur la sclère sur le limbe cornéen, l'organisation des réseaux trabéculaires uvéal et cornéo scléral, la disposition et l'importance du muscle ciliaire ainsi que le système collecteur de l'humeur aqueuse.

Noter le comblement important de l'AIC par le réseau trabéculaire, le faible développement du muscle ciliaire et la disposition successive des vaisseaux formant le plexus veineux de la sclère.

Les termes anatomiques généraux sont issus des *Nomina Anatomica Veterinaria* et sont mentionnés en italique. Pour les autres structures, plus spécifiques, nous avons choisi de mentionner les termes les plus retrouvés dans la littérature, ou bien les termes qui nous paraissent les plus appropriés. Ceux-là sont mentionnés en caractère normal.



II.1.2.2. Chez l'Homme

Sur l'embryon humain de 25 mm, vers la huitième semaine, l'angle se forme progressivement. Deux théories s'affrontent pour expliquer sa formation [51] :

► Théorie de la résorption

L'angle se formerait par résorption progressive du tissu mésodermique tandis que la chambre antérieure se forme.

► Théorie du clivage

L'angle serait formé par clivage entre deux couches de tissu mésodermique. L'apparition de cette fente au sein de ce tissu serait due à la croissance inégale des éléments du segment antérieur (croissance relativement rapide de la cornée par rapport aux autres structures).

Au septième mois, le sommet de l'angle est à hauteur du réseau trabéculaire.

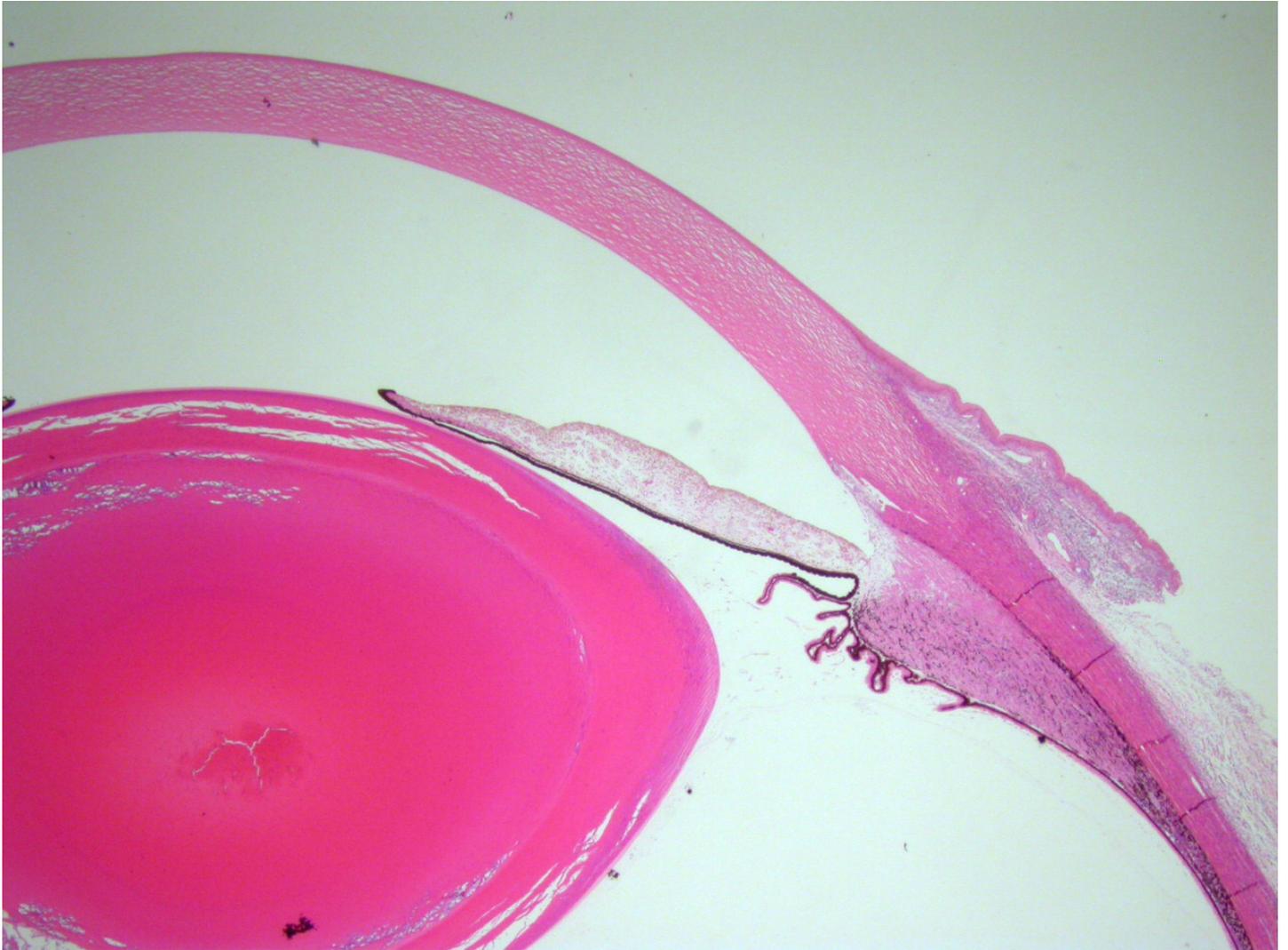
Le "canal de Schlemm" (*Sinus venosus sclerae*), inexistant chez le Chien, apparaît vers le quatrième mois, sous forme d'un plexus vasculaire situé loin derrière l'angle. Les aspects de vacuolisation de la couche endothéliale apparaissent au cinquième mois. Ils sont contemporains de la différenciation du corps ciliaire et de la circulation de l'humeur aqueuse.

La différenciation du réseau trabéculaire se fait entre le quatrième et le huitième mois avec l'apparition progressive de fibres de collagène et de fibres élastiques.

L'éperon scléral, absent chez le Chien, apparaît au quatrième mois alors que se différencient réseaux trabéculaires cornéo-scléral et uvéal. A la naissance, le sommet de l'angle a atteint l'extrémité postérieure du réseau trabéculaire [40]. L'AIC de l'Homme continue d'évoluer quelques mois après la naissance même si son architecture générale est acquise dès les premiers moments de la vie. L'évolution post-partum intéresse principalement le calibre des constituants [6, 34].

La forme et la disposition du ligament pectiné chez le Chien et celles du réseau trabéculaire chez le Chien et l'Homme semblent être induits par des facteurs mécaniques notamment représentés par la pression exercée par l'humeur aqueuse sur ces structures [40,52].

La disposition et la forme générales de l'angle irido-cornéen du Singe à la fin de son développement, assimilées à celle de l'Homme, sont montrées sur la photographie 2, et sur la figure 3.



Photographie 2 : Région de l'angle irido-cornéen du Singe

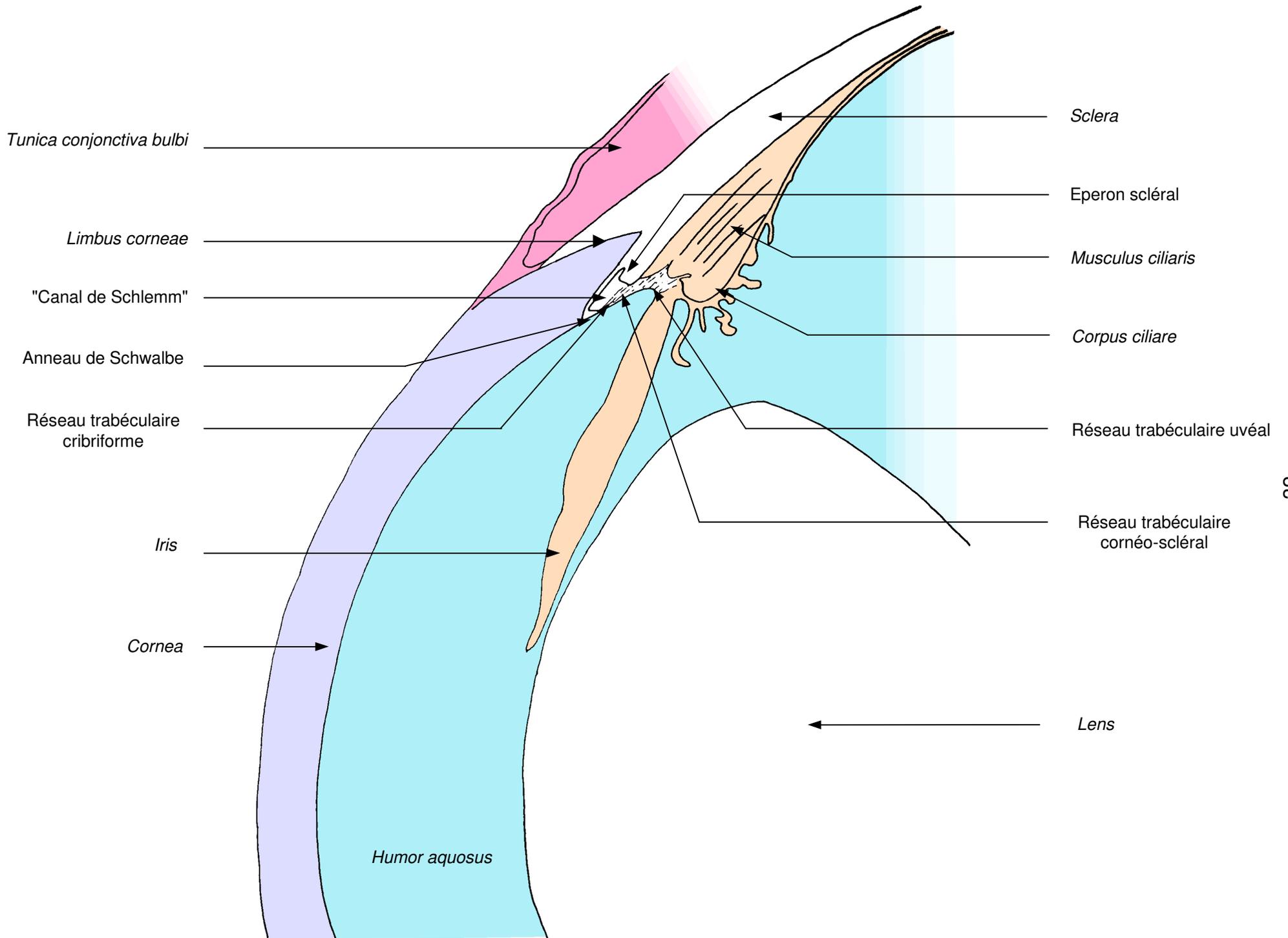
Coloration standard Hémalun Eosine x1

Photographie I. RAYMOND

Figure 3 : Illustration représentative de la photographie 2 montrant le drainage de l'humeur aqueuse chez le Singe

Sur cette figure sont montrées l'insertion de la cornée sur la sclère (limbe cornéen), l'organisation des réseaux trabéculaires uvéal, cornéo-scléral et cribriforme, la disposition et l'importance du muscle ciliaire.

Noter le faible comblement de l'AIC par le réseau trabéculaire, le fort développement du muscle ciliaire et la disposition du "canal de Schlemm".



II.2. Architecture de l'angle irido-cornéen

Chez l'Homme comme chez le Chien, l'angle irido-cornéen est délimité en avant par la région du limbe cornéen et en arrière par le corps ciliaire et la racine de l'iris (*Margo ciliaris*). Cependant, l'espace ménagé par ces structures n'est pas organisé de façon similaire chez les deux espèces [6, 29].

II.2.1. Jonction cornéo-sclérale

Cette zone appelée limbe cornéen représente la transition entre les structures cornéennes et sclérales. Elle varie sensiblement entre le Chien et l'Homme.

II.2.1.1. Chez le Chien

Le limbe est taillé en biseau, la cornée s'incrétant dans la sclère à la manière d'un « verre de montre ». Il possède deux bandes pigmentées, une superficielle le long de la zone de jonction scléro-cornéenne, et une profonde, entre la lame limitante interne de la cornée (membrane de Descemet) (*Lamina limitans posterior*) et la substance propre de la cornée (stroma) (*Substantia propria corneae*), zone d'insertion du ligament pectiné [12, 52].

II.2.1.2. Chez l'Homme

Cette zone de transition est plus complexe [40]. Elle est constituée d'avant en arrière par le versant cornéen puis le versant scléral.

► Versant cornéen

Il est représenté principalement par l'anneau de Schwalbe, condensation de la lame limitante interne de la cornée. Cet anneau est la partie la plus antérieure de l'AIC de l'Homme. Il apparaît sous forme d'une ligne translucide faisant discrètement saillie dans la chambre antérieure. Cet anneau est recouvert par l'épithélium postérieur de la cornée (endothélium cornéen) (*Epithelium posterius corneae*). Il sert de repère à l'analyse gonioscopique de l'angle irido-cornéen en ophtalmologie humaine.

► Versant scléral

Il comporte deux éléments annulaires en relief, le septum scléral en avant et l'éperon scléral en arrière, délimités par la gouttière sclérale.

Le septum scléral représente la lèvre interne de la rainure sclérale dans laquelle vient s'enclôser la périphérie de la cornée.

La gouttière sclérale est une encoche annulaire creusée dans la sclère et dans laquelle chemine le "canal de Schlemm".

L'éperon scléral est un renflement annulaire dont le sommet est pointé vers la chambre antérieure. Il est situé postérieurement à la gouttière sclérale. Les fibres radiales du muscle ciliaire viennent s'insérer sur son versant postérieur. Son versant antérieur sert de point d'ancrage au réseau trabéculaire cornéo-scléral tandis que son sommet est recouvert du réseau trabéculaire uvéal.

II.2.2. Corps ciliaire

Situé en région postéro-externe par rapport à l'iris sur toute la circonférence de l'œil, le corps ciliaire présente un développement différent chez l'Homme et le Chien.

Chez l'Homme, espèce qui possède des capacités d'accommodation extrêmes, le corps ciliaire présente un développement maximal. Dans sa portion antérieure, il est en continuité avec l'iris ; il fait ensuite véritablement saillie vers l'intérieure du bulbe de l'œil avant de rejoindre la choroïde [39].

Chez le Chien dont les facultés d'accommodation sont bien moindres que celles de l'Homme et estimées à trois dioptries [12, 45], le corps ciliaire montre un développement plus réduit et possède une forme plus aplanie. La portion antérieure du corps ciliaire est dans le prolongement de l'iris. Il rejoint ensuite la choroïde après un renflement discret, beaucoup plus réduit que chez l'Homme [53].

Néanmoins, les différents constituants du corps ciliaire sont identiques chez les deux espèces. Ainsi le corps ciliaire est composé chez les deux espèces du muscle ciliaire décrit ici et des procès ciliaires, décrits dans la deuxième partie du développement.

Le muscle ciliaire d'origine mésodermique, présente trois types de fibres musculaires lisses : des fibres méridiennes (*Fibrae meridionales*), des fibres circulaires (*Fibrae circulares*) et des fibres radiales (*Fibrae radiales*).

► Fibres méridiennes

Elles sont très développées chez le Chien et situées dans la partie externe du corps ciliaire, contre la sclère. Par leur contraction, les fibres méridiennes tendent la choroïde et tirent le corps ciliaire en avant [39, 53].

► Fibres radiaires

Plus développées chez l'Homme que chez le Chien, elles sont séparées les unes des autres par un tissu conjonctif et s'attachent au système des fibres méridiennes. Elles prennent origine sur la sclère, se recourbent vers l'intérieure du corps ciliaire et s'irradient entre les fibres circulaires. Ces fibres interviendraient, par leur contraction, dans les mécanismes de l'accommodation chez l'Homme [39, 53].

► Fibres circulaires

Moins nombreuses que les fibres méridiennes, elles sont plus profondément enchâssées dans le corps ciliaire et situées plus en avant que ces dernières. Grêles chez le Chien, elles présentent un développement définitif chez l'Homme vers l'âge de 5 ans. De la même façon que les fibres radiaires, les fibres circulaires joueraient un rôle d'importance dans l'accommodation chez l'Homme [39, 53].

II.2.3. Fente ciliaire

La région située entre les feuillets antérieurs du corps ciliaire est appelée fente ciliaire. Parfois confondue avec l'AIC lui même, elle ne représente en fait que la partie la plus large de ce dernier. D'autres termes existent pour décrire la fente ciliaire : sinus ciliaire, canal ciliaire, sinus cilio-scléral [45].

II.2.3.1. Chez le Chien

La fente ciliaire est profonde et se termine postérieurement entre les fibres musculaires lisses internes et externes qui forment la musculature antérieure du corps ciliaire [45].

II.2.3.2. Chez l'Homme

Cette fente est très réduite du fait de son comblement presque total par la musculature du corps ciliaire qui se termine dans sa portion antérieure de façon très abrupte [45].

II.2.4. Iris

L'iris sépare les chambres antérieure et postérieure. Il présente une organisation commune chez les deux espèces avec cependant une insertion périphérique propre à chacune.

II.2.4.1. Chez le Chien

Le développement important de la fente ciliaire offre peu de possibilités d'ancrage pour la racine de l'iris. Pour compenser la largeur et la profondeur de la fente ciliaire, une série d'expansions fibreuses attache la racine antérieure de l'iris au limbe cornéen. Ces expansions forment le ligament pectiné. Le ligament pectiné a été décrit sous le terme de ligament suspenseur de l'iris, procès iriens, ou encore piliers de l'iris [45].

II.2.4.1.1. *Organisation générale du ligament pectiné*

Il représente la portion antérieure de la fente ciliaire. Très développé chez le Chien, sa structure est constante quelle que soit la race considérée, avec cependant de nombreuses variations interindividuelles notamment en termes de calibre [11]. Les fibres enjambent obliquement et vers l'avant la partie antérieure de la fente ciliaire et délimitent ainsi la partie antérieure du réseau trabéculaire. Elles ont une disposition radiaire et viennent s'attacher à la jonction cornéo-sclérale normalement pigmentée, sur la lame limitante postérieure de la cornée (membrane de Descemet).

Le ligament trouve son origine à la racine de l'iris avec un tissu conjonctif lâche en forme d'arête circulaire étroite et irrégulière, de structure identique à celle du stroma irien. Il se divise ensuite en fibres individuelles dont certaines s'unissent latéralement, surtout du côté irien de la fente ciliaire, tandis que d'autres se divisent postérieurement pour former une deuxième ligne de fibres plus fines. Les fibres les plus antérieures sont appelées fibres primaires, tandis que les fibres secondaires, situées postérieurement, forment le ligament pectiné accessoire ou secondaire.

II.2.4.1.2. Ultrastructure du ligament pectiné

Les fibres primaires présentent une épaisseur variable mais les fibres les plus longues semblent être les plus étroites. Leur épaisseur varie ainsi de 60 μm à 150 μm [11]. Les fibres secondaires sont liées aux fibres du réseau trabéculaire uvéal que nous décrirons plus tard.

Sur la plus grande part de leur longueur, les fibres primaires du ligament pectiné sont composées de tissu irien. La trame fibrillaire de collagène est recouverte d'une couche cellulaire dont la structure est identique à la couche cellulaire de la face antérieure de l'iris (*Facies anterior*). Cette couche est composée de deux types de cellules, des fibroblastes et des mélanocytes. Les fibroblastes forment une couche cellulaire continue non pigmentée, périphérique. Chaque cellule possède un pericaryon proéminent et un cytoplasme étroit. Sous cette couche cellulaire se trouve une membrane basale distincte mais inégale, derrière laquelle se trouvent les mélanocytes, adjacents à la trame de collagène de façon discontinue. Des fibres nerveuses sont enchâssées dans la trame.

La portion cornéenne des fibres primaires présente une ultrastructure variable. Ainsi, certaines fibres dérivent de tissu cornéen, tandis que d'autres sont constituées d'un tissu d'origine irienne. D'autres encore présentent les deux aspects [11]. Cette zone de fusion est marquée par la présence de nombreux mélanocytes. Les fibrilles de collagène du ligament sont en contact étroit avec le collagène de la lame limitante postérieure de la cornée (membrane de Descemet).

II.2.4.2. Chez l'Homme

L'insertion de la racine de l'iris se fait sur la base du corps ciliaire, en arrière de l'éperon scléral d'où le terme de jonction irido-ciliaire [51]. Les muscles lisses du corps ciliaire sont très développés et forment une structure pyramidale qui fournit une zone d'attache épaisse et robuste pour la racine de l'iris. La portion antérieure de ces muscles a remplacé la fente ciliaire, discrète et inconstante chez l'Homme, et le ligament pectiné, persistant à l'état vestigial sous la forme de procès iriens, également inconstants [45].

Les procès ou trabécules iriens sont des reliquats mésodermiques du réseau uvéal. Ces rares expansions doublent la face interne du réseau trabéculaire uvéal que nous

décrivons plus tard. Comme chez le Chien, elles se présentent sous forme de fibres à leur insertion sur l'iris et deviennent de plus en plus graciles au fur et à mesure qu'elles se portent en avant vers l'anneau de Schwalbe. Très développées chez l'enfant, ces fibres s'atrophient avec l'âge [40].

II.2.5. Réseau trabéculaire

Le réseau trabéculaire est constitué de fibres à travers lesquelles chemine l'humeur aqueuse avant d'être drainée par un système complexe de vaisseaux collecteurs. Si la structure générale du réseau trabéculaire est commune à l'Homme et au Chien, sa disposition topographique est néanmoins très différente.

II.2.5.1. Chez le Chien

Nous avons vu que la fente ciliaire est délimitée dans sa portion antérieure par les fibres primaires du ligament pectiné et dans sa portion postérieure par les fibres musculaires lisses du corps ciliaire. Elle est comblée par un tissu dont l'aspect d'éponge lui valu le terme "tissu spongieux" [45]. Il s'agit du réseau trabéculaire ou trabéculum, dont la forme est triangulaire en coupe sagittale. Il est composé de deux parties.

- La plus interne, comblant la majeure partie de la fente ciliaire depuis le corps ciliaire jusqu'au ligament pectiné, est composée de fibres dont l'organisation est plus lâche: c'est le réseau trabéculaire uvéal.
- La plus externe, appliquée à la face interne de la sclère, est composée de fibres densément compactées. C'est le réseau trabéculaire cornéo-scléral.

II.2.5.1.1. Organisation générale du réseau trabéculaire uvéal

Egalement nommé réseau trabéculaire ciliaire, réseau uvéal interne, trabeculum uvéal, ou encore réseau réticulaire, il jouxte les fibres du ligament pectiné accessoire postérieurement. Certains auteurs [45] considèrent les fibres du réseau trabéculaire uvéal comme des extensions postérieures des fibres du ligament pectiné accessoire. En outre, des analyses immunocytochimiques et histochimiques récentes ont fait état d'une proche parenté entre ces deux types de fibres [45,48].

II.2.5.1.2. Ultrastructure du réseau trabéculaire uvéal

Les fibres du réseau trabéculaire uvéal ont une forme cylindrique et prennent un aspect de cordon. Elles ont un diamètre de 4 μm à 10 μm , et présentent une disposition radiaire jusqu'à la sclère. Ces fibres ménagent des espaces allant de 25 μm à 200 μm appelés espaces de Fontana (*Spatia anguli iridocornealis*). Certaines des fibres du réseau trabéculaire uvéal les plus antérieures se lient avec les fibres du ligament pectiné accessoire. Des fibres nerveuses myélinisées et non myélinisées sont retrouvées au sein même du réseau trabéculaire uvéal, particulièrement dans la région proximale des insertions de certaines fibres trabéculaires sur le corps ciliaire.

Les fibres du réseau trabéculaire uvéal possèdent une dense trame de fibrilles de collagène de périodicité de 600 Å et de fibres élastiques engainées par des fibrilles. La trame est recouverte d'une couche de cellules au dessous de laquelle se trouve une membrane basale [11].

II.2.5.1.3. Organisation générale du réseau trabéculaire cornéo-scléral

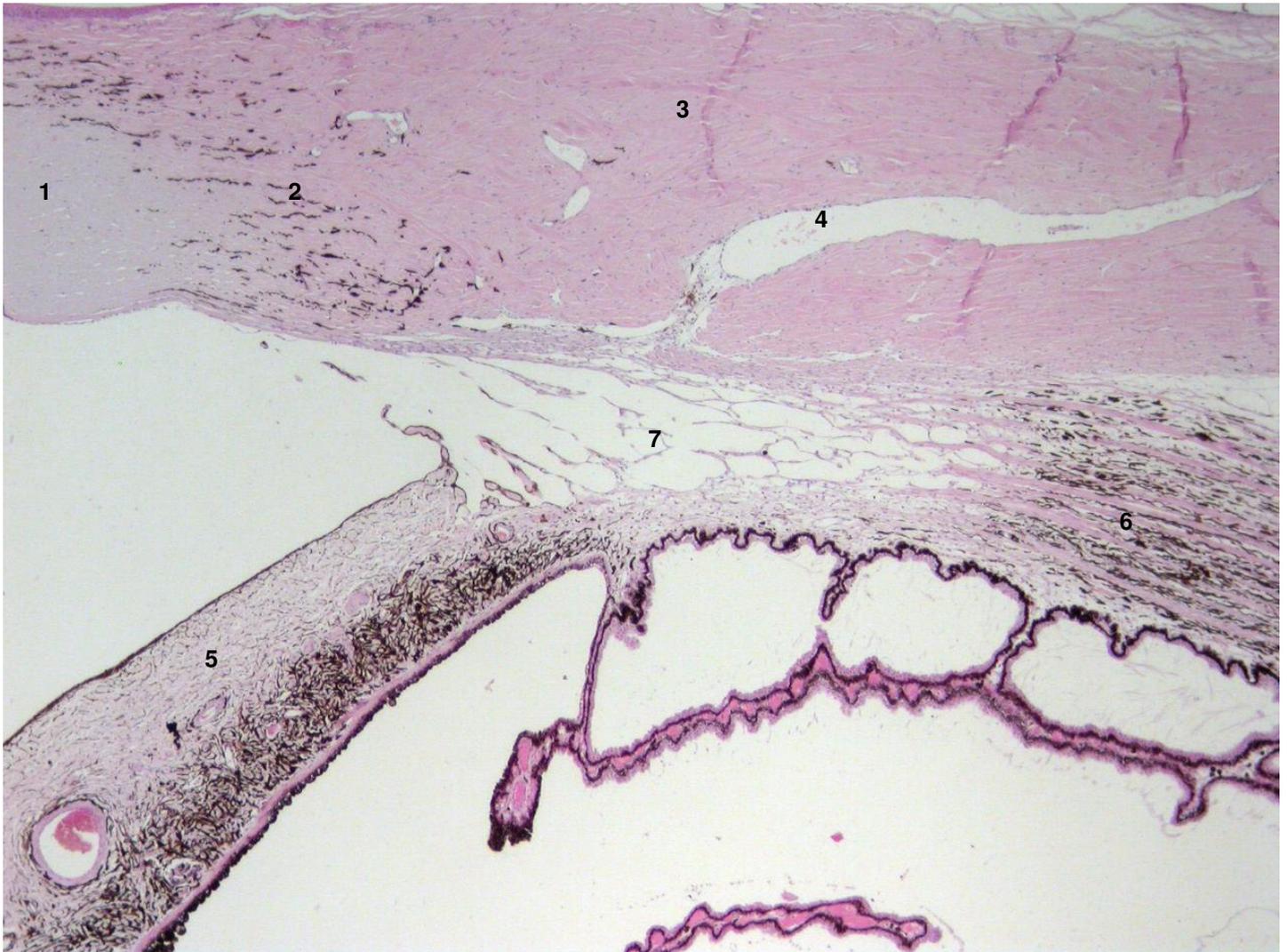
Egalement nommé trabeculum scléral, ligament cribiforme, réseau scléral, réseau cornéo-scléral ou encore réseau trabéculaire uvéo-scléral [11], le réseau trabéculaire cornéo-scléral consiste en un réseau de fibres trabéculaires aplaties, anastomosées et situées parallèlement à la face interne de la sclère. Les espaces entre les fibres, contrairement au réseau trabéculaire uvéal, sont réduits [45]. Il s'agit d'une zone de résistance majeure à l'écoulement de l'humeur aqueuse.

II.2.5.1.4. Ultrastructure du réseau trabéculaire cornéo-scléral

La structure cellulaire des fibres du réseau trabéculaire cornéo-scléral diffère seulement de celle des fibres du réseau trabéculaire uvéal par la présence d'une fine couche de matériel fibrillaire située entre la membrane basale et la trame de collagène et de fibres élastiques [11].

Ainsi chez le Chien, le réseau trabéculaire, dans son entier, comble un large espace compris entre le limbe, la racine de l'iris, et la portion antérieure du muscle ciliaire.

Son organisation et celle du ligament pectiné sont montrées sur les photographie 3 et 4.

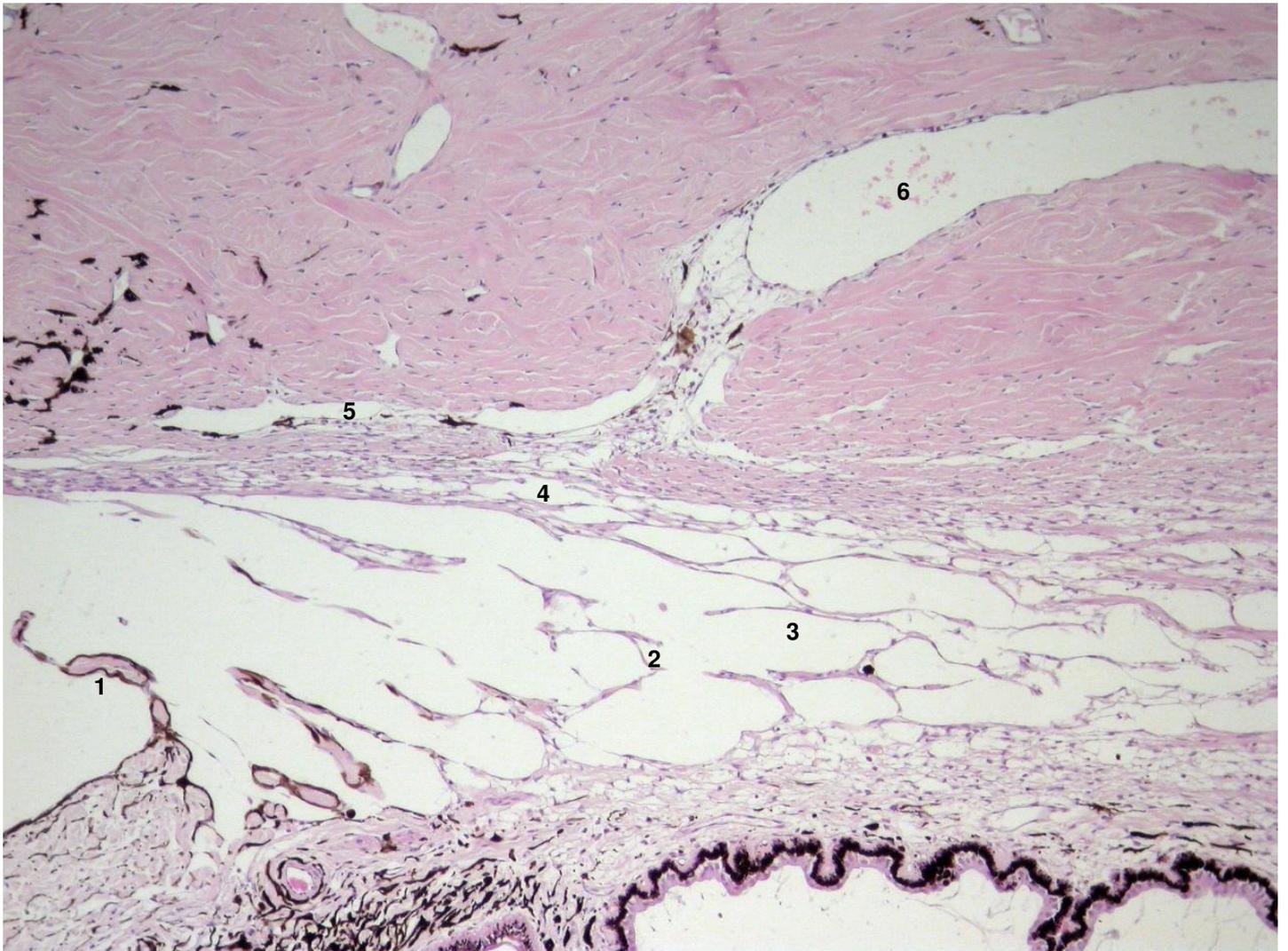


Photographie 3 : Angle irido-cornéen du Chien

- | | |
|----------------------------------|-----------------------------|
| 1- <i>Cornea</i> | 5- <i>Iris</i> |
| 2- <i>Limbus corneae</i> | 6- <i>Musculus ciliaris</i> |
| 3- <i>Sclera</i> | 7- Réseau trabéculaire |
| 4- <i>Plexus venosus sclerae</i> | |

Coloration standard Hémalun Eosine x4

Photographie I. RAYMOND



Photographie 4 : Ligament pectiné et réseau trabéculaire du Chien

- | | |
|--|----------------------------------|
| 1- <i>Lig. pectinatum anguli</i> | 5- Plexus aqueux |
| 2- Réseau trabéculaire uvéal | 6- <i>Plexus venosus sclerae</i> |
| 3- <i>Spatia anguli iridocornealis</i> | |
| 4- Réseau trabéculaire cornéo-scléral | |

Coloration standard Hémalun Eosine x10

Photographie I. RAYMOND

II.2.5.2. Chez l'Homme

Le réseau trabéculaire peut être scindé en trois zones d'importance. Les deux premières forment la portion lamellaire du réseau trabéculaire. Cette portion est constituée d'une partie interne, le réseau trabéculaire uvéal, s'étendant de la cornée jusqu'au corps ciliaire ou à la racine de l'iris, et d'une partie plus périphérique, le réseau trabéculaire cornéo-scléral, s'étendant de la cornée à l'éperon scléral. Une troisième portion, non décrite chez le Chien, présente une structure non lamellaire et forme le réseau juxta-caliculaire, partie du mur interne du "canal de Schlemm" [26].

II.2.5.2.1. Organisation générale du réseau trabéculaire uvéal

Il est constitué de fibres dont l'entrecroisement forme des mailles irrégulières. Ces fibres ont un diamètre de 5 μm à 12 μm , soit un calibre comparable à celles du Chien. Leur attache cornéenne se fait sur l'anneau de Schwalbe. Elles cheminent postérieurement suivant un trajet oblique et prennent relais à hauteur de l'éperon scléral pour atteindre le muscle ciliaire ou la racine de l'iris. Ces fibres ont une direction générale perpendiculaire à la cornée et ménagent des espaces relativement larges entre elles. Les fibres du réseau trabéculaire uvéal seraient des expansions antérieures des tendons du muscle ciliaire [14, 40].

II.2.5.2.2. Ultrastructure du réseau trabéculaire uvéal

Chaque fibre est composée d'une couche centrale constituée de fibrilles de collagène de type I et III [26], et de périodicité de 640 Å, mélangées à des éléments de périodicité de 1000 Å. Entourant cet axe central, une couche polymorphe contient des fibres élastiques engainées par des fibrilles de périodicité de 1000 Å. Les fibres sont enchâssées dans une substance contenant des chondroïtine-sulfates et des glycosaminoglycanes [40] que nous décrivons plus loin.

La couche périphérique est formée d'une membrane basale, composée de collagène de type IV, de laminine, et de fibronectine [26], sur laquelle repose une couche de cellules endothéliales. Ces cellules possèdent un noyau saillant avec un matériel cellulaire comparable à celui des cellules de la même structure chez le Chien. Elles ont des propriétés phagocytaires et seraient capables d'éliminer certaines bactéries,

des grains de pigments, des hématies, assurant un nettoyage du filtre trabéculaire [40].

II.2.5.2.3. Organisation générale du réseau trabéculaire cornéo-scléral

Il est formé de feuillets conjonctifs superposés et perforés. L'insertion antérieure du réseau trabéculaire cornéo-scléral se fait sur l'anneau de Schwalbe. Ici, les feuillets s'empilent sur trois ou quatre couches. Les feuillets augmentent progressivement en nombre à mesure qu'ils cheminent postérieurement, pour atteindre un empilement de quinze à vingt couches à hauteur de leur terminaison sur l'éperon scléral. Ici, l'épaisseur du réseau trabéculaire cornéo-scléral est de 120 μm environ. La direction générale des fibres du réseau trabéculaire cornéo-scléral est parallèle à la cornée.

Les feuillets, d'une épaisseur de 5 μm , s'amincissent en se rapprochant du "canal de Schlemm", de même que les espaces interlamellaires, qui passent de 5 μm à 1 μm [40, 51].

II.2.5.2.4. Ultrastructure du réseau trabéculaire cornéo-scléral

L'ultrastructure des fibres du réseau trabéculaire cornéo-scléral est la même que celles du réseau trabéculaire uvéal avec une trame de collagène et de fibres élastiques entourées de cellules endothéliales reposant sur une membrane basale [40].

II.2.5.2.5. Organisation générale du réseau trabéculaire cribriforme

Il s'agit comme nous l'avons dit d'une structure non lamellaire située entre le mur interne du "canal de Schlemm" et le réseau trabéculaire cornéo-scléral. Constitué d'un tissu conjonctif lâche dont l'épaisseur ne dépasse pas 10 μm , il est en contact avec la paroi interne du "canal de Schlemm" dont les cellules forment une couche monocellulaire que nous décrivons plus loin [40].

II.2.5.2.6. Ultrastructure du réseau trabéculaire cribriforme

Le réseau trabéculaire cribriforme est constitué d'une substance intercellulaire homogène, riche en mucopolysaccharides sensibles à la hyaluronidase et contenant quelques fibrilles de collagène de type I et III et un réseau de fibres élastiques dont l'ultrastructure et l'orientation sont comparables à celles des fibres du réseau trabéculaire cornéo-scléral [26].

Au sein de cette substance intercellulaire sont disposées deux couches discontinues de cellules endothéliales.

Ainsi chez l'Homme, le réseau trabéculaire est situé postérieurement à l'anneau de Schwalbe et comble surtout la portion la plus périphérique de l'AIC. Seuls quelques fibres du réseau trabéculaire uvéal s'irradient plus profondément vers la racine de l'iris.

Sur le plan constitutionnel, nous avons vu que le réseau trabéculaire présente de fortes analogies chez l'Homme et le Chien. La disposition de ce réseau est néanmoins très différente dans la mesure où chez le Chien, ce dernier comble un territoire beaucoup plus étendu, notamment en profondeur.

L'organisation de l'angle irido-cornéen et le détail du réseau trabéculaire des primates sont montrées sur les photographies 5 et 6.

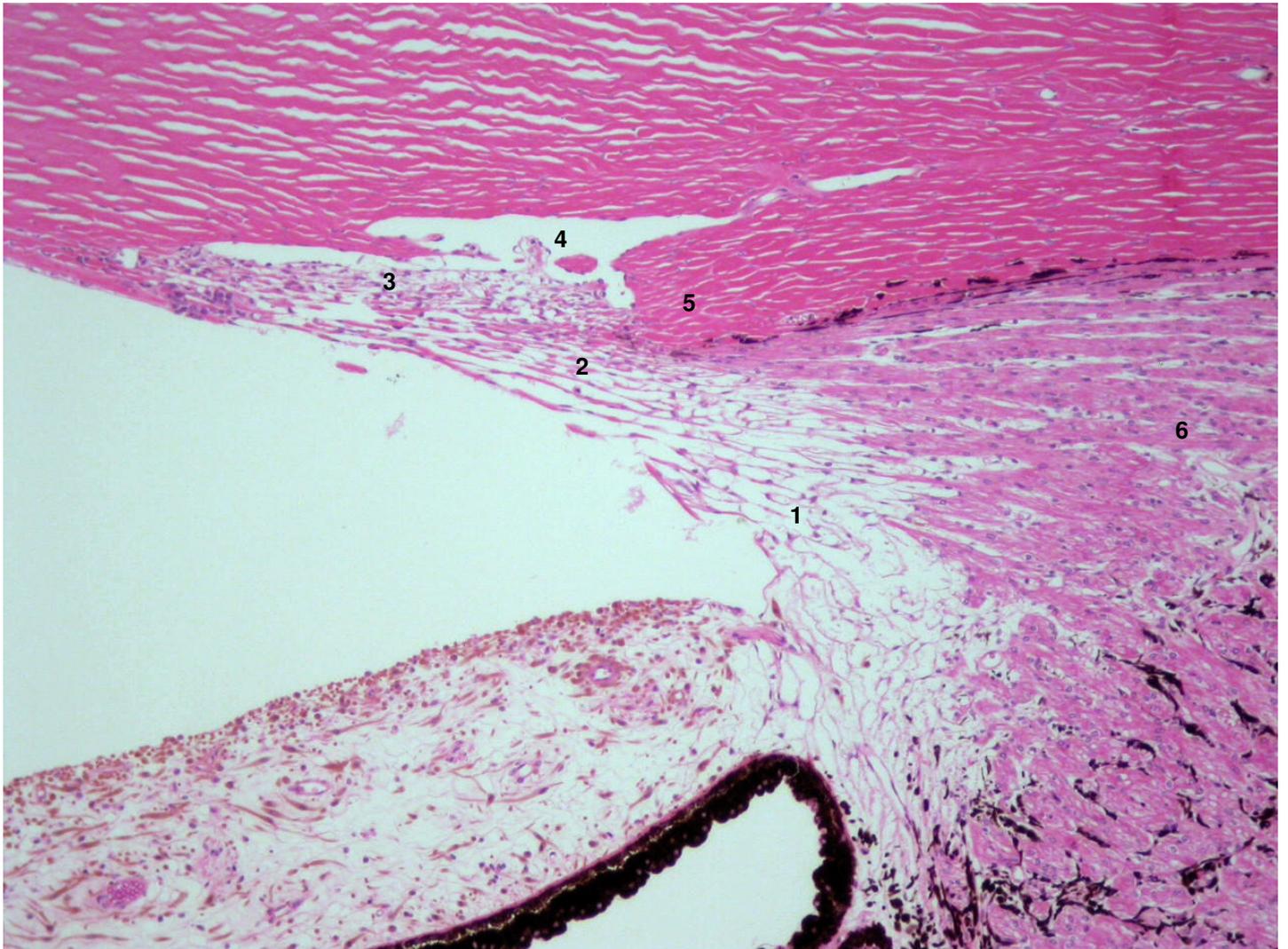


Photographie 5 : Angle irido-cornéen du Singe

- | | |
|--------------------------|-----------------------------|
| 1- <i>Cornea</i> | 5- <i>Iris</i> |
| 2- <i>Limbus corneae</i> | 6- <i>Musculus ciliaris</i> |
| 3- <i>Sclera</i> | 7- Réseau trabéculaire |
| 4- "Canal de Schlemm" | |

Coloration standard Hémalun Eosine x4

Photographie I. RAYMOND



Photographie 6 : Réseau trabéculaire et "canal de Schlemm" du Singe

- | | |
|---------------------------------------|-----------------------------|
| 1- Réseau trabéculaire uvéal | 5- Eperon scléral |
| 2- Réseau trabéculaire cornéo-scléral | 6- <i>Musculus ciliaris</i> |
| 3- Réseau trabéculaire cribiforme | |
| 4- "Canal de Schlemm" | |

Coloration standard Hémalun Eosine x10

Photographie I. RAYMOND

II.2.6. Drainage de l'humeur aqueuse

Le système de drainage de l'humeur aqueuse, partie intégrante de l'angle irido-cornéen, est probablement la structure qui diffère le plus entre les primates, représentés ici par l'Homme, et les autres espèces dont le Chien. Ainsi, l'évolution a vu apparaître chez les primates un élément bien individualisé, absent chez les autres espèces et responsable de la majeure partie du drainage de l'humeur aqueuse, le "canal de Schlemm".

II.2.6.1. Chez le Chien

Le drainage de l'humeur aqueuse est assuré par un système de vaisseaux appelé plexus aqueux, puis par les sinus veineux de la sclère (*Sinus venosus sclerae*) formant le plexus veineux de la sclère (*Plexus venosus sclerae*), aussi dénommé plexus veineux intrascléral [11].

II.2.6.1.1. Organisation générale du plexus aqueux

Le plexus aqueux est un système de vaisseaux décrit par Bedford (bedford princeps). Il est situé entre la partie externe du réseau trabéculaire cornéo-scléral et la face interne des lamelles sclérales. En coupe longitudinale, ce plexus est constitué d'une série de vaisseaux aplatis et allongés à disposition radiaire. Les vaisseaux sont reliés entre eux par un réseau d'anastomoses complexes. De très nombreuses variations sont décrites dans les limites et la conformation générale du plexus aqueux, au sein d'un même œil.

Le plexus aqueux est connecté au plexus veineux de la sclère par des vaisseaux de petit calibre, appelées veines trabéculaires, qui correspondent aux collecteurs internes décrits chez l'Homme (voir *II.2.6.2.1.*) [11].

II.2.6.1.2. Ultrastructure du plexus aqueux

Les vaisseaux formant le plexus aqueux et les vaisseaux collecteurs ou veines trabéculaires présentent une ultrastructure comparable. L'endothélium est fin et atténué. Les cellules formant l'endothélium ont un noyau étroit et allongé ; elles sont attachées à une matrice de collagène par une membrane basale continue. La matrice de collagène est majoritairement acellulaire et ne comporte que quelques fibroblastes en fuseau, dont l'axe principal est parallèle à la lumière du vaisseau [11].

La paroi interne des vaisseaux du plexus veineux est en revanche constituée d'un tissu de connexion lâche, dans lequel les cellules sont plus fréquentes. L'endothélium de ces vaisseaux présente une membrane basale discontinue. Seuls quelques brins de matériel lamellaire y sont présents. L'endothélium est fin et montre des ouvertures de 0.2 à 1 μm de diamètre. En outre, des vacuoles géantes de plus de 10 μm se distribuent sporadiquement sur l'endothélium et font saillie dans la lumière vasculaire [11].

Les composants extra-cellulaires du tissu de connexion lâche, consistent en un agrégat sous-endothélial de matériel fibrillaire, de fibrilles de collagène de diamètre variable et de plaques de matériel élastique. Ces plaques possèdent une trame centrale entourée d'une gaine de micro-fibrilles. Les cellules constituant ce "réseau endothélial" présentent la même ultrastructure que les cellules du réseau trabéculaire ; elles sont néanmoins plus allongées et sont en contact les unes avec les autres par des expansions cytoplasmiques graciles, elles-mêmes liées à l'endothélium des vaisseaux [11].

II.2.6.1.3. Organisation générale du plexus veineux de la sclère

Le plexus veineux de la sclère est un système de vaisseaux localisés entre le plexus aqueux et les lamelles les plus internes de la sclère. Ils siègent dans sa partie antérieure, juste derrière le limbe scléro-cornéen.

Les vaisseaux formant le plexus sont aplatis et allongés, et leur grand axe est parallèle au limbe. Il existe de nombreuses variations dans les limites et la conformation générale du plexus au sein d'un même œil. Ainsi, latéralement et médialement au bulbe de l'œil, le plexus ne comprend que deux vaisseaux placés à 1,5 mm du limbe cornéen, tandis que dorsalement et ventralement, il en possède quatre, situés 3 à 4 mm en arrière du limbe [52].

Les vaisseaux individuels sont situés les uns derrière les autres et sont connectés entre eux par un réseau complexe d'anastomoses à disposition le plus souvent radiaire, perpendiculaire aux vaisseaux qu'elles lient. Les dimensions de la lumière de ces vaisseaux varient de 0.4 à 1.2 mm pour l'axe longitudinal, et de 0.01 à 0.04 mm pour l'axe opposé.

Les deux vaisseaux les plus antérieurs reçoivent en profondeur les veines trabéculaires qui collectent l'humeur aqueuse à travers le réseau trabéculaire cornéo-scléral et font relais au sein du plexus aqueux [52].

En région superficielle, les vaisseaux formant le plexus veineux de la sclère reçoivent les boucles veineuses épisclérales, prolongement des veines ciliaires antérieures et des veines conjonctivales antérieures et postérieures.

II.2.6.2. Chez l'Homme

Le drainage de l'humeur aqueuse est assuré en premier lieu par une structure singulière, inexistante chez le Chien [25], le "canal de Schlemm" poursuivi par des plexus veineux et des veines aqueuses jusqu'aux veines épisclérales.

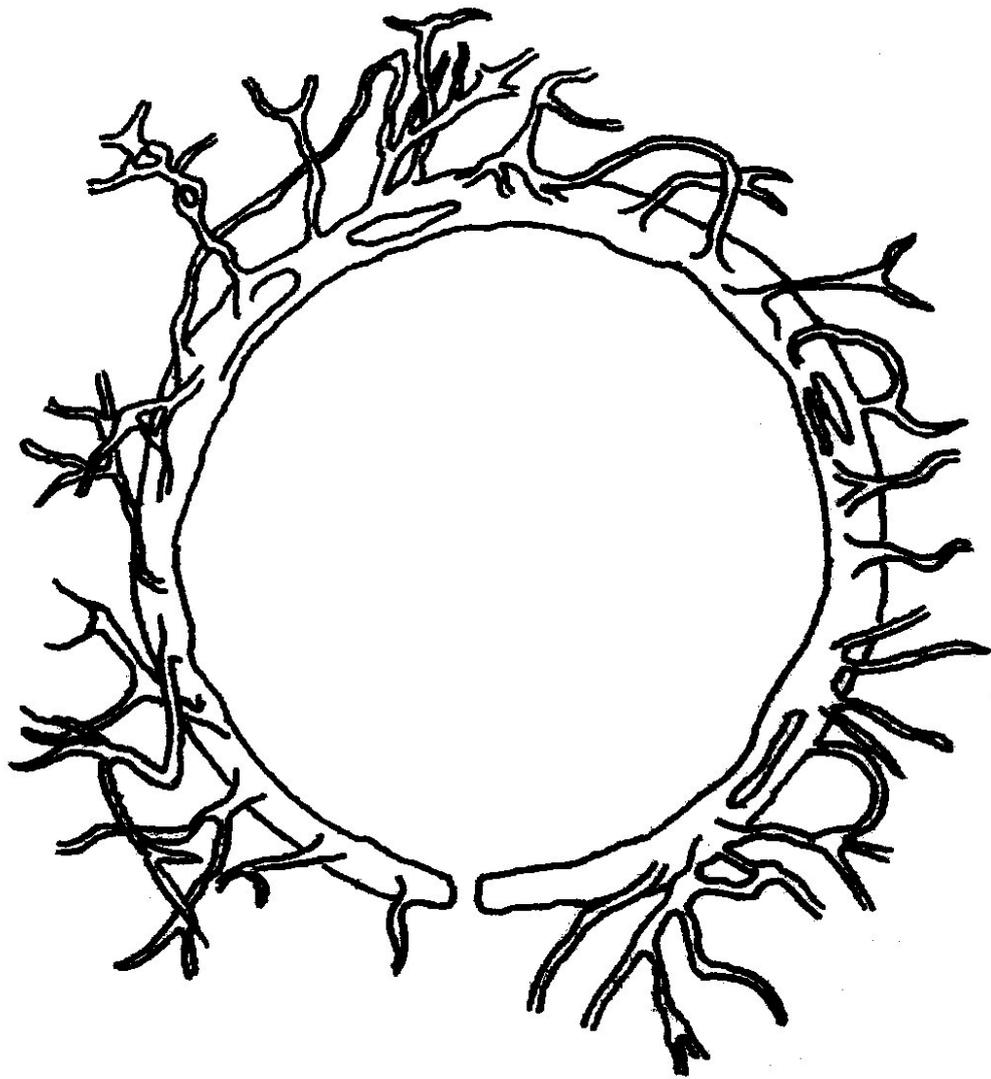
II.2.6.2.1. Organisation générale du "canal de Schlemm" ¹

Le "canal de Schlemm" (Figure 3) est une structure annulaire longue de 36 à 40 mm, disposée dans la partie postérieure de la gouttière sclérale (**III.2.1b**) parallèlement au limbe. Son diamètre est de 0,25 mm en moyenne et il présente une forme arrondie ou triangulaire en coupe transversale. Sur sa portion externe s'implantent les canaux collecteurs efférents tandis que sa portion interne, encore appelée mur interne, jouxte le réseau trabéculaire cribiforme [40]. La lumière du "canal de Schlemm" n'est pas uniforme et ménage parfois des trajets doubles ou triples, séparés entre eux par une fine membrane [52].

¹ Le terme de canal a été injustement employé pour décrire cette entité anatomique dans la mesure où un canal défini habituellement un trajet ménagé dans l'épaisseur d'un tissu osseux, ce qui n'est pas le cas du "canal de Schlemm". Cependant, cette dénomination étant employée dans tous les ouvrages et articles abordant l'anatomie de l'AIC, c'est le terme que nous emploierons dans la suite du développement.

Figure 4 : Représentation du "canal de Schlemm" et de ses efférents (d'après[51])

Noter la forme annulaire du canal, les nombreux efférents qui ménagent parfois entre eux des anastomoses et enfin les zones où le canal se divise et possède deux ou trois lumières.



Le "canal de Schlemm" présente une organisation histologique comparable à celle d'un vaisseau avec cependant des variations en fonction du versant considéré [40].

- La paroi externe qui donne naissance aux vaisseaux collecteurs comporte une couche de cellules endothéliales à noyaux peu saillants. Elle est en relation avec les plexus veineux scléraux.
- La paroi interne comporte une couche de cellules endothéliales reposant sur une membrane basale ; elles sont unies entre elles par des jonctions étroites : les *zonulae occludentes*. Cette paroi interne est en relation avec la chambre antérieure.

Les canaux efférents du "canal de Schlemm" sont appelés collecteurs. On distingue les collecteurs internes et externes (voir figure 4).

- Les collecteurs externes sont au nombre de 20 à 30 et émergent de la paroi externe du "canal de Schlemm". Ils semblent plus nombreux du côté nasal. Leur calibre varie de celui d'un fin capillaire à celui d'un vaisseau plus large, de la taille d'une veine épisclérale. A la sortie du "canal de Schlemm", la plupart des collecteurs s'anastomose en un plexus de type veineux formé de très nombreux rameaux qui s'enchevêtrent sans organisation précise : c'est le plexus intrascléral profond.

Ce plexus se draine dans un plexus intrascléral superficiel, ou plexus épiscléral, par des rameaux communicants en nombre relativement restreint. Ces rameaux traversent obliquement la sclère et leur diamètre s'amointri avant l'arrivée aux veines épisclérales [51].

Les collecteurs externes peuvent également gagner directement la surface du bulbe de l'œil par les veines aqueuses qui se jettent à leur tour dans les veines épisclérales. Ces veines aqueuses sont fréquentes et rencontrées chez 95% des sujets. Elles sont particulièrement fréquentes dans le quadrant nasal. Leur contenu est transparent et laisse conjecturer leur rôle dans le drainage de l'humeur aqueuse [51].

- Les collecteurs internes, mis en évidence par Sondermann rejoignent le "canal de Schlemm" à angle droit. Ils semblent n'être que des expansions borgnes, véritables diverticules du "canal de Schlemm". Ils sont constitués

d'un endothélium et d'une adventice, et font communiquer directement les espaces inter-trabéculaires avec le "canal de Schlemm". Leur rôle exact dans la circulation de l'humeur aqueuse n'a pas encore été déterminé avec précision et reste discuté [40].

Figure 5 : Détail du "canal de Schlemm" et de ses efférents (d'après [51])

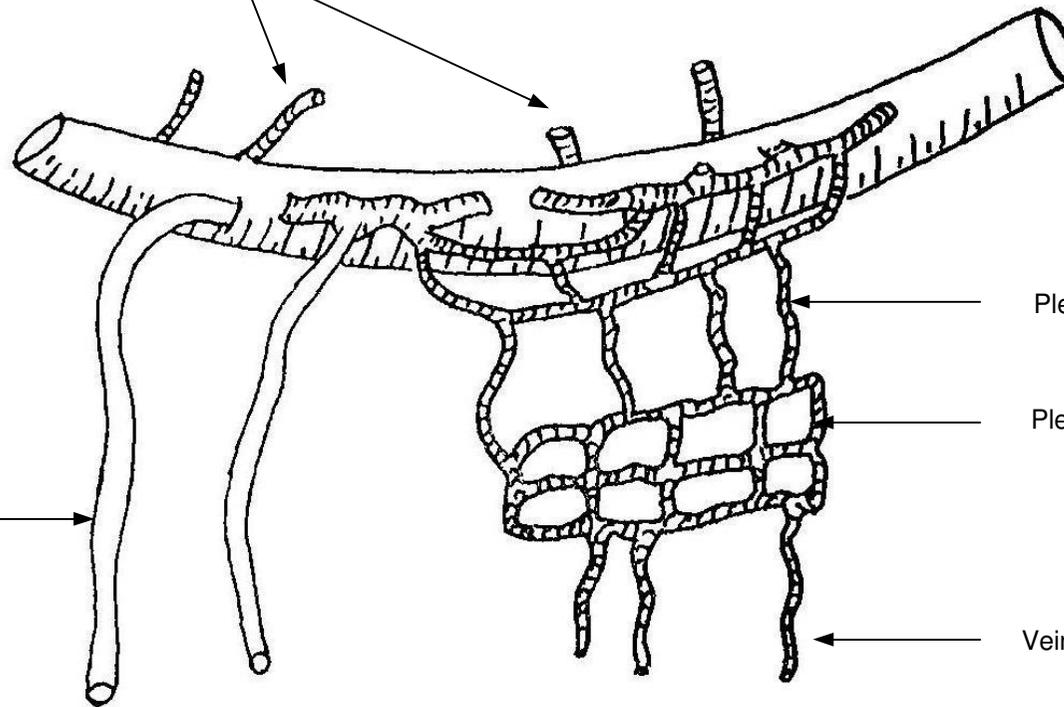
L'humeur aqueuse chemine par les collecteurs internes jusqu'à la lumière du "canal de Schlemm", puis atteint les veines épisclérales par deux voies :

- par les veines aqueuses seules.
- par une succession de deux plexus, le plexus veineux intra-scléral profond d'abord, puis le plexus veineux intra-scléral superficiel.

Collecteurs internes

"Canal de Schlemm"

Veines aqueuses



Plexus veineux intra-scléral profond

Plexus veineux intra-scléral superficiel

Veines épisclérales

II.2.6.2.2. Ultrastructure du "canal de Schlemm"

Comme nous l'avons déjà vu, la structure du "canal de Schlemm" est comparable à celle d'un vaisseau ; néanmoins, l'endothélium diffère selon le versant considéré [40].

- Les cellules endothéliales de la paroi externe du "canal de Schlemm" sont lisses, plates, unies entre elles par des desmosomes. Leur noyau est moyennement volumineux et leur cytoplasme contient des vacuoles et des fibrilles.
- Les cellules endothéliales du mur interne du "canal de Schlemm" sont allongées. Leur grand axe est parallèle à celui du "canal de Schlemm". Leur taille varie de 40 à 120 μm de longueur sur 4 à 12 μm de largeur. Elles sont unies entre elles par des liaisons solides, les *zonulae occludentes*, qui s'opposent en principe à toute diffusion de liquide ou d'éléments figurés intercellulaires [52]. Les noyaux cellulaires font saillie dans la lumière du "canal de Schlemm". Le cytoplasme riche en organites témoigne d'une grande activité cellulaire.

Les cellules endothéliales contiennent des vacuoles de micro-pinocytose pouvant servir au transport intracellulaire de certains constituants de l'humeur aqueuse. Elles contiennent aussi et surtout des vacuoles géantes dont la présence est souvent repérée par l'ouverture d'un pore. Elles forment par intermittence de véritables canaux trans-cellulaires. Ces vacuoles assureraient le passage de l'humeur aqueuse du réseau trabéculaire vers le "canal de Schlemm" et permettraient également le passage d'éléments figurés ou de particules inertes [40].

La taille des vacuoles et leur nombre varient en fonction de la pression intra oculaire. A pression basse, les vacuoles sont peu nombreuses tandis qu'à pression élevée, les lames trabéculaires se distendent et laissent place aux vacuoles dont le volume s'accroît [40]. La présence des mêmes vacuoles au sein du plexus aqueux du Chien (voir II.2.6.1.2.) laisse penser que les mécanismes fondamentaux de transfert d'humeur aqueuse sont comparables chez les deux espèces.

II.3. Vascularisation

L'AIC ne possède pas de vascularisation propre dans la mesure où il représente un carrefour sur lequel convergent de nombreuses autres structures. Cette vascularisation, déterminée par la région de l'AIC, est néanmoins comparable pour les deux espèces.

II.3.1. Artères

Les artères irriguant l'AIC proviennent des structures périphériques.

II.3.1.1. Chez le Chien

L'apport sanguin est assuré dans la région postérieure par les artères ciliaires antérieures issues des rameaux musculaires des muscles droits qui s'irradient en région limbique, ainsi que par les artères épisclérales et les artères postérieures longues qui convergent vers le grand cercle artériel de l'iris. Dans la région la plus antérieure, l'apport sanguin est assuré par les artères conjonctivales qui proviennent également des rameaux musculaires [54].

II.3.1.2. Chez l'Homme

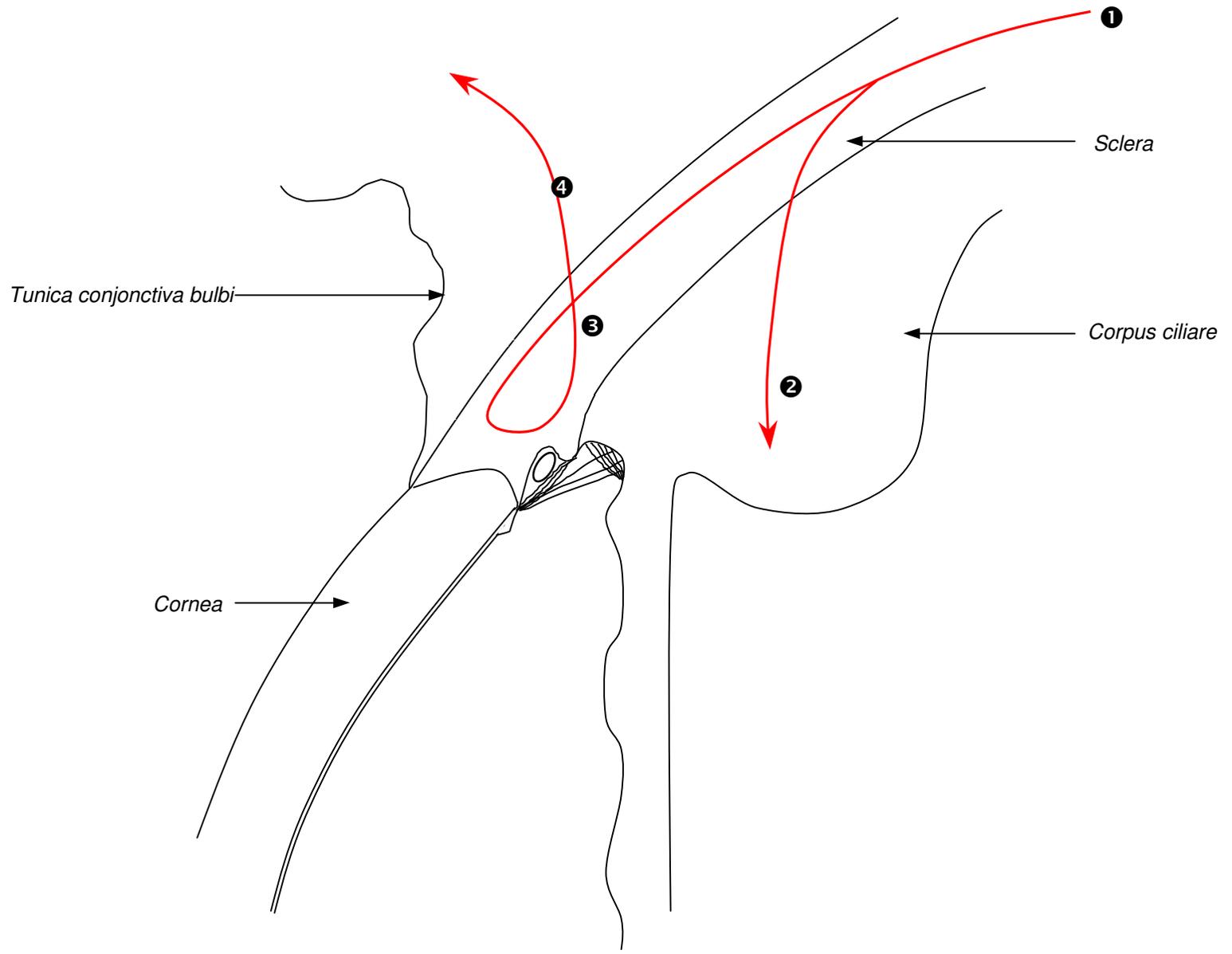
L'apport sanguin en région limbique est aussi sous la dépendance des branches des artères ciliaires antérieures [40].

Ces dernières cheminent dans les couches superficielles de la sclère en direction du limbe et se divisent à environ 3 mm de ce dernier pour donner (figure 6) :

- les rameaux perforants de la sclère (ou artères perforantes) qui envoient de fines ramifications autour du "canal de Schlemm" et forment ainsi un plexus profond qui rentre dans la constitution du grand cercle artériel de l'iris (*Circulus arteriosus iridis major*) [33] ;
- les artères conjonctivales antérieures qui, au tiers moyen du limbe, donnent des branches radiaires pour le plexus péri-cornéen. Elles forment des arcades vasculaires limbiques [33].

Figure 6 : Artères de la région de l'AIC chez l'Homme (d'après [33])

- ❶ : Artère ciliaire antérieure
- ❷ : Rameau perforant
- ❸ : Artère conjonctivale antérieure
- ❹ : Rameau récurrent



II.3.2. Veines

Le système de drainage de l'humeur aqueuse entre en communication avec le drainage veineux de la région. Chez le Chien, du plexus veineux de la sclère partent les veines épisclérales qui se poursuivent par les veines conjonctivales postérieures et antérieures. Les veines conjonctivales antérieures donnent naissance aux veines ciliaires antérieures. La jonction entre veines épisclérales et conjonctivales voit aussi la naissance de boucles marginales qui cheminent près du limbe.

Chez l'Homme, des plexus veineux intra-scléaux nés du "canal de Schlemm" s'échappent les veines épisclérales qui rejoignent les veines conjonctivales antérieures et postérieures. Comme chez le Chien, les veines conjonctivales antérieures donnent les veines ciliaires antérieures.

Par ailleurs, à partir des veines épisclérales issues du vaisseau le plus postérieur du plexus veineux de la sclère chez le Chien, et à partir des veines épisclérales nées du plexus intrascléral superficiel et des veines aqueuses chez l'Homme, le retour veineux se poursuit par les veines vortiqueuses encore appelées veines vorticineuses. Ces veines irradient la partie postérieure du bulbe de l'œil [54].

II.4. Innervation

Elle dépend des nerfs ciliaires longs et courts issus du nerf trijumeau. Ils traversent la sclère pour former un plexus péricornéen ou plexus ciliaire, à la surface du limbe. Ils comportent des cellules ganglionnaires et des anastomoses entre nerfs ciliaires courts et longs. Ils renferment des fibres vasomotrices, motrices, proprioceptives et sensibles [11].

Des rameaux nerveux pénètrent la sclère en avant du limbe. Chez l'Homme, des fibres myélinisées se dirigent vers l'éperon scléral et deviennent amyéliniques en abordant le réseau trabéculaire. Ces fibres se retrouvent au sein du ligament pectiné et du réseau trabéculaire chez le Chien [11].

Des terminaisons nerveuses sont aussi présentes dans les espaces inter-trabéculaires. Certaines pourraient être sensibles aux variations de pression intra-oculaire [40].

II.5. Conclusion

L'AIC est une région anatomique d'intérêt de par sa fonction, mais aussi de par le fait qu'il représente le carrefour entre tunique vasculaire et tunique fibreuse. Malgré de nombreuses similitudes, trois éléments majeurs différencient l'anatomie de l'AIC de l'Homme et du Chien.

► Jonction cornéo-sclérale

Chez l'Homme, cette jonction est beaucoup plus complexe que chez le chien et s'organise en rapport avec le système collecteur (gouttière sclérale, "canal de Schlemm"). L'attache périphérique des constituants de l'AIC est ainsi différente chez l'Homme et le Chien.

► Réseau trabéculaire

Chez le Chien, il s'étend plus postérieurement et plus profondément que chez l'Homme et comble un espace beaucoup plus important. Ainsi chez le Chien, la fente ciliaire est large et profonde. Chez l'Homme, les structures de l'AIC sont "refoulées" en périphérie, contre la sclère.

► Système de drainage

Chez le Chien, un plexus aqueux puis un plexus veineux sont responsables du drainage de l'humeur aqueuse tandis que l'AIC de l'Homme voit apparaître une structure singulière, le "canal de Schlemm".

La figure suivante récapitule les différences majeures qui existent entre l'AIC de l'Homme et du Chien.

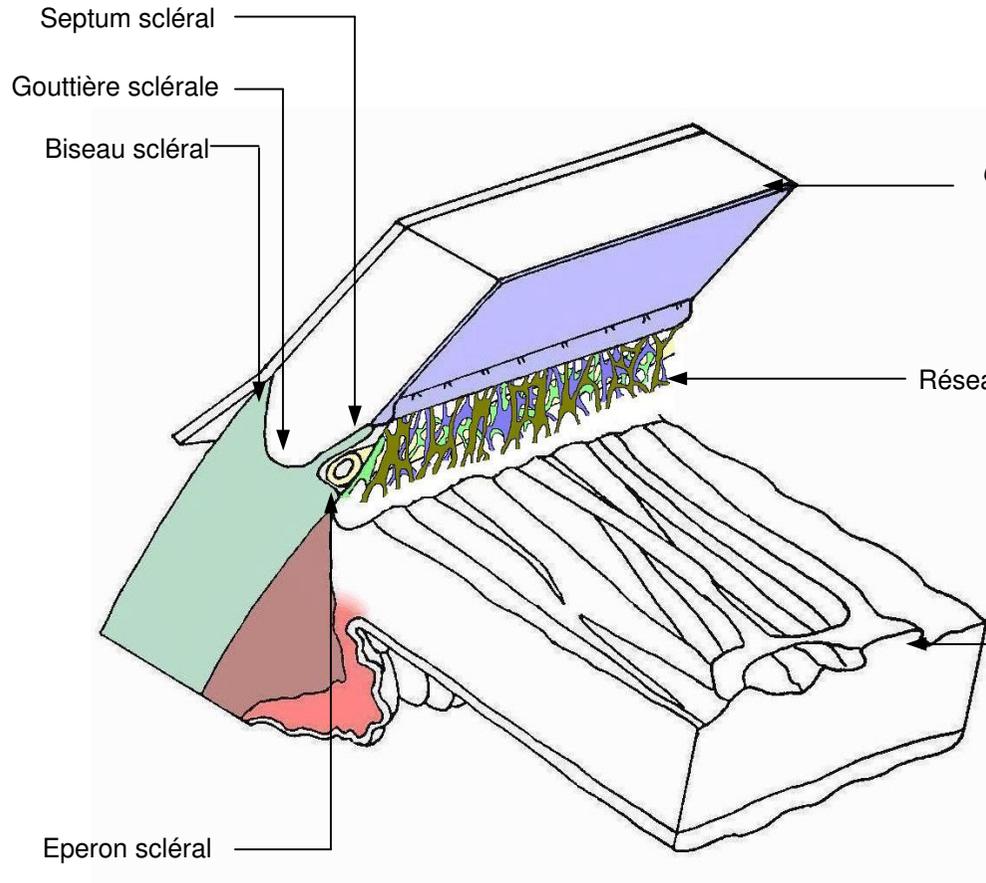
Figure 7 : Comparaison de l'architecture de l'AIC chez l'Homme et le Chien (d'après [23])

Sur ce schéma sont colorées les régions qui diffèrent entre l'Homme et le Chien.

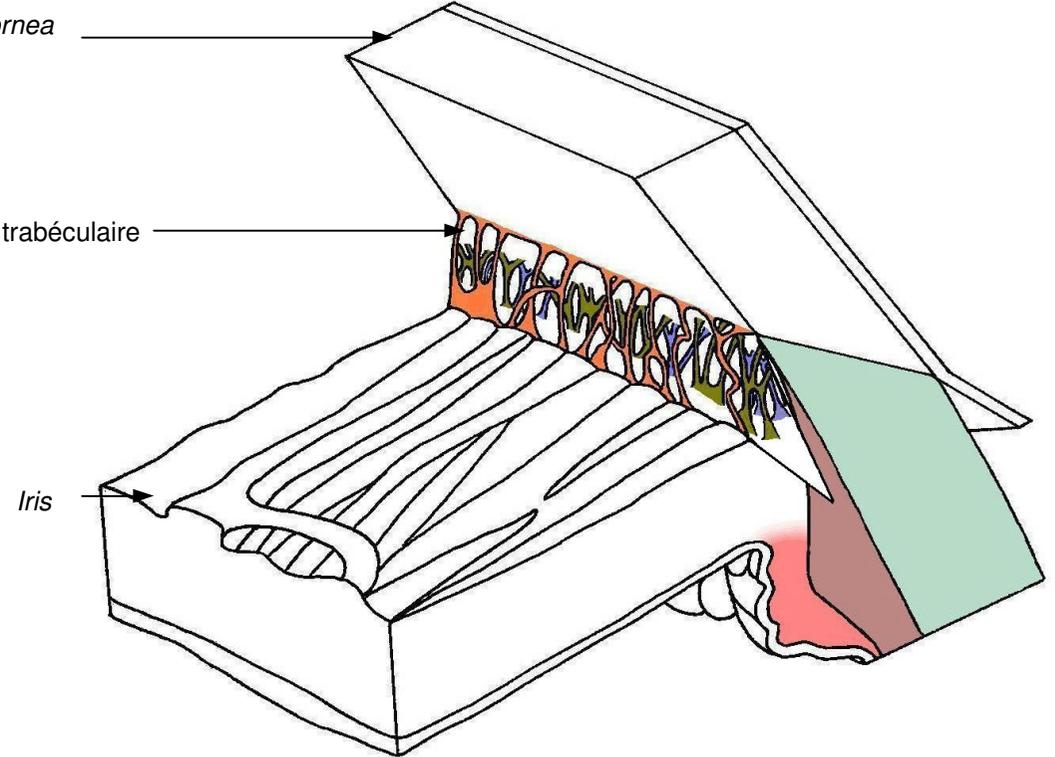
- Le muscle ciliaire couleur lie de vin et les procès ciliaires colorés en rose présentent un développement supérieur chez l'Homme que chez le Chien.
- La sclère, présente pour les deux espèces, montre une architecture différente à son attache cornéenne. Elle est colorée en vert pâle.
- Les réseaux trabéculaires uvéal et cornéo-scléral sont présents chez les deux espèces ; ils sont colorés respectivement en marron et en bleu. Seule leur disposition diffère.
- Le ligament pectiné n'est présent que chez le Chien ; il est coloré en orange sur le schéma.
- Le réseau trabéculaire cribiforme n'est présent que chez l'Homme et est coloré en vert clair.
- Le "canal de Schlemm" existant chez l'Homme seul est coloré en jaune.
- L'anneau de Schwalbe, également présent chez l'Homme seul, est coloré en bleu clair dans le prolongement de l'endothélium cornéen, lui aussi coloré.

De la même façon que pour les schémas précédents, les termes latins sont mentionnés en italique tandis que les autres termes non empruntés aux *Nomina Anatomica Veterinaria* et aux *Nomina Histologica* sont mentionnés en caractère normal.

HOMME



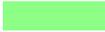
CHIEN



 : *Lig. pectinatum anguli*

 : Réseau trabéculaire uvéal

 : Réseau trabéculaire cornéo-scléral

 : Réseau trabéculaire cribriforme

 : *Sclera*

 : *Epithelium posterius corneae*

 : *Musculus ciliaris*

 : *Processus ciliaris*

II.6. Terminologie

Nous avons vu que les termes utilisés pour décrire certains constituants de l'AIC sont nombreux. Une structure peut porter plusieurs noms, ce qui ajoute à la complexité de la terminologie de l'AIC.

Les termes décrivant la même structure sont rapportés dans le tableau 1. Pour chaque structure sont mentionnés le terme latin en italique, le terme utilisé dans notre développement en gras et les différents termes trouvés dans la littérature.

<p>Réseau trabéculaire uvéal Tissu spongieux Réseau trabéculaire ciliaire Réseau uvéal Réseau réticulé Espace de Fontana</p>	<p><i>Pectinatum anguli iridocornealis</i> Ligament pectiné Ligament suspenseur de l'iris Procès iriens Piliers iriens Fibres pectinées</p>
<p>Réseau trabéculaire cornéoscléral Réseau de l'angle Réseau trabéculaire Réseau scléral Réseau cornéoscléral Ligament cribiforme Tissu juxtacanaliculaire Trabeculum Réseau uvéoscléral</p>	<p>Fente ciliaire Sinus ciliaire Canal ciliaire Sinus cilioscléral</p>
<p>Réseau trabéculaire cribiforme Zone riche en cellules Tissu poreux Aire cribiforme Réseau endothélial Mur trabéculaire Plexus aqueux juxta-angulaire. Zone juxta-canaliculaire</p>	<p>"Canal de Schlemm" Veine circulaire de Schlemm Sinus aqueux de l'angle Plexus aqueux de l'angle Plexus aqueux de Schlemm Veine trabéculaire</p>
	<p><i>Plexus venosus sclerae</i> Plexus veineux de la sclère Canal trabéculaire Plexus trabéculaire Plexus veineux ciliaire Plexus veineux sous-scléral</p>

Tableau 1 : Terminologie des principaux constituants de l'AIC
 (d'après [45])

III. PHYSIOLOGIE COMPAREE DE L'ANGLE IRIDO-CORNEEN CHEZ LE CHIEN ET L'HOMME

L'humeur aqueuse est le fluide présent dans les chambres postérieure et antérieure de l'œil. Produite par les procès ciliaires, partie intégrante du corps ciliaire, l'humeur aqueuse chemine ensuite jusqu'à la chambre antérieure par la pupille, pour atteindre finalement l'angle irido-cornéen après lequel elle intègre la circulation générale.

Son existence est nécessaire au maintien d'un tonus oculaire rendant possible les fonctions visuelles. Elle possède un rôle optique de par sa transparence, un rôle nutritionnel de par sa composition chimique et un rôle émonctoire par évacuation des produits du catabolisme. Elle contribue ainsi à la nutrition du cristallin, de la cornée et des structures de l'AIC et permet l'élimination des déchets issus du catabolisme [16].

L'humeur aqueuse est un milieu original du fait de ses conditions de production et d'écoulement uniques. Elle contribue à donner à l'œil une pression de l'ordre de 15 mm Hg, supérieure à celle régnant dans les fluides intra-tissulaires [16, 24].

La physiologie de l'AIC, intimement liée à la physiologie de l'humeur aqueuse, répond à des mécanismes communs chez l'Homme et le Chien. Nous nous attacherons à décrire les mécanismes généraux de production et d'écoulement de l'humeur aqueuse en ayant soin de mentionner les points qui diffèrent entre l'Homme et le Chien.

III.1. Caractéristiques de l'humeur aqueuse.

III.1.1. Propriétés physiques

III.1.1.1. Volume

Le volume de l'humeur aqueuse est variable. Ainsi chez le Chien dont les variations inter-individuelles sont très importantes, le volume de l'humeur aqueuse varie avec la taille et le poids de l'animal. De même, certaines amétropies entraînent des variations de volume : ainsi, un individu myope aura un volume augmenté tandis qu'un individu hypermétrope aura un volume diminué. Ce volume aura aussi tendance à diminuer avec l'âge.

Le tableau 2 donne les volumes d'humeur aqueuse moyens dans les chambres antérieure et postérieure de l'Homme et du Chien. Sont aussi mentionnés les rapports des volumes d'humeur aqueuse dans chaque chambre sur le volume total [13, 16, 20, 24].

		HOMME	CHIEN
Chambre antérieure	Volume (mL)	0,25	0,4
	Rapport	4/5	2/3
Chambre postérieure	Volume (mL)	0,05	0,2
	Rapport	1/5	1/3
Volume total (mL)		0,3	0,6

Tableau 2 : Volumes d'humeur aqueuse dans les chambres antérieure et postérieure de l'œil de l'Homme et du Chien

III.1.1.2. Densité

La densité de l'humeur aqueuse est identique chez l'Homme et le Chien. Elle est de 1,0059 [13, 16, 20, 24].

III.1.1.3. Indice de réfraction

Identique chez les deux espèces, l'indice de réfraction de l'humeur aqueuse est de 1,33. Il est proche de celui de la cornée et plus faible que celui du cristallin. Il est cependant à peu près semblable à celui de l'ultrafiltrat sanguin [13, 16, 20, 24].

III.1.1.4. Viscosité

Inférieure à la viscosité du plasma et très voisine de celle de l'eau, la viscosité de l'humeur aqueuse est identique pour les deux espèces. Elle est de 1,025 [13, 16, 20, 24].

III.1.1.5. Pression osmotique

Comparable aussi chez l'Homme et le Chien, la pression osmotique est supérieure de 3 à 5 mEq par rapport à celle du plasma du fait du carbonate de sodium et de l'acide ascorbique [13, 16, 20, 24].

III.1.1.6. pH

Le pH de l'humeur aqueuse du Chien et de l'Homme est de 7,21 c'est à dire inférieur à celui du plasma [13, 20, 34].

III.1.2. Composition chimique de l'humeur aqueuse

L'analyse chimique montre que l'humeur aqueuse est sécrétée. L'humeur aqueuse prélevée dans la chambre postérieure de l'œil au voisinage de son lieu de production diffère notablement du plasma, non pas par la nature de ses composants mais par leur concentration.

III.1.2.1. Eau

L'eau représente 99 % de la composition de l'humeur aqueuse chez les deux espèces [1, 13, 16, 20, 21, 24, 34].

III.1.2.2. Protéines

L'humeur aqueuse est plus faible en protéines que le plasma [1, 16, 20, 21, 24, 34].

Le tableau 3 montre les concentrations protéiques plasmatiques et dans l'humeur aqueuse pour les deux espèces.

	HOMME	CHIEN
Concentration protéique plasmatique (mg/100mL)	80-84	65
Concentration protéique dans l'humeur aqueuse (mg/100mL)	5-16	3,8

Tableau 3 : Concentrations protéiques plasmatiques et dans l'humeur aqueuse chez l'Homme et chez le Chien [1, 13, 16, 20, 21, 24, 34]

III.1.2.3. Substances non électrolytiques

- Le glucose : il est métabolisé par le cristallin ; sa concentration est donc plus faible dans l'humeur aqueuse que dans le plasma.
- Les acides aminés : selon ECOFFET et DEMAILLY [16], ils seraient métabolisés par le cristallin chez l'Homme ; selon GELATT [20], ils seraient captés par le corps vitré chez le Chien. La concentration en acides aminés est inférieure dans l'humeur aqueuse que dans le plasma.
- L'acide lactique : produit du catabolisme du glucose, sa concentration est plus forte dans l'humeur aqueuse que dans le plasma. Chez l'Homme aphake, la concentration en acide lactique dans le plasma et dans l'humeur aqueuse est identique ce qui indiquerait que le cristallin seul métabolise le glucose. Chez le Chien, le glucose est aussi métabolisé par la cornée, le corps ciliaire et la rétine.
- L'acide ascorbique : sa concentration est également plus importante dans l'humeur aqueuse que dans le plasma, du fait de l'activité propre de l'épithélium ciliaire. Les rôles de l'acide ascorbique seraient multiples : stockage des catécholamines dans l'iris, cofacteur des réactions de transfert d'électrons, agent réducteur dans les hydroxylations, absorption des rayons UV, anti-oxydant, régulation de la production de glycosaminoglycanes du réseau trabéculaire [20, 24].
- L'acide hyaluronique : il se trouve en quantité variable dans l'humeur aqueuse chez l'Homme, tandis qu'il est inexistant dans le sang. Il est polymérisé par une hyaluronidase présente dans les tissus de l'uvée antérieure [16]. Chez le Chien, la concentration en acide hyaluronique est nulle dans le sang et l'humeur aqueuse ; il est seulement retrouvé dans le corps vitré.
- Des lipides sont aussi retrouvés chez l'Homme et le Chien.

Le tableau 4 montre les concentrations en substances non électrolytiques du plasma et de l'humeur aqueuse des deux espèces de notre étude.

	HOMME		CHIEN	
	Humeur aqueuse	Plasma	Humeur aqueuse	Plasma
Glucose (g/l)	0,5-0,75	1	0,9	1,3
Urée	100 mg/l		7,45 (μmol/ml)	1,6-10,9 (mmol/ml)
Acides aminés (μmol/ml)	A peine<		2,86	1,87
Acide ascorbique (μmol/ml)	1,06	0,04	0,55	
Acide lactique (μmol/ml)	4,5	1,9	ND	ND
Acide hyaluronique (μg/ml)	1,1	0	0	0

Tableau 4 : Concentrations des substances non électrolytiques dans l'humeur aqueuse et le plasma chez l'Homme et chez le Chien [1, 16, 20, 21, 24, 34]

III.1.2.4. Substances électrolytiques

- Le sodium est le cation numériquement le plus important du plasma et de l'humeur aqueuse. Chez l'Homme, il est en concentration légèrement supérieure dans l'humeur aqueuse que dans le plasma. Cependant, expérimentalement, la légère hyperosmolarité de l'humeur aqueuse antérieure ne semble pas constituer une force suffisante pour provoquer un appel d'eau à l'intérieure de l'œil [16]. Chez le Chien à l'inverse, le sodium est à peine plus concentré dans le plasma que dans l'humeur aqueuse.
- Pour l'Homme, les concentrations en potassium, calcium et phosphates sont sensiblement plus importantes dans le plasma que dans l'humeur aqueuse. Chez le Chien, les concentrations en potassium sont presque identiques tandis que le calcium et les phosphates sont plus concentrés dans le plasma que dans l'humeur aqueuse.

- Les bicarbonates et les chlorures sont plus concentrés dans l'humeur aqueuse que dans le plasma chez le Chien. Chez l'Homme, la concentration en chlorures est presque équivalente, tandis que les bicarbonates sont plus concentrés dans le plasma que dans l'humeur aqueuse.

Le tableau 5 montre les concentrations des substances électrolytiques dans l'humeur aqueuse et le plasma de l'Homme et du Chien.

	HOMME		CHIEN	
	Humeur aqueuse	Plasma	Humeur aqueuse	Plasma
Sodium (Na⁺) ($\mu\text{mol/ml}$)	142	137,5	149,4	154
Potassium (K⁺) ($\mu\text{mol/ml}$)	4	4,3	5	4,4
Calcium (Ca²⁺) ($\mu\text{mol/ml}$)	1,2	2,3	2,9	5,2
Phosphates (PO₄²⁻) ($\mu\text{mol/ml}$)	0,62	1,1	0,53	1,26
Chlorures (Cl⁻) ($\mu\text{mol/ml}$)	124-131	106-124	124,8	115,9
Bicarbonates (HCO₃⁻) ($\mu\text{mol/ml}$)	20,2	25-27,5	R ² = 1,13	

Tableau 5 : Concentrations des substances électrolytiques dans l'humeur aqueuse et le plasma chez l'Homme et chez le Chien [1, 16, 20, 21, 24, 34]

² R est le rapport de la concentration d'un constituant dans l'humeur aqueuse sur sa concentration plasmatique.

III.1.2.5. Enzymes

De nombreuses enzymes rentrent dans la composition de l'humeur aqueuse chez les deux espèces. Ainsi sont retrouvées l'anhydrase carbonique, certaines protéases, des transaminases, anticholinestérases, hyaluronidases, une phosphatase alcaline et une histaminase.

III.1.3. Humeur aqueuse seconde

Si l'humeur aqueuse est totalement ponctionnée, le segment antérieur reforme une humeur aqueuse dite seconde en 40 à 50 minutes. Sa composition est beaucoup plus proche de celle du plasma. La différence majeure qui existe entre l'humeur aqueuse et l'humeur aqueuse seconde est le taux de protéines qui est trente fois supérieur pour l'humeur aqueuse seconde chez l'Homme comme chez le Chien. Pour cette raison, cette dernière est aussi appelée humeur aqueuse plasmoïde. Toutes les substances qui sont en déficit dans l'humeur aqueuse par rapport au plasma augmentent dans l'humeur aqueuse seconde (glucose, urée). A l'inverse, les substances en excès diminuent (acide lactique, acide hyaluronique, acide ascorbique). La plus forte concentration en protéines est due à un changement de l'état vasculaire des membranes constituant la barrière hémato-aqueuse. Ce changement est secondaire à une chute brutale de la pression intra-oculaire lors de perforation cornéenne ou d'entrée en chambre antérieure lors d'une chirurgie endo-oculaire.

En 48 heures, la composition initiale de l'humeur aqueuse est rétablie [16,24].

III.2. Mécanismes de production de l'humeur aqueuse

Les mécanismes décrits dans le développement qui suit sont communs à l'Homme et au Chien.

III.2.1. Notion de barrière hémato-aqueuse

La différence de concentrations en protéines entre l'humeur aqueuse et le plasma traduit la présence d'une barrière sélective entre la circulation systémique et le

segment antérieur de l'œil. Il s'agit de la barrière hémato-aqueuse³. L'existence de cette barrière a été démontrée par DAVSON en 1947. Il a observé qu'après injection intraveineuse d'un produit et son maintien dans le sang à une concentration constante, les taux obtenus dans l'humeur aqueuse sont bien moindres que ceux mesurés dans d'autres tissus comme les muscles striés ou le foie. Le terme « barrière » indique ici les difficultés que rencontre une substance pour passer du plasma vers l'humeur aqueuse [4].

III.2.1.1. Sites de la barrière hémato-aqueuse

Il s'agit du corps ciliaire et de l'iris

III.2.1.1.1. *Corps ciliaire*

Les capillaires ciliaires qui irriguent le tissu sous l'épithélium des procès ciliaires sont larges et fenêtrés. Ils sont hautement perméables à toutes les substances en solution, au point que même les protéines sériques passent dans le stroma et y établissent une pression oncotique élevée. C'est donc l'épithélium ciliaire qui est le siège principal de la barrière hémato-aqueuse. Il représente le prolongement antérieur des deux couches de la rétine et est constitué d'une couche pigmentaire externe (aussi appelée épithélium pigmenté) et d'une couche interne de cellules claires (aussi appelée épithélium non pigmenté). Les connexions intercellulaires sont particulièrement importantes. La base des cellules pigmentaires est fermement arrimée à la membrane basale par des inter-digitations complexes. Des gap-jonctions réunissent les cellules pigmentaires adjacentes et les apex des cellules pigmentaires et des cellules claires. Ces dernières sont liées entre elles par des jonctions imperméables. Ces jonctions imperméables ont pour rôle de restreindre les échanges.

³ L'œil possède deux barrières hémato-oculaires qui "isolent" de la circulation générale. Il s'agit de la barrière hémato-aqueuse que nous décrivons ici et de la barrière hémato-rétinienne, présente dans le segment postérieur de l'œil.

III.2.1.1.2. Iris

L'épithélium postérieur de l'iris est fonctionnellement similaire à la couche des cellules claires des procès ciliaires. Des jonctions imperméables ferment les espaces intercellulaires. Les capillaires iriens possèdent des cellules endothéliales aussi réunies entre elles par des jonctions imperméables.

La barrière principale entre le sang et l'humeur aqueuse au sein de l'iris est représentée par les capillaires iriens tandis que l'épithélium postérieur de l'iris assure une barrière accessoire.

III.2.1.2. Fonctionnement de la barrière hémato-aqueuse

La barrière hémato-aqueuse est sélective. Ceci se démontre par le fait que l'humeur aqueuse ne possède pas d'éléments figurés, et présente une concentration en protéine très faible. Néanmoins, l'humeur aqueuse n'est pas un simple ultra-filtrat de plasma : comme nous l'avons vu, certaines molécules comme l'acide ascorbique y sont présentes en plus grande concentration que dans le plasma. Ceci laisse présager l'existence de transports actifs au sein de la barrière, outre les phénomènes cataboliques.

La barrière hémato-aqueuse se caractérise également par la lenteur avec laquelle certaines substances sanguines peuvent la franchir. Elles peuvent être classées en trois catégories :

- les molécules de très haut poids moléculaire comme les protéines plasmatiques ou l'inuline passent très lentement. Comme cela a pu être démontré par l'utilisation de protéines marquées. Ceci explique la faible concentration protéique de l'humeur aqueuse ;
- les molécules de faible poids moléculaire et les ions sont hydrosolubles. C'est le cas de l'urée, de la créatinine, et des oses. Leur pénétration est beaucoup plus rapide que celle des protéines ;
- les molécules liposolubles pénètrent très rapidement. Elles incluent l'alcool éthylique, de nombreux sulfamides. En général, le taux de pénétration de ces substances est proportionnel à leur liposolubilité.

Enfin l'eau, non liposoluble, a néanmoins une pénétration rapide.

III.2.2. Mécanisme de production de l'humeur aqueuse

Le mécanisme de production de l'humeur aqueuse répond à des processus physiologiques divers [35].

► Ultrafiltration

Elle est régie par des lois physiques à travers la barrière hémato-aqueuse. Il s'agit de la dialyse créée par la pression hydrostatique à travers la membrane cellulaire qui sépare le milieu stromal de l'épithélium ciliaire. C'est un mécanisme passif. Un autre mécanisme passif, minoritaire dans la production de l'humeur aqueuse, est néanmoins présent dans le corps ciliaire. Il s'agit de la diffusion, qui répartit également un soluté dans un milieu fluide.

► Sécrétion

Elle permet le passage de molécules dans l'humeur aqueuse contre le gradient de pression ce qui permet d'obtenir une concentration plus importante dans l'humeur aqueuse que dans le sang pour une molécule donnée. Il s'agit d'un mécanisme actif, sous la dépendance d'une énergie fournie par l'ATPase, située le long des membranes cellulaires de l'épithélium non pigmenté.

► Catabolisme

Divers catabolites, libérés notamment par le cristallin, le vitré, la cornée, participent à la composition finale de l'humeur aqueuse.

III.2.2.1. Ultrafiltration

Phénomène passif reposant sur les lois de l'équilibre de DONNAN, l'ultrafiltration se traduit par une dialyse des substances solubles du plasma à travers la paroi des capillaires ciliaires, puis à travers la membrane intercellulaire de l'épithélium ciliaire. La dialyse est accélérée par la pression hydrostatique sanguine du capillaire ciliaire.

La formation de l'humeur aqueuse est favorisée par la très forte vascularisation du corps ciliaire (2-2,5 ml/min/g tissu). Le volume d'humeur aqueuse formée correspond à environ 4% du plasma qui a traversé le capillaire.

Par ailleurs, il existe un contrôle de la circulation locale dans le corps ciliaire comparable à celui de la choroïde. Les principaux agents vasodilatateurs sont le

CO₂, divers éicosanoïdes (dont les prostaglandines), et le système parasympathique. La vasoconstriction résulte d'une stimulation du système sympathique (composante α -adrenergique).

Trois pressions interviennent dans le mécanisme de l'ultrafiltration :

- la pression hydrostatique du capillaire ciliaire qui induit le passage du filtrat stromal (eau et éléments solubles du plasma) vers la chambre postérieure ;
- la pression oncotique, liée à l'accumulation de protéines dans le stroma. La vitesse de diffusion de l'albumine à travers la paroi des vaisseaux des procès ciliaires représente 5% de la vitesse totale de formation de l'humeur aqueuse. Cependant, les couches épithéliales sont beaucoup moins perméables et les protéines, dont la diffusion à travers l'épithélium ciliaire est très réduite, s'accumulent dans le stroma (leur concentration peut y atteindre jusqu'à 75% de la valeur de la concentration plasmatique). Cette forte concentration crée une pression oncotique favorisant le passage d'eau depuis le capillaire ciliaire vers le stroma et retarde le flux hydro-électrolytique du stroma vers la chambre postérieure en s'opposant à la pression hydrostatique ;
- la pression intra-oculaire (notée PIO) régnant dans la chambre postérieure exerce une pression d'opposition à la transsudation depuis les procès ciliaire vers la chambre postérieure.

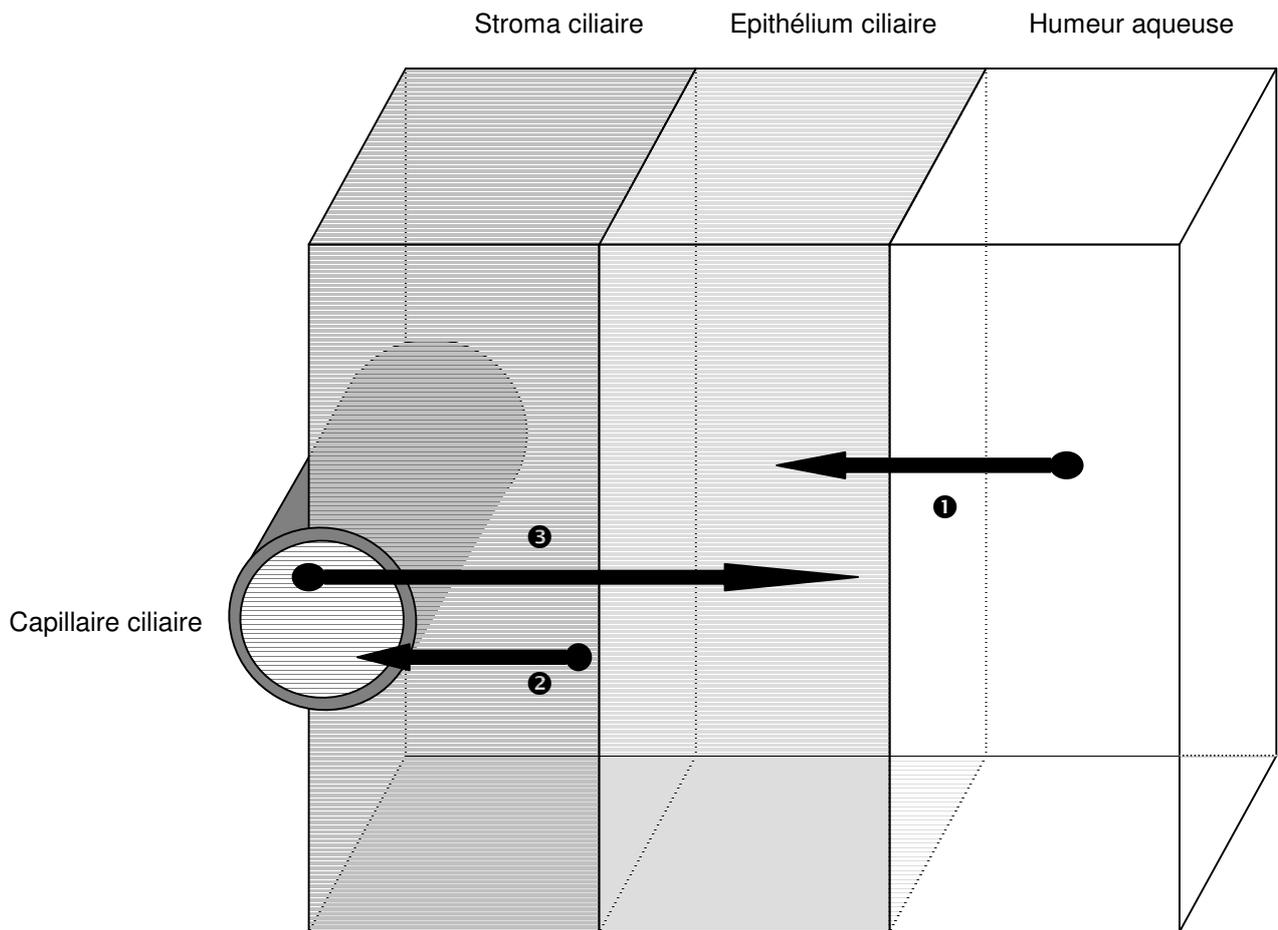
Autrefois, l'ultrafiltration était considérée comme le mécanisme prépondérant dans la formation de l'humeur aqueuse. Les travaux de Bill tendent à prouver que l'ultrafiltration n'est pas le mécanisme principal de formation de l'humeur aqueuse et qu'elle ne participe qu'à l'élaboration d'environ 30 % du volume total. Il a en effet prouvé que la formation d'humeur aqueuse persiste à des pressions artérielles très basses, qu'elle est indépendante de l'élévation du débit artériel dans les procès ciliaires. De plus, il a montré que la pression oncotique stromale combinée à la PIO est supérieure à la pression hydrostatique, provoquant un mouvement net de sortie de fluide depuis la chambre postérieure vers le stroma.

L'ultrafiltration est donc limitée et n'est possible que par la perméabilité relative de l'épithélium ciliaire et par la présence d'une sécrétion active. En fait, plus que le gradient de pression, c'est la différence de concentrations ioniques entre l'humeur aqueuse et le stroma qui joue un rôle majeur.

La figure 8 montre le gradient de pressions intervenant dans l'ultrafiltration plasmatique.

Figure 8 : Gradient de pressions intervenant dans l'ultrafiltration plasmatique (d'après [24])

Les pressions intra-oculaire (❶) et oncotique (❷) s'opposent à la pression hydrostatique (❸).



III.2.2.2. Sécrétion active

Nous avons vu que l'ultrafiltration n'explique pas toute la formation de l'humeur aqueuse ; en effet, des ponctions d'humeur aqueuse en chambre postérieure montrent que les concentrations ioniques qui y règnent ne correspondent pas aux prévisions des lois physique de diffusion. Il existe en chambre postérieure une concentration élevée en potassium (K^+) et sodium (Na^+) qui produit une différence de potentiel de +10 mV entre l'humeur aqueuse et le stroma ciliaire [4, 24].

Par ailleurs, certaines grosses molécules comme l'acide ascorbique, sont plus concentrées dans l'humeur aqueuse que dans le sang, ce qui ne peut s'expliquer par les seuls mécanismes d'ultrafiltration et de diffusion.

Ces faits montrent que certaines molécules passent dans l'humeur aqueuse contre un gradient de concentration, selon des mécanismes actifs. Par ailleurs, au delà d'une certaine concentration plasmatique en acide ascorbique, obtenue expérimentalement, la concentration en acide ascorbique dans l'humeur aqueuse atteint un seuil maximal, ce qui signifie que les pompes responsables du passage actif de cette molécule à travers l'épithélium ciliaire sont saturables [4].

La sécrétion active contribue ainsi à la formation d'environ 70 % de l'humeur aqueuse. Le mécanisme majeur de formation de l'humeur aqueuse repose sur la sécrétion active des ions Na^+ vers la chambre postérieure. L'administration parentérale de Na^+ chez le lapin provoque une accumulation de Na^+ dans la chambre antérieure de l'œil et l'administration d'ouabaïne (inhibiteur des pompes Na^+/K^+ -ATPase), ainsi que le refroidissement, conduisent à une diminution de la sécrétion d'humeur aqueuse.

Les ions Na^+ pénètrent d'abord dans les cellules claires de l'épithélium ciliaire par leur pôle apical, soit par diffusion, soit par des échanges avec des ions H^+ . Ils passent ensuite dans l'humeur aqueuse par sécrétion active dans l'espace latéral intercellulaire. Ils attirent alors l'eau par gradient osmotique et créent ainsi un flux hydro-électrolytique à travers l'espace intercellulaire vers la chambre postérieure. Cette sécrétion active est sous la dépendance de l'activité de l'adénosine triphosphatase (ATPase), localisée dans la membrane de la cellule, et qui fournit l'énergie nécessaire au transport des ions Na^+ . Ce mécanisme est particulièrement

actif ; en effet, chaque cellule claire de l'épithélium ciliaire produit un volume d'humeur aqueuse équivalent à son propre volume en trois minutes environ [24].

Dans le stroma ciliaire, les jonctions intercellulaires empêchent le passage des protéines. Cette accumulation de protéines génère une pression oncotique qui s'exerce entre le stroma et le milieu intercellulaire.

Dans les canaux intercellulaires, le milieu est hypertonique en raison de la sécrétion active de Na^+ , ce qui génère une pression osmotique élevée qui peut compenser la pression oncotique due à l'accumulation de protéine.

L'anhydrase carbonique est une enzyme qui permet la transformation de $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ en $\text{HCO}_3^- + \text{H}^+$. Elle est présente au sein de l'épithélium ciliaire et libère des ions H^+ qui vont s'échanger avec les ions Na^+ extracellulaires situés dans le stroma. Les bicarbonates ainsi synthétisés passent dans l'humeur aqueuse. Ce passage est associé à un transfert d'eau dans la chambre postérieure [20]. L'administration topique ou systémique d'inhibiteur de l'anhydrase carbonique ralentit la réaction, diminuant ainsi la production d'humeur aqueuse. Cela a pour effet de diminuer la PIO. L'acétazolamide, inhibiteur de l'anhydrase carbonique de la classe des apparentés aux sulfamides non bactériostatiques, est ainsi utilisée dans la thérapeutique anti-glaucomeuse par voie générale [34].

Le transport actif par les cellules claires de l'épithélium ciliaire concerne les ions Na^+ mais aussi les ions Cl^- , une partie des ions K^+ , l'acide ascorbique et quelques acides aminés.

La figure 9 montre les mécanismes de sécrétion active de l'humeur aqueuse par les cellules claires de l'épithélium ciliaire.

Figure 9 : Mécanisme de sécrétion active de l'humeur aqueuse par les cellules claires de l'épithélium ciliaire (d'après [24])



Jonction intercellulaire



Co-transport Na^+/H^+



Pompe Na^+/K^+ -ATPase

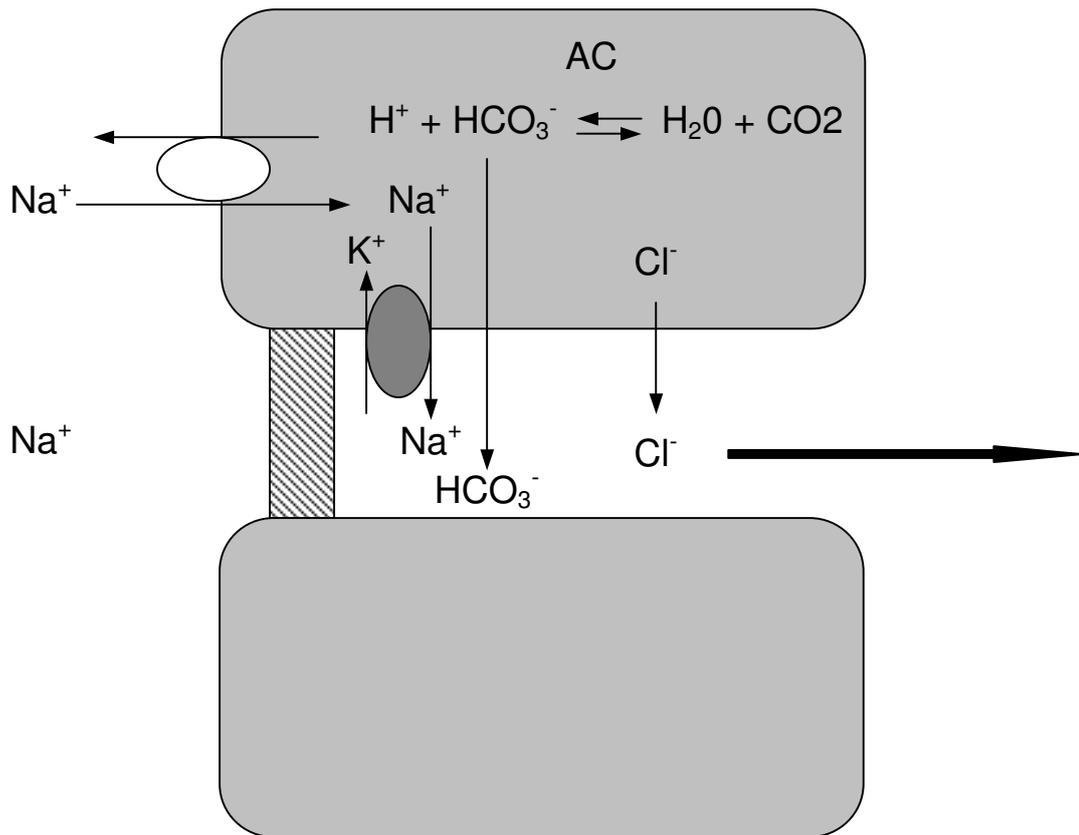
AC

Anhydrase carbonique

Couche pigmentée de l'épithélium ciliaire

Cellules claires de l'épithélium ciliaire

Humeur aqueuse



III.2.2.3. Catabolisme

Pendant longtemps, le rôle du cristallin dans les échanges métaboliques au sein du segment antérieur a été négligé ; il était admis que le contenu de l'humeur aqueuse dépendait du corps ciliaire, passait de la chambre postérieure à la chambre antérieure puis vers le système de drainage de l'AIC, négligeant ainsi le rôle de certains échanges métaboliques avec les milieux environnants. Aujourd'hui, les variations du contenu de l'humeur aqueuse sont considérées comme étant la résultante d'un métabolisme complexe impliquant tous les éléments du segment antérieur de l'œil [22].

Les échanges métaboliques entre le cristallin et l'humeur aqueuse participent à la composition finale de l'humeur aqueuse. Ainsi, le cristallin capte le glucose, le potassium, et les acides aminés et libère du sodium, de l'acide lactique et de l'acide pyruvique.

Il existe aussi des échanges entre la cornée et l'humeur aqueuse. Ainsi, glucose et oxygène sont prélevés de l'humeur aqueuse vers la cornée. Cette dernière rejette de l'acide lactique et du gaz carbonique.

La figure 10 montre la composition chimique du cristallin et de l'humeur aqueuse, ainsi que les diverses modalités d'échange moléculaire entre ces deux milieux.

Figure 10 : Composition chimique de l'humeur aqueuse et du cristallin (d'après [21])

L'eau et les protéines sont exprimées en pourcentage de la masse totale du milieu concerné.

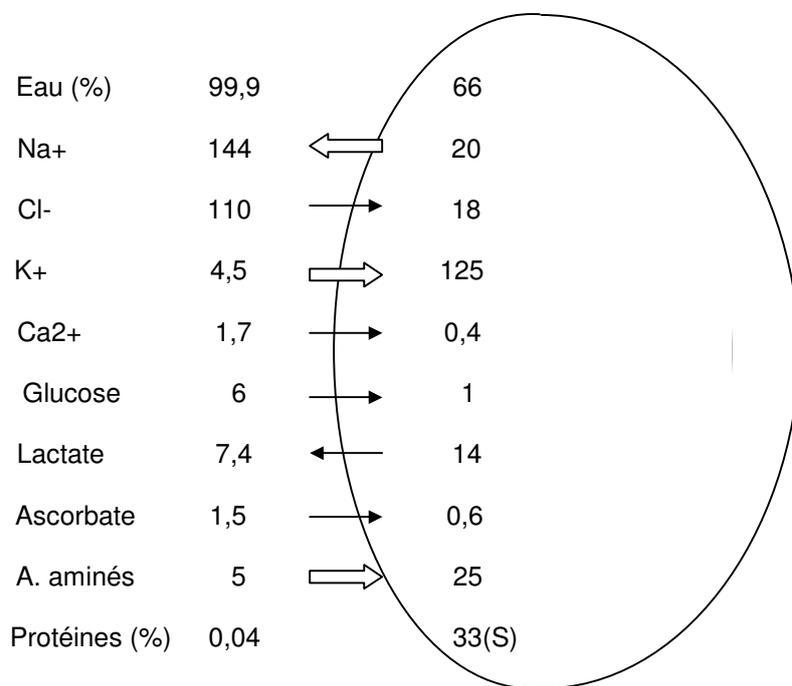
Les valeurs des concentrations des électrolytes sont en mEq/l. Celles des autres constituants sont exprimées en mmol/l d'humeur aqueuse ou en mmol/g de cristallin.

⇨ Transport actif

→ Diffusion

(S) Synthèse

HUMEUR AQUEUSE CRISTALLIN



III.3. Dynamique de l'humeur aqueuse

Nous avons vu que l'humeur aqueuse est le fluide comblant le segment antérieur de l'œil et dont la composition est la résultante de divers mécanismes physiologiques. Elle est produite par le corps ciliaire et chemine jusqu'à l'angle irido-cornéen où elle rejoint la circulation générale par des voies différentes chez le Chien (plexus veineux de la sclère) et chez l'Homme ("canal de Schlemm"). La composition de l'humeur aqueuse est néanmoins remaniée au cours de son cheminement par les échanges avec le vitré, le cristallin et la cornée.

Néanmoins, ce cheminement n'est pas direct, et l'humeur aqueuse possède un trajet complexe, depuis la zone de production jusqu'au lieu de drainage [27].

III.3.1. Rôle de la cornée

Il est admis que les mouvements de fluide au sein d'un tissu suivent un gradient osmotique. L'humeur aqueuse est plus concentrée dans la chambre postérieure près du corps ciliaire que dans la chambre antérieure. La moindre concentration en chambre antérieure serait le fait du transfert d'eau par des pompes endothéliales depuis la cornée vers la chambre antérieure. Pour maintenir sa déturgescence, la cornée transfère en effet de l'eau vers la chambre antérieure [30, 44]. Cette dilution de l'humeur aqueuse est plus prononcée dans la région de l'angle irido-cornéen, et ceci pour trois raisons :

- la cornée est presque deux fois plus épaisse en région limbique qu'en son centre ; ainsi une quantité d'eau plus importante doit être éliminée à cet endroit de la cornée pour en maintenir la déturgescence ;
- la surface de contact entre la cornée et l'humeur aqueuse est plus importante à sa circonférence ;
- la même quantité d'eau a un pouvoir de dilution supérieur sur un faible volume d'humeur aqueuse (dans la région de l'angle irido-cornéen), que sur un volume important (région centrale de la chambre antérieure).

L'humeur aqueuse passe plus facilement par osmose à travers l'AIC dans la mesure où elle est plus diluée que dans les autres régions de la chambre antérieure.

III.3.2. Rôle de l'iris

Il est admis que la constriction de la pupille entraîne une réduction de la pression intra-oculaire. Le mécanisme qui tend à réduire la pression n'a pas pu être déterminé avec certitude, cependant plusieurs théories ont été émises afin d'expliquer ce phénomène.

Selon la première hypothèse, le myosis serait moins impliqué dans la diminution de pression que l'action du muscle ciliaire : la contraction du muscle ciliaire produirait une traction sur le réseau trabéculaire, facilitant l'écoulement de l'humeur aqueuse par ouverture de l'AIC. Ce mécanisme est décrit plus loin dans le développement (voir *III.4.1.1.2.*)

Selon la deuxième hypothèse émise par MARK [27], des mécanismes osmotiques seraient impliqués. Le myosis entraîne une augmentation de la surface de contact entre l'iris et le cristallin et augmente aussi la pression du muscle du sphincter irien sur le cristallin ; ceci aurait pour effet d'une part de retarder le passage d'humeur aqueuse depuis la chambre postérieure vers la chambre antérieure, et d'autre part d'augmenter la différence de concentration de l'humeur aqueuse de part et d'autre de l'iris. Or, il a été montré, grâce aux travaux de Leber, que l'iris est semi-perméable. Il est donc perméable à l'eau, et capte les éléments en solution. Selon toute logique, il y aurait donc un passage d'eau depuis la chambre antérieure (où l'humeur aqueuse est faiblement concentrée), vers la chambre postérieure (où l'humeur aqueuse est davantage concentrée), selon le gradient de concentration. Les éléments en solution seraient au contraire captés par l'iris. La dilution de l'humeur aqueuse en chambre antérieure diminuerait sa pression osmotique par rapport à celle du plasma, et faciliterait le transfert d'humeur aqueuse vers la circulation générale, diminuant ainsi la pression intra-oculaire.

Cette dernière hypothèse n'a pas encore été prouvée avec certitude.

De plus, il paraît aujourd'hui admis que l'humeur aqueuse présente un mouvement ascensionnel devant l'iris (ce dernier étant à une température de 36°C de par sa riche vascularisation), et redescend devant la cornée (la cornée présente une température de 30°C car elle est en contact avec le milieu extérieur). Ce trajet est appelé flux circulatoire de convection thermique [10, 24].

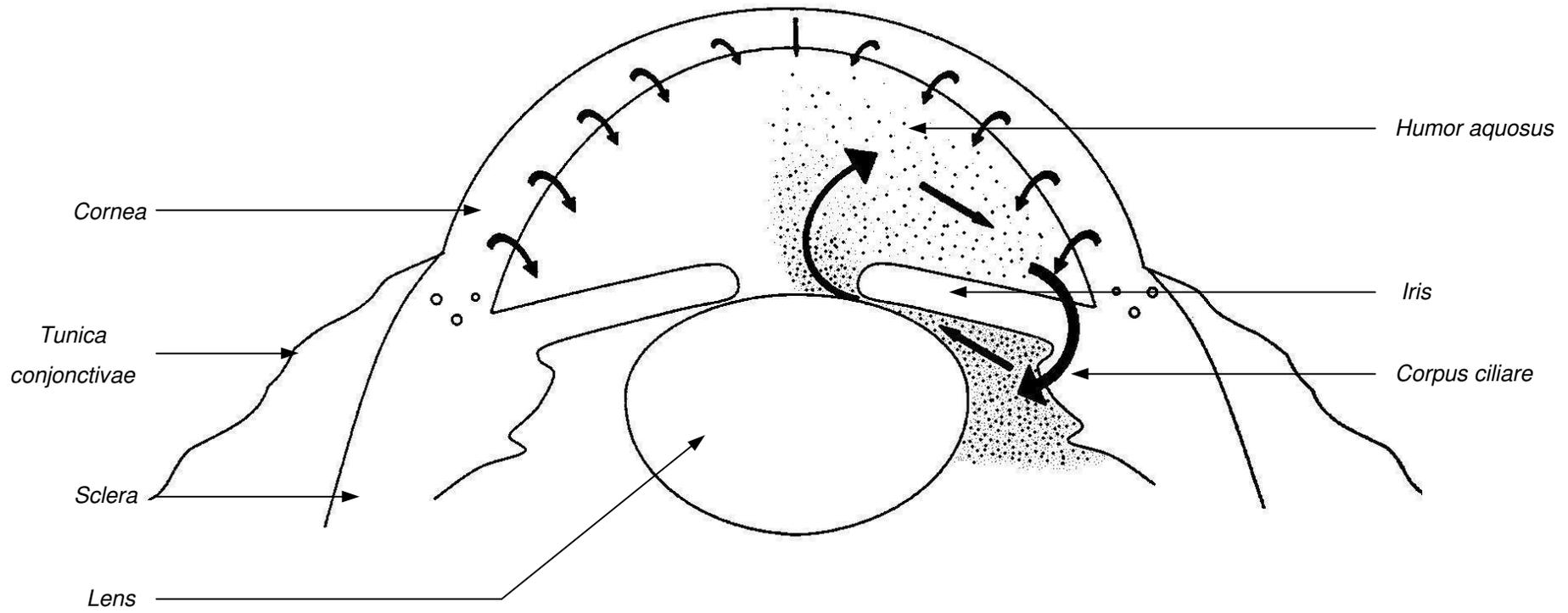
La figure 11 montre les mouvements d'eau depuis la cornée vers la chambre antérieure, le passage de l'humeur aqueuse de la chambre postérieure vers la chambre antérieure par la pupille et enfin le passage d'eau depuis la chambre antérieure vers la chambre postérieure à travers l'iris selon la théorie de MARK.

Figure 11 : Mouvements d'eau depuis la cornée vers la chambre antérieure, et entre les chambres antérieure et postérieure par la pupille et l'iris (d'après [27])

Les flèches indiquent les mouvements d'eau.

Dans la cornée, l'épaisseur des flèches est proportionnelle à la quantité d'eau transférée. Ainsi une quantité d'eau plus importante est transférée depuis la cornée vers la chambre antérieure en région périphérique.

Les points marquent la concentration de l'humeur aqueuse. Plus la densité en points noirs est importante, plus la concentration est importante. Elle est ainsi supérieure près du corps ciliaire que dans la région de l'AIC.



III.4. Voies d'élimination de l'humeur aqueuse

La dynamique de l'humeur aqueuse met en jeu un équilibre entre production et drainage. Il en résulte un tonus oculaire particulier, nécessaire au bon fonctionnement de l'organe visuel. Nous avons vu les modalités de production de l'humeur aqueuse dans le chapitre **III.2.**; le drainage, lui, se fait par deux voies. La première, appelée voie de filtration conventionnelle, siège dans l'AIC. L'autre voie est dite non conventionnelle, uvéo-sclérale ou extra-canaliculaire ; elle siège principalement au sein de l'uvée et son débit est moindre que la voie principale [42].

III.4.1. Voie de drainage conventionnelle

Elle correspond à l'écoulement de l'humeur aqueuse à travers le réseau trabéculaire vers le "canal de Schlemm" chez l'Homme et le plexus veineux de la sclère chez le Chien. Nous avons vu que la pression du système veineux collecteur (8 à 12 mm Hg) est inférieure à la pression intra-oculaire (15 à 25 mm Hg) chez l'Homme comme chez le Chien. Ce différentiel de pression doit être maintenu pour assurer l'homéostasie des structures oculaires. Le maintien du différentiel des pressions est assuré par un obstacle à l'écoulement de l'humeur aqueuse au sein de l'AIC. Cet obstacle est anatomique et osmotique [20].

III.4.1.1. Obstacle anatomique

L'humeur aqueuse doit cheminer à travers de nombreuses structures anatomiques avant de parvenir à la circulation générale. Cependant, tous les constituants de l'AIC ne possèdent pas les mêmes capacités de freinage du flux aqueux.

III.4.1.1.1. Chez le Chien

Chez le Chien, l'humeur aqueuse rencontre d'amont en aval :

- le ligament pectiné,
- le réseau trabéculaire uvéal,
- le réseau trabéculaire cornéoscléral
- le plexus veineux de la sclère.

► Résistance du ligament pectiné

Le ligament pectiné représente la portion la plus antérieure de l'AIC du Chien. Cette structure existe aussi chez l'Homme à l'état vestigial et de façon inconstante (voir II.2.4.1.). Les travaux de Morrison et Van Buskirk [38] ont montré que les fibres du ligament pectiné sont trop grêles et clairsemées pour représenter un obstacle anatomique direct à l'écoulement de l'humeur aqueuse. Cependant et selon les mêmes travaux, une incision des fibres du ligament pectiné sur une portion de la périphérie de l'AIC entraîne une augmentation du drainage de l'humeur aqueuse par un élargissement de la fente ciliaire. Il semble ainsi que le ligament pectiné ait pour rôle de maintenir les structures postérieures de l'AIC dans un espace clos. Il agit donc indirectement sur le flux d'humeur aqueuse en assurant l'intégrité du réseau trabéculaire et de sa matrice extra-cellulaire.

► Résistance du réseau trabéculaire

La résistance à l'écoulement au sein des cellules du réseau trabéculaire et de la matrice extracellulaire relève d'un mécanisme sensible à la pression. La matrice extracellulaire se révèle très complexe et est composée de différentes glycoprotéines, de glycosaminoglycanes et de protéoglycanes. Elle comble en partie les espaces compris entre les fibres du réseau trabéculaire mais ménagent toutefois de petits espaces [20].

Différents types de collagènes sont aussi présents au sein de la matrice extra-cellulaire et contribuent à son intégrité.

Le terme de glycosaminoglycane, qui a remplacé celui de mucopolysaccharide, désigne des macromolécules résultant de la polymérisation d'un diholoside de base, formé par un acide uronique et une osamine. Les différents types de glycosaminoglycanes (GAGs) sont déterminés d'une part par la nature du diholoside de base et d'autre part par la nature des liaisons au sein du diholoside et entre les unités de base. Ils sont synthétisés par l'appareil de Golgi des fibroblastes. Les différents types de GAGs synthétisés sont à la fois le résultat de la différenciation des fibroblastes (kératocytes, hyalocytes, cellules des fibres trabéculaires), et de l'expression génétique de ces cellules. Les GAGs synthétisés présents dans la cellule sous

forme de granules peuvent être expulsés hors de la cellule pour participer à la formation de la matrice extra-cellulaire [9]. Ils jouent ainsi un rôle physiologique d'importance dans la mesure où ils maintiennent l'intégrité structurale de la matrice extra-cellulaire, assurent les interactions au sein de cette matrice, le lien et la séquestration des facteurs de croissance et la modulation des échanges de fluides interstitiels. Ils se présentent sous la forme de solution hautement visqueuse et élastique (à la manière d'un gel). Ils fonctionnent comme un système de filtration biologique et sont prépondérants dans la résistance à l'écoulement de l'humeur aqueuse. Il semble que les GAGs agissent pour maintenir un lent flux liquidien, unidirectionnel et constant entre les fibres trabéculaires et le système veineux collecteur. L'humeur aqueuse chemine alors jusqu'aux plexus veineux épiscléral et sous-conjonctival pour atteindre finalement la circulation générale.

Chez le jeune Chien sain, le réseau trabéculaire contient en majorité des chondroïtines sulfates et dermatanes sulfates ainsi qu'une petite quantité d'acide hyaluronique, et ce quelle que soit la zone considérée (réseau trabéculaire et zone juxta-canaliculaire). Chez le Chien atteint de glaucome primaire à angle ouvert, les chondroïtines sulfates diminuent significativement, laissant supposer que dans les stades avancés de l'affection, le système de drainage est fortement altéré et s'atrophie [19]. La facilité d'écoulement de l'humeur aqueuse est aussi fortement diminuée en cas d'augmentation de la PIO chez un individu souffrant de glaucome [41].

► Résistance du système veineux collecteur

La portion du réseau trabéculaire directement au contact du plexus veineux de la sclère est appelée zone juxta-canaliculaire et représente vraisemblablement un des sites majeurs de résistance à l'écoulement [20].

Le passage de l'humeur aqueuse vers le système veineux collecteur s'y fait à travers des pores transcellulaires, par des vacuoles de très grande taille (voir //2.6.1.2.) ou des vésicules de pinocytose. Les mécanismes d'épuration de l'humeur aqueuse sont aussi assurés par les macrophages, des leucocytes et les cellules immatures du réseau trabéculaire, grâce à la phagocytose. Ce processus de "nettoyage" est rapidement activé par la présence de particules

volumineuses en chambre antérieure. Néanmoins, dans le cas d'hypertension oculaire, le mécanisme de phagocytose apparaît moins actif [49].

De plus, chez le Chien, la circulation épisclérale présente des anastomoses artério-veineuses qui participent également à l'élimination de l'humeur aqueuse. Chez le Chien, il n'existe pas de système capillaire épiscléral et ce déficit semble compensé par la présence de ces anastomoses. Ces shunts vasculaires fonctionneraient comme mécanisme d'urgence pour élever la PIO après une chute importante (paracentèse notamment) [20].

► Influence de la contraction du muscle ciliaire et du sphincter de l'iris

La capacité d'accommodation du Chien a été estimée à trois dioptries [45], ce qui représente un pouvoir accommodateur faible, en rapport avec le faible développement du muscle ciliaire (voir **II.2.2**). Bien que l'accommodation soit très réduite, la contraction expérimentale des fibres longitudinales du muscle ciliaire par des agents myotiques change la configuration de l'AIC. Sous l'action des agents myotiques, le sphincter irien se contracte et l'iris pousse la base du corps ciliaire en avant et vers le centre. Les fibres du ligament pectiné s'étendent alors et élargissent ainsi les espaces entre les fibres des réseaux trabéculaires uvéal et cornéo-scléral, facilitant l'écoulement de l'humeur aqueuse à travers l'AIC [14].

III.4.1.1.2. Chez l'Homme

Chez l'Homme, l'humeur aqueuse rencontre d'amont en aval :

- le réseau trabéculaire uvéal,
- le réseau trabéculaire cornéo-scléral,
- le réseau trabéculaire cribiforme,
- le "Canal de Schlemm".

► Résistance du réseau trabéculaire

De la même façon que chez le Chien, le principal facteur de résistance au sein du réseau trabéculaire est la matrice extra-cellulaire. Cette résistance est prépondérante au sein du réseau trabéculaire cribiforme.

Les protéines et glycoprotéines qui composent la matrice extra-cellulaire chez l'Homme incluent la laminine et la fibronectine. Elles lient et organisent la matrice extracellulaire et l'attachent à la surface des cellules. D'autres protéines prépondérantes dans le réseau incluent le collagène interstitiel, le collagène de type IV de la membrane basale, des collagènes de type V et VI et de l'élastine.

Les principaux types de GAGs au sein du réseau trabéculaire incluent les chondroïtine, dermatane et heparane sulfate. L'acide hyaluronique et une faible quantité de kératane sulfate ont aussi été retrouvés et il semble que les rapports relatifs de ces protéoglycanes changent avec l'âge et dans certains cas pathologiques, notamment de glaucome primitif à angle ouvert.

Le cytosquelette des cellules du réseau trabéculaire cribiforme et le réseau de micro-filaments d'actine forment une armature contractile soutenant la membrane plasmique des cellules trabéculaires. Ils participent donc aussi à la cohésion de la matrice extra-cellulaire [10].

Une étude réalisée par Haiyan GONG et RUBERTI [18] a montré que les espaces ménagés dans la matrice extra-cellulaire visibles en microscopie électronique à transmission sont en réalité plus réduits. En effet, une nouvelle technique de microscopie électronique dite quick-freeze deep-etch appliquée à l'observation de l'AIC humain a révélé que les espaces visibles en microscopie électronique à transmission sont en fait en partie comblés par la matrice extra-cellulaire.

► Résistance du système veineux collecteur

La couche endothéliale monocellulaire qui borde la paroi interne du "canal de Schlemm" est un site de résistance important. Les cellules qui la composent possèdent un cytosquelette très développé et sont reliées entre elles par des jonctions serrées. Le transfert d'humeur aqueuse vers le "canal de Schlemm" se fait par des phénomènes de vacuolisation et de pinocytose au sein de la couche épithéliale (voir //2.6.2.2.). Des calculs théoriques ont montré que le passage de l'humeur aqueuse assuré par les micro-pores dynamiques formés par les vacuoles endothéliales est prépondérant en comparaison du passage

par la voie intercellulaire, pratiquement impossible et quantitativement insignifiant.

Par ailleurs, des travaux de Rand ALLINGHAM [3] ont montré une corrélation entre les dimensions du "canal de Schlemm" et l'écoulement d'humeur aqueuse. Ainsi, les patients humains atteints de glaucome primitif à angle ouvert présentent un "canal de Schlemm" significativement plus petit que les patients humains sains. Les variations de dimensions intéressent l'aire du "canal de Schlemm" en coupe transversale, son périmètre et la longueur de son mur interne. Si l'on considère la réduction de l'aire de filtration du "canal de Schlemm", la réduction de la longueur du mur interne seule pourrait expliquer une différence de 41 à 55 % de la différence entre l'écoulement d'humeur aqueuse chez un patient sain et chez un patient souffrant de glaucome primitif à angle ouvert. L'étude ne permet cependant pas de savoir si les changements de dimensions du "canal de Schlemm" sont des évènements primaires ou secondaires dans le processus du glaucome primitif à angle ouvert.

► Influence de la contraction du muscle ciliaire.

Nous avons vu que le corps ciliaire est particulièrement développé chez l'Homme dont les capacités d'accommodation sont très importantes (voir **II.2.2.**). La contraction du muscle ciliaire (très développé lui aussi), entraîne un déplacement postérieur de l'éperon scléral et donc une expansion du réseau trabéculaire. En conséquence, les espaces inter-trabéculaires s'élargissent et l'aire de filtration du mur interne du "canal de Schlemm" s'accroît [14]. L'élargissement de la zone de drainage réduit de fait la résistance à l'écoulement [26].

III.4.1.2. Obstacle physique

Bien que souvent négligée, la "contre-pression" exercée par le secteur veineux contre le "canal de Schlemm" ou le plexus aqueux représenterait environ 50 à 75% de la résistance qui détermine la PIO [20].

III.4.2. Voie de drainage non conventionnelle ou uvéo-sclérale

Cette voie de drainage ne concerne pas directement l'AIC mais il est important de la décrire dans la mesure où elle draine un pourcentage non négligeable d'humeur aqueuse.

La voie de drainage uvéo-sclérale correspond à la diffusion de l'humeur aqueuse à travers l'iris, le corps ciliaire et le corps vitré. L'humeur aqueuse chemine par des mécanismes de transport cellulaire dans les espaces intermusculaires du muscle ciliaire et pénètre dans l'espace supra-choroïdien. Elle rejoint la circulation générale après collecte par les circulations choroïdiennes et sclérales. Cette voie n'est pas liée à des variations de la pression intra-oculaire. Elle dépend cependant de la différence de pression hydrostatique entre la chambre antérieure et l'espace supra-choroïdien.

L'existence de la voie de drainage non conventionnelle a été prouvée par des analyses de diffusion de substances marquées (encre de Chine, fluorescéine, particules de dextran, radio-isotope), ou inertes (micro-sphères...) [8, 17, 50]. Ces études ont permis de déterminer le trajet de l'humeur aqueuse au sein de l'uvée. Elles ont en outre permis d'attester la diminution voire la disparition de la voie de drainage non conventionnelle chez les Chiens atteints de glaucome [8].

A pression intra-oculaire normale, la voie non conventionnelle est perméable pour des particules de 3 μm de diamètre dans la portion antérieure du muscle ciliaire. Cependant, la région postérieure de l'espace supra-ciliaire et de l'espace supra-choroïdien ne laisse passer que des particules d'un diamètre inférieur à 1 μm .

La voie de drainage non conventionnelle représente 4 à 14% du drainage total d'humeur aqueuse chez l'Homme et 3 à 15% chez le Chien [7]. L'importance de la voie de drainage non conventionnelle chez les autres espèces est variables. Ainsi chez le Chat, elle ne représente que 3% du drainage total, tandis que chez le Cheval, ce pourcentage serait de 25% [26]. Le rôle important joué par la voie de drainage secondaire chez le cheval expliquerait la faible incidence du glaucome dans cette espèce.

En permettant à l'humeur aqueuse d'échapper à la voie conventionnelle soumise à la résistance à l'écoulement du réseau trabéculaire, la voie non conventionnelle entraîne ainsi une sous-estimation de la valeur du débit d'humeur aqueuse.

Rappelons enfin qu'il existe un autre type d'architecture pour l'angle irido-cornéen, représenté par les herbivores. Chez ces derniers, le réseau trabéculaire est très large, très profond et ouvert sur une voie de drainage uvéo-sclérale efficace. Ceci explique la relative rareté du glaucome chez ces animaux. Notons aussi l'existence d'un ligament pectiné robuste, le faible développement du muscle ciliaire et l'absence de "canal de Schlemm" chez les herbivores.

La photographie suivante montre la région de l'angle irido-cornéen chez le Cheval.



Photographie 7 : Angle irido-cornéen du Cheval

- | | |
|--------------------------|---------------------------------|
| 1- <i>Cornea</i> | 5- <i>Corpus ciliaris</i> |
| 2- <i>Limbus corneae</i> | 6- <i>Lig pectinatum anguli</i> |
| 3- <i>Sclera</i> | 7- Réseau trabéculaire |
| 4- <i>Iris</i> | |

Coloration standard Hémalum Eosine x1

Photographie I. RAYMOND

CONCLUSION

L'angle irido-cornéen est une zone anatomique d'importance car il représente le carrefour à la fois entre les tuniques fibreuse et vasculaire de l'œil, mais aussi entre ses chambres et le système veineux collecteur.

Si cette singularité est commune à l'Homme et au Chien, l'angle irido-cornéen présente néanmoins de nombreuses différences entre ces deux espèces.

Nous avons vu que ces différences sont surtout anatomiques. Elles doivent aussi être mises en relation avec les structures voisines, dont l'organisation diverge entre l'Homme et le Chien.

Ainsi l'Homme dont le pouvoir d'accommodation est extrême, possède un muscle ciliaire très développé qui pousse l'angle irido-cornéen vers l'avant. Le Chien, dont les capacités d'accommodation sont moindres, possède un angle irido-cornéen très profond, qui s'étend postérieurement, à l'intérieure de la racine de l'iris.

De même, les modalités de transition entre la cornée et la sclère par le limbe scléro-cornéen sont très différentes chez le Chien et l'Homme avec une organisation plus complexe chez ce dernier.

Par ailleurs, la constitution même de l'AIC répond à une organisation différente chez les deux espèces. L'Homme voit son AIC formé de réseaux trabéculaires différents dont la succession antéro-postérieure est la suivante : réseau trabéculaire uvéal, réseau trabéculaire cornéo-scléral, réseau trabéculaire cribriforme. Chez le Chien, le ligament pectiné, inexistant chez l'Homme, représente l'élément le plus antérieur. Il laisse place postérieurement au réseau trabéculaire uvéal puis cornéo-scléral. Le réseau trabéculaire s'étend très postérieurement contrairement au cas de l'Homme, chez qui l'extension postérieure du réseau trabéculaire est moindre, et arrêtée brusquement par la limite antérieure du muscle ciliaire.

Le système veineux collecteur est sans nul doute la région la plus distincte entre l'Homme et le Chien, et plus largement entre les Primates et les autres mammifères. En effet chez le Chien, le système veineux, appelé plexus veineux de la sclère, est constitué d'une succession antéro-postérieure de vaisseaux situés parallèlement au limbe, dans la région la plus profonde de la sclère. Chez l'Homme, ces vaisseaux semblent avoir fusionné durant la phylogenèse, pour former une structure unique, le

"canal de Schlemm". Cette hypothèse semble d'autant plus vraisemblable que le "canal de Schlemm" possède deux, voire trois lumières en certains endroits. La présence de ces deux lumières pourrait être assimilée à une fusion incomplète des vaisseaux épiscléaux originels. Le "canal de Schlemm" représenterait ainsi le système de drainage le plus évolué.

Les variations anatomiques de l'AIC, dont les stigmates macroscopiques sont minimales, pourraient néanmoins expliquer en partie la difficulté d'adaptation au Chien de certaines techniques chirurgicales anti-glaucomeuses utilisées chez l'Homme. Par exemple, la chirurgie de sclérectomie profonde, utilisée couramment chez l'Homme, prend pour repère l'éperon scléral, structure inexistante chez le Chien (voir figure 7).

Si des différences d'organisation et de structure existent entre l'AIC de l'Homme et du Chien, sa physiologie semble néanmoins très comparable. Ainsi, l'AIC a pour rôle de drainer l'humeur aqueuse et d'établir un différentiel de pressions entre le segment antérieur et le réseau veineux périphérique. Pour ce faire, l'AIC dispose de moyens anatomiques à plusieurs niveaux et plusieurs échelles (voir **III.4.1**), et de moyens osmotiques. Ces mécanismes sont très comparables chez l'Homme et le Chien, et les différences qui les opposent sont mineures.

De la même façon, les mécanismes qui régissent la synthèse et la dynamique de l'humeur aqueuse, en amont de l'AIC, sont presque identiques chez l'Homme et le Chien.

L'angle irido-cornéen du Chien et celui de l'Homme montrent ainsi une organisation parfois divergente, mais dans un but commun. Il est intéressant de constater que malgré les différences anatomiques décrites dans ce développement, la physiologie de l'humeur aqueuse et de l'AIC sont communes aux deux espèces. Restent à étudier avec précision les possibilités qui s'offrent au praticien pour lutter efficacement contre les modifications pathologiques de l'AIC chez le Chien, dont la traduction majeure est le glaucome.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. ABDEL-LATIF, A.A.. Iris-Ciliary Body, Aqueous Humor and Trabecular Meshwork.
In : Biochemistry of the Eye, Harding, J.J. (ed.).
London; Chapman & Hall Medical, 1997, 52-93
2. AGUIRRE, G.D., RUBIN, L.F., BISTNER, S.I.
Development of the Canine Eye.
Am. J. Vet. Res., 1972, **33**: 2399-2414.
3. ALLINGHAM, R.R., DE KATER, A.W., ETHIER, C.R.
Schlemm's Canal and Primary Open Angle Glaucoma: Correlation Between
Schlemm's Canal Dimensions and Outflow Facility.
Exp. Eye. Res., 1996, **62**: 101-109.
4. BACIN, F., KANTELIP, B., MENERATH, J.M.
Barrières hémato-oculaires – Physiologie.
Encycl. Méd. Chir. (Paris, France), Ophthalmologie, 21020 D²⁰, 3-1988, 6p.
5. BARISHAK, Y.R.
The Development of the Angle of the Anterior Chamber in Vertebrate Eyes.
Doc. Ophthalmol., 1978, **45**: 329-360.
6. BARISHAK, Y.R.
Editorial: Development of the Angle of the Anterior Chamber in Human and
Vertebrate animal's Eyes.
Vet. Ophthalmol., 2003, **6**: 1-2.
7. BARRIE, K.P., GUM, G.G., SAMUELSON, D.A., GELATT, K.N.
Quantification of Uveoscleral Outflow in Normotensive and Glaucomatous Beagles by
H-labeled Dextran.
Am. J. Vet. Res., 1983, **46**: 84-88.

8. BARRIE, K.P., GUM, G.G., SAMUELSON, D.A., GELATT, K.N.
Morphologic Studies of Uveoscleral Outflow in Normotensive and Glaucomatous Beagles with Fluorescein-labeled Dextran.
Am. J. Vet. Res., 1983, **46**: 89-97.
9. BECHETOILLE, A.. La Résistance à l'Écoulement de l'Humeur Aqueuse.
In : Traitement Actuel du Glaucome Primitif à Angle Ouvert, DEMAILLY, P. (ed.).
Paris ; Masson, 1989, pp 11-47.
10. BECHETOILLE, A.. La Pression Intra-Oculaire.
In : Glaucomes, BECHETOILLE, A. (ed.).
Paris ; Japperenard, 1987, pp 133-249.
11. BEDFORD, P.G.C.
Aqueous Drainage in the Dog.
Res. Vet. Sci., 1986, **41**: 172-186.
12. CALKINS, L.L.
The Aqueous Filtration Angle. A Phylogenetic and Ontogenetic Comparative Histo-anatomic Study Of Mammalian Eyes.
Tr. Am. Ophth. Soc., 1960, **58**: 364-391.
13. CAPRIOLI, J.. The Ciliary Epithelia and Aqueous Humor.
In: Adler's Physiology of the Eye, ninth edition, HART, W.M. (ed.).
Saint-Louis; Mosby Year Book, 1992, pp 228-247.
14. CARRERAS, F.J., PORCEL, D., GONZALEZ-CABALLERO, F.
Expanding Forces in Aqueous Outflow Pathways of a Nonaccomodating Mammal: An Approach via Comparative Dynamic Morphology.
Comp. Biochem. Physiol., 1997, **117A**: 197-209.
15. COOK, C.S.. Ocular Embryology and Congenital Malformations.
In : Veterinary Ophthalmology, 3^o edition, GELATT, K.N. (ed.).
Philadelphia; Lippinkott Williams & Wilkins, 1999, pp 3-30.

16. ECOFFET, M., DEMAILLY, P., KOPEL, J.
Physiologie de l'humeur aqueuse et de la tension oculaire.
Encycl. Méd. Chir. (Paris, France), Ophtalmologie, 21020 D¹⁰, 11. 1985, 12p.
17. GELATT, K.N., GUM, G.G., WILLIAMS, L.W., BARRIE, K.P.
Uveoscleral Flow of Aqueous Humor in the Normal Dog.
Am. J. Vet. Res., 1979, **40**: 845-848.
18. GONG, H., RUBERTI, J., OVERBY, D., JONHSON, M., FREDDO, T.F.
A New View of the Human Trabecular Meshwork Using Quick-freeze, Deep-etch Electron Microscopy.
Exp. Eye. Res., 2002, **75**: 347-358.
19. GUM, G.G., GELATT, K.N., KNEPPER, P.A.
Histochemical Localization of Glycosaminoglycans in the Aqueous Outflow Pathways in Normal Beagles and Beagles With Inherited Glaucoma.
Prog. Vet. & Comp. Ophthalmol., 1993, **3**: 52-57.
20. GUM, G.G., GELATT, K.N., OFRI, R.. Physiology of the Eye.
In : Veterinary Ophthalmology, 3^o edition, GELATT, K.N. (ed.).
Philadelphia; Lippinkott Williams & Wilkins, 1999, pp 151-181.
21. HART, W.M.. Intraocular Pressure
In: Adler's Physiology of the Eye, ninth edition, HART, W.M. (ed.).
Saint-Louis; Mosby Year Book, 1992, pp 248-267.
22. HOCKWIN, O., ECKERSKORN, U., OHRLOFF, C.
Physiologie du cristallin.
Encycl. Méd. Chir. (Paris, France), Ophtalmologie, 21024 B¹⁰, 4-1986, 12p.
23. HULLO, A.
Anatomie de la Sclérotique.
Encycl. Méd. Chir. (Paris-France), Ophtalmologie, 21003 A³⁰, 10-1988, 10p.

24. LEFEBVRE, H.P.

Physiologie de l'Humeur Aqueuse et Régulation de la Pression Intra-oculaire.

Document pédagogique pour le C.E.S. d'Ophthalmologie Vétérinaire 2004-2005, 29p.

Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse, France.

25. LESCURE, F.

Particularités de la Pathologie du Segment Antérieur chez le Chien, le Chat, et le Cheval.

Encycl. Méd. Chir. (Paris-France), *Ophthalmologie*, 21008 C²⁰, 4-1986, 5p.

26. LUTJEN-DRECOLL, E.

Functional Morphology of the Trabecular Meshwork in Primate Eyes.

Prog. Ret. Eye Res, 1998, **18**: 91-119.

27. MARK, H.H.

Aqueous Humor Dynamics and the Iris.

Med. Hypothesis, 2003, **60**: 305-308.

28. MARTIN, C.L.

Development of Pectinate Ligament Structure of the Dog: Study by Scanning Electron Microscopy.

Am. J. Vet. Res., 1974, **35**: 1433-1439.

29. MARTIN, C.L.

The Normal Canine Iridocorneal Angle As Viewed with the Scanning Electron Microscope.

J. Am. An. Hosp. Assoc., 1975, **11**: 180-184.

30. MARTIN, C.L.. Cornea and Sclera.

In : *Ophthalmic Disease in Veterinary Medicine*, MARTIN, C.L. (ed.).

Londres; Manson Publishing, 2005, pp 241-297.

31. MARTIN, C.L.. Anterior Uvea and Anterior Chamber.

In : *Ophthalmic Disease in Veterinary Medicine*, MARTIN, C.L. (ed.).

Londres; Manson Publishing, 2005, pp 298-336.

32. MARTIN, C.L.. Glaucoma.

In : Ophthalmic Disease in Veterinary Medicine, MARTIN, C.L. (ed.).

Londres; Manson Publishing, 2005, pp 337-368.

33. MAURIN, J.F., RENARD, J.P.

Anatomie de la conjonctive

Encycl. Méd. Chir. (Paris-France), *Ophthalmologie*, 21004 A³⁰, 9-1989, 4p.

34. MENERATH, J.M.. Corps Ciliaire.

In : Biophtalmologie, SOLE, P., DALENS, H., GENTOU, C. (ed.).

Paris ; Masson, 1992, Livre IV, pp 3-14.

35. MENERATH, J.M.. Eléments de Régulation.

In : Biophtalmologie, SOLE, P., DALENS, H., GENTOU, C. (ed.).

Paris ; Masson, 1992, Livre IV, pp 43-51.

36. MONNEREAU, L.

L'Organe Visuel des Mammifères Domestiques.

Document pédagogique du cours d'Esthésiologie. 2° cycle, 2° année, 2002, 83p.

Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse, France.

37. MONTARD M. et VERDEAUX S.

Anatomie du vitré. Structure et ultrastructure : données récentes.

Encycl. Méd. Chir. (Paris, France), *Ophthalmologie*, 21003 E¹⁰, 3-1987, 6p.

38. MORRISON, J.C., VAN BUSKIRK, E.M.

The Canine Eye: Pectinate Ligaments and Aqueous Outflow Resistance.

Invest. Ophthalmol. Vis. Sci., 1982, **23** : 726-732.

39. MOUILLON, M., ROMANET, J.P.

Anatomie de l'uvée.

Encycl. Méd. Chir. (Paris, France), *Ophthalmologie*, 21003 C¹⁰, 4.12.03, 16p.

40. MOUILLON, M., ROMANET, J.P.

Anatomie de l'Angle Irido-cornéen.

Encycl. Méd. Chir. (Paris, France), *Ophthalmologie*, 21003 A⁵⁰, 4.11.04, 8p.

41. PEIFFER, R.L., GUM, G.G., GRIMSON, R.C., GELATT, K.N.

Aqueous Humor Outflow in Beagles with Inherited Glaucoma: Constant Pressure Perfusion.

Am. J. Vet. Res., 1980, **41**: 1808-1813.

42. PLANE, C.. Voies d'Excrétion de l'Humeur Aqueuse.

In : *Biophthalmologie*, SOLE, P., DALENS, H., GENTOU, C. (ed.).

Paris ; Masson, 1992, Livre IV, pp 23-41.

43. REGNIER, A.. Clinical Ophthalmic Pharmacology and Therapeutics - Part 2 - Antimicrobial, Anti-inflammatory Agents, and Antiglaucoma Drugs.

In : *Veterinary Ophthalmology*, 3^o edition, GELATT, K.N. (ed.).

Philadelphia; Lippinkott Williams & Wilkins, 1999, pp 297-336.

44. RIGAL-VERNEIL, D., PAUL-BUCLON, C., SAMPOUX, P.

Physiologie de la cornée.

Encycl. Méd. Chir. (Paris, France), *Ophthalmologie*, 21020 C¹⁰, 6.1990, 9p.

45. SAMUELSON, D.A.

A Reevaluation of the Comparative Anatomy of the Eutherian Iridocorneal Angle and Associated Ciliary Body Musculature.

Vet. Comp. Ophthalmol., 1996, **6**: 153-172.

46. SAMUELSON, D.A.. Ophthalmic Anatomy.

In : *Veterinary Ophthalmology*, 3^o edition, GELATT, K.N. (ed.).

Philadelphia; Lippinkott Williams & Wilkins, 1999, pp 31-150.

47. SAMUELSON, D.A., GELATT, K.N.

Aqueous Outflow in Beagle. I. Postnatal Morphologic Development of the Iridocorneal Angle: Pectinate Ligament and Uveal Trabecular Meshwork.

Curr. Eye Res., 1984, **3**: 783-794.

48. SAMUELSON, D.A., GELATT, K.N.

Aqueous Outflow in Beagle. II. Postnatal Morphologic Development of the Iridocorneal Angle: Corneoscleral Trabecular Meshwork and Angular Aqueous Plexus.

Curr. Eye Res., 1984, **3**: 795-807.

49. SAMUELSON, D.A., GELATT, K.N., GUM, G.G.

Kinetics of Phagocytosis in the Normal Canine Iridocorneal Angle.

Am. J. Vet. Res., 1984, **45**: 2359-2366.

50. SAMUELSON, D.A., GUM, G.G., GELATT, K.N., BARRIE, K.P.

Aqueous Outflow in the Beagle: Unconventional Outflow, Using Different-sized Microspheres.

Am. J. Vet. Res., 1984, **46**: 242-248.

51. SARAUX, H.. Région de l'Angle Irido-cornéen.

In : Anatomie et Histologie de l'œil. 2^o édition, SARAUX, H., LEMASSON, C., OFFRET, H., RENARD, G. (ed.).

Paris ; Masson, 1982, pp 155-168.

52. SAUTET, J.Y., LIGNEREUX, Y.

L'Angle Irido-Cornéen.

Document pédagogique pour le C.E.S. d'Ophthalmologie Vétérinaire 2004-2005, 24p.

Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse, France.

53. SAUTET, J.Y., LIGNEREUX, Y.

Tunique Vasculaire de l'Oeil.

Document pédagogique pour le C.E.S. d'Ophthalmologie Vétérinaire 2004-2005, 47p.

Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse, France.

54. SAUTET, J.Y., LIGNEREUX, Y.

Vascularisation de l' Œil et des Annexes.

Document pédagogique pour le C.E.S. d'Ophthalmologie Vétérinaire 2004-2005, 16p.

Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse, France.

55. SIMOENS, P., DE GEEST, J.P., LAUWERS, H.

Comparative Morphology of the Pectinate Ligaments of Domestic Mammals, as Observed under the Dissecting Microscope and the Scanning Electron Microscope.

J. Vet. Med. Sci., 1996, **58**: 977-982.

Toulouse, 2006

NOM : DULAURENT

PRENOM : Thomas

TITRE : ANATOMIE FONCTIONNELLE COMPAREE DE L'ANGLE IRIDO-CORNEEN DU CHIEN ET DE L'HOMME

RESUME :

L'angle irido-cornéen est la structure oculaire responsable du drainage de l'humeur aqueuse. Situé à la jonction entre la cornée, la sclère et la périphérie de l'iris, l'angle irido-cornéen présente une architecture variable selon les espèces. Chez le Chien, il est inclus dans la fente ciliaire et constitué du ligament pectiné et des réseaux trabéculaires uvéal et cornéo-scléral. Le drainage se poursuit par les plexus aqueux et veineux de la sclère. Chez l'Homme, l'angle irido-cornéen est en dehors de la racine de l'iris et constitué des réseaux trabéculaires uvéal, cornéo-scléral et cribriforme. Vient ensuite le canal de Schlemm, structure propre aux primates et inexistante chez le Chien. La fonction de l'angle irido-cornéen est néanmoins identique chez les deux espèces et consiste à drainer l'humeur aqueuse produite par les procès ciliaires et à établir un différentiel de pressions entre le segment antérieur et le réseau veineux périphérique.

MOTS-CLES : Angle irido-cornéen, Œil, Anatomie, Chien, Homme.

TITLE : COMPARED FUNCTIONAL ANATOMY OF THE CANINE AND HUMAN IRIDO-CORNEAL ANGLE

ABSTRACT:

The irido-corneal angle is an ocular structure responsible for the drainage of the aqueous humor. Located between the cornea, the sclera and the iris at the periphery of the eye, the irido-corneal angle shows an inconstant architecture among species. In the dog, it is deep and made of the pectinate ligament and uveal and corneo-scleral trabecular meshworks. The aqueous humour flows through the aqueous and veinous scleral plexuses. In humans, the irido-corneal angle is outside the iris root and consists of the uveal, corneo-scleral and cribriform trabecular meshworks. These meshworks drain into the Schlemm's canal, a structure specific to primates. The function of the irido-corneal angle is the same for both species and consists in eliminating the aqueous humour from the anterior chamber, to implement a pressure differential between the anterior segment and the peripheral veinous meshwork.

KEY-WORDS: Irido-corneal angle, Eye, Anatomy, Dog, Human.