

L'œil humain et son exploration ultrasonore dans la pratique ophtalmologique

Sommaire

1.1	L'œil humain	32
1.1.1	Anatomie de l'orbite et son contenu	32
1.1.1.1	L'orbite	32
1.1.1.2	Les annexes du bulbe	34
1.1.2	Anatomie et physiologie du globe oculaire	36
1.1.2.1	Les trois tuniques du globe oculaire	36
1.1.2.2	Les milieux transparents de la cavité oculaire	39
1.1.3	De l'œil à la vision	40
1.1.3.1	Un système optique adaptatif	41
1.1.3.2	Les différentes formes d'amétropie	42
1.1.4	Pathologies oculaires	43
1.1.4.1	Pathologies du segment antérieur	43
1.1.4.2	Pathologies du segment postérieur	45
1.1.4.3	Atteintes du nerf optique	49
1.1.4.4	Tumeurs intra-oculaires	51
1.1.4.5	Maladies inflammatoires oculaires	52
1.2	L'Échographie oculaire : Pratique clinique et devenir	53
1.2.1	Aspect échographique des tissus oculaires normaux	54
1.2.2	Instrumentation et techniques d'examen	55
1.2.2.1	Indications pour l'examen	55
1.2.2.2	Différentes sondes pour différents examens et différents modes	55
1.2.2.3	Le positionnement de la sonde en mode-B dans l'examen du segment postérieur	56
1.2.3	Le mode-A	60
1.2.3.1	Le mode-A biométrique	60
1.2.3.2	Le mode-A diagnostique	61
1.2.4	Imagerie du segment postérieur et de l'orbite	62
1.2.4.1	Le segment postérieur	62
1.2.4.2	L'orbite	62
1.2.5	Imagerie du segment antérieur	63

1.2.5.1	Technique d'immersion	63
1.2.5.2	La biomicroscopie ultrasonore - UBM	63
1.2.6	Les ultrasons face aux autres modalités dans la pratique ophtalmologique	63
1.2.6.1	Dans la biométrie oculaire	63
1.2.6.2	Dans le diagnostique	65
1.2.6.3	Axes de développement	66

Dans ce chapitre introductif, l'objet motivant ce travail de thèse, l'œil humain, est présenté de son anatomie à son fonctionnement en passant par les principales pathologies pouvant l'affecter.

Les techniques et spécificités propres à l'échographie oculaire sont ensuite détaillées, et mises en perspective avec les modalités d'exploration concurrentes, afin de mieux cerner la place que tient cette discipline dans la pratique ophtalmologique.

1.1 L'œil humain

Une sphère d'un diamètre d'environ 2,5 cm, d'un poids avoisinant 8 grammes, enchâssée dans l'orbite, protégée par les paupières, lubrifiée par des sécrétions lacrymales et animée par trois paires de muscles : voilà l'œil humain, organe unique avec lequel l'homme perçoit son environnement, ses couleurs, ses formes, et ses mouvements. Voici donc la vision, l'un des cinq sens « traditionnels », et peut-être celui le plus étudié depuis l'antiquité, car probablement le plus sensible. En effet, 70% des récepteurs sensoriels de l'organisme sont localisés dans les yeux. Plus exactement, 260 millions de photorécepteurs (cônes et bâtonnets des deux yeux confondus) concentrés sur la rétine. En venant les frapper, les photons entraînent, via une cascade de réactions enzymatiques, la formation de signaux nerveux [Oyster, 1999]. Ceux-ci sont alors orientés vers quelques deux millions de cellules ganglionnaires, situées sur la couche interne de la rétine. Ainsi élaboré, le signal visuel quitte l'œil par le nerf optique ; soit un million de fibres nerveuses qui l'acheminent vers les structures sous-corticales dévolues à la vision, à l'arrière du cerveau ($\sim 15\%$ du cortex cérébral chez l'homme).

1.1.1 Anatomie de l'orbite et son contenu

Le globe oculaire, également dénommé bulbe oculaire, n'est pas le seul élément occupant la cavité orbitale. En effet, comme l'illustre la figure 1.1, le bulbe partage cet espace avec ses annexes (muscles oculomoteurs, paupières, glandes lacrymales et conjonctive), la graisse orbitaire qui le protège et le supporte, et enfin les nerfs et vaisseaux assurant le fonctionnement de l'ensemble. Avant d'aborder la physiologie et l'anatomie du globe oculaire, nous allons d'abord nous intéresser à la cavité dans laquelle il se meut ainsi qu'aux structures rétro et péri bulbaires qui l'entourent.

1.1.1.1 L'orbite

A l'instar des autres mammifères, le crâne humain comporte, dans la partie supérieure de son massif facial, deux renforcements définissant chacun une cavité osseuse : l'orbite (Fig. 1.2).

1.1. L'ŒIL HUMAIN

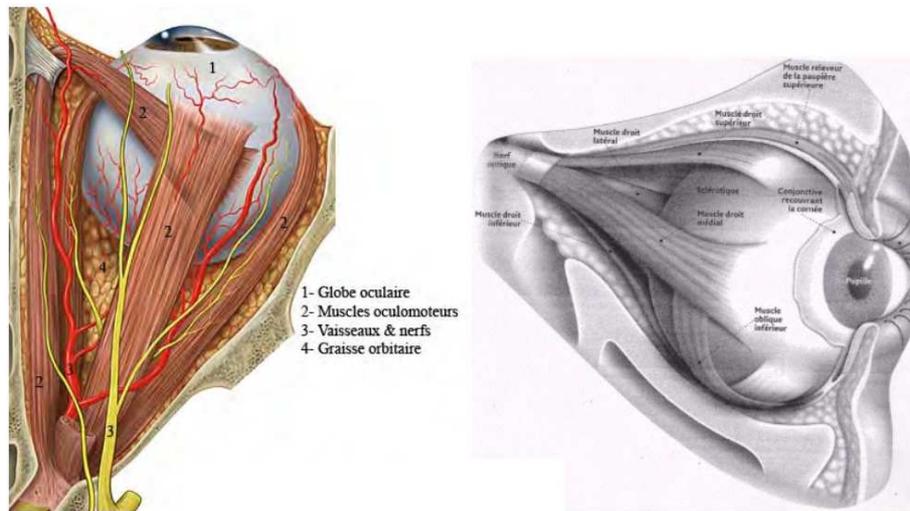


FIGURE 1.1 – Contenu de la cavité orbitale. *Sobotta, "Atlas d'anatomie humaine", tome 1, 4 ème édition, Paris*

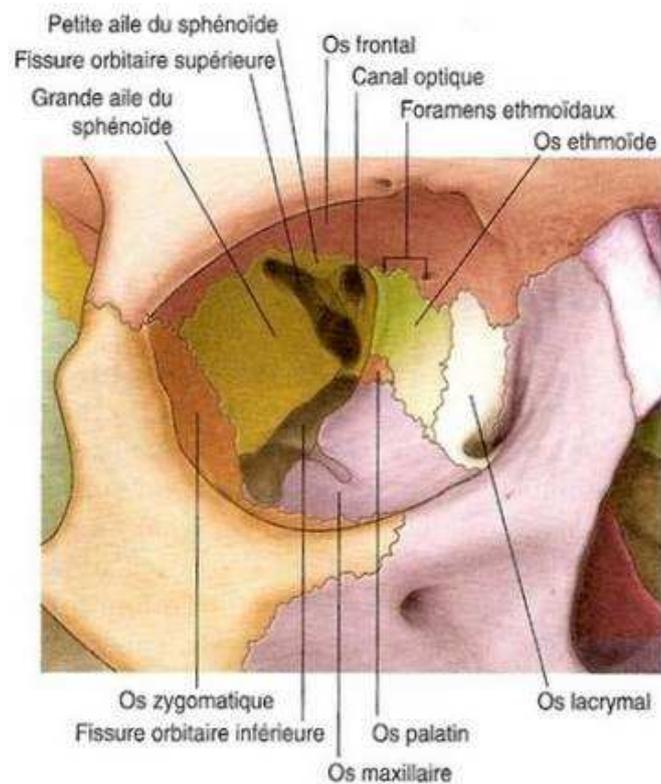


FIGURE 1.2 – Orbite osseuse droit d'un crâne humain. *Netter, "Atlas of human anatomy", 2010*

Les deux cavités orbitaires, séparées par la cavité nasale, contiennent et protègent le globe oculaire et ses annexes. Chaque orbite est constituée par un ensemble d'os juxtaposés formant une cavité tapissée d'une membrane fibreuse : le périoste orbitaire [Oyster, 1999].

L'orbite possède de nombreux orifices la faisant communiquer avec les régions voisines. La forme de la cavité orbitale s'apparente à celle d'une pyramide quadrangulaire dont la base constitue l'ouverture où s'enclasse l'œil (côté antérieur). Au sommet (côté postérieur) se trouve la fisure orbitaire supérieure (fente sphénoïdale) par laquelle s'échappent les nerfs des muscles oculomoteurs et la veine ophtalmique. Au voisinage de l'apex orbitaire (situé à l'extrémité médiale de la fente sphénoïdale) se trouve le trou optique, orifice permettant au nerf optique et à l'artère ophtalmique de rejoindre l'étage antérieur de la base du crâne.

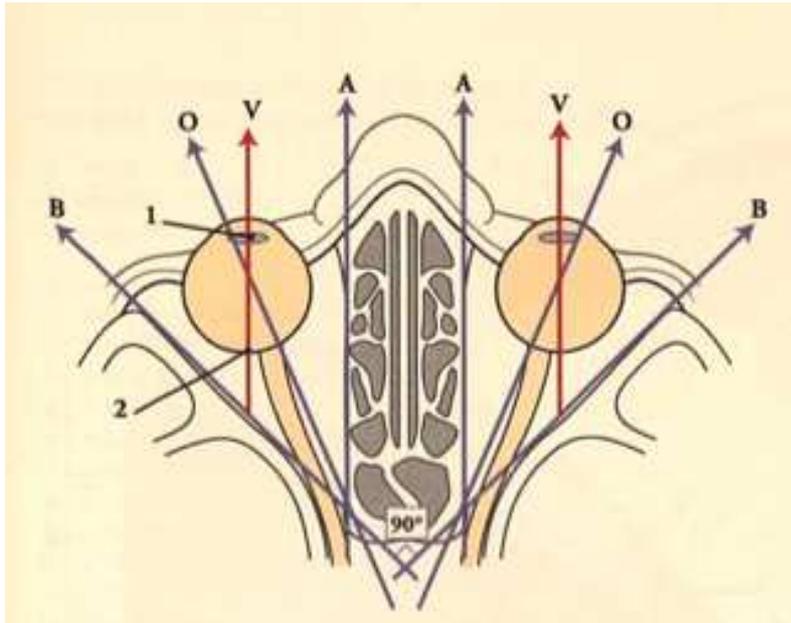


FIGURE 1.3 – Axe de l'orbite et du globe oculaire. En 1 et 2 figurent respectivement le cristallin et la zone centrale de la rétine, la fovéa. Les flèches A et B définissent respectivement les parois médiales et latérales de l'orbite. Les flèches O et V représentent respectivement l'axe de l'orbite (bissectrice de A et B) et l'axe visuel. [Oyster, 1999]

D'un volume d'environ 26 cm^3 chez la femme et $28,5 \text{ cm}^3$ chez l'homme, la cavité orbitaire est profonde de 45 mm en moyenne. Son grand axe - défini comme la bissectrice des parois médiale et latérale - forme un angle de 23° avec l'axe visuel comme illustré sur la figure 1.3.

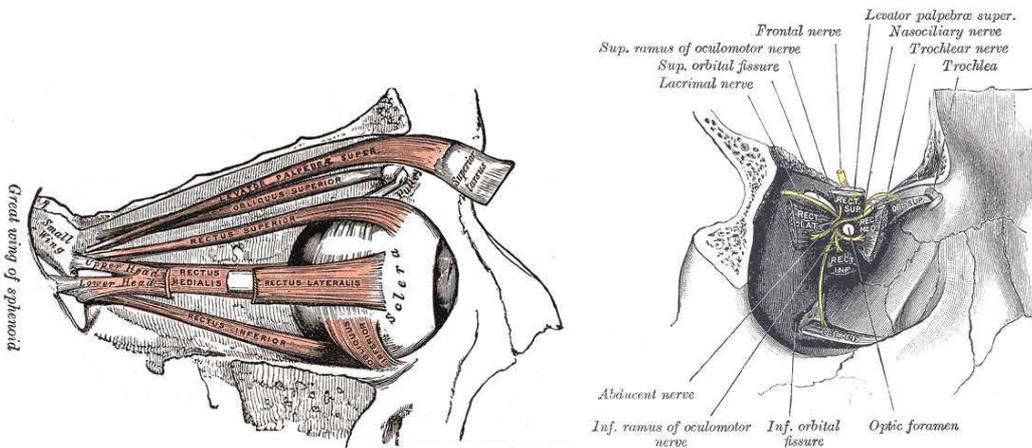
1.1.1.2 Les annexes du bulbe

Les paupières Elles recouvrent et protègent la partie antérieure du globe. Elles sont constituées de lames cutané-musculo-membraneuses mobiles, revêtues sur leur partie externe par l'épiderme, et sur leur partie interne par la conjonctive. Au niveau de leur bord libre, sont implantés les cils et débouchent les conduits excréteurs reliés aux glandes de Meibomius qui assurent la production de sébum lubrifiant le globe. Les paupières sont mues par le muscle orbiculaire. Plus mobile que la paupière inférieure, la paupière supérieure recouvre totalement la cornée lorsqu'elle se clôt.

1.1. L'ŒIL HUMAIN

Les muscles oculomoteurs La motilité du globe oculaire est assurée par six muscles oculomoteurs parmi lesquels quatre sont droits et deux sont obliques. Ces muscles sont tous constitués de fibres striées à contractions volontaires.

Les muscles droits comprennent le muscle médial (côté nasal), le muscle inférieur, le muscle latéral et le muscle supérieur. Ils délimitent un espace conique : le cône fasciomusculaire. La base de ce cône s'insère sur le globe oculaire au niveau de la sclère ("blanc" de l'œil) comme on peut l'apprécier sur la figure 1.4, et son sommet se situe au niveau de l'apex orbitaire, autour de l'émergence du nerf optique, où les quatre muscles droits se réunissent alors, en un anneau tendineux commun, le tendon de Zinn. La partie postérieure des muscles droits occupe donc la zone rétro-bulbaire en compagnie du nerf optique, de la graisse orbitaire, et des nerfs et vaisseaux sanguins ophtalmiques.



(a) Insertions des muscles oculomoteurs et palpébral de l'orbite droit

(b) Origines des muscles oculomoteurs droits et obliques accompagnée des nerfs ophtalmiques adjacents au niveau de la fissure orbitale supérieure (sphénoïde)

FIGURE 1.4 – Insertions des muscles oculaires de l'orbite droit "*Journal of Anatomy and Physiology*" [Lockwood, 2008]

Les muscles obliques ont la particularité de croiser obliquement l'axe antéro-postérieur du globe oculaire. Le muscle oblique supérieur est le plus long de tous les muscles de l'orbite et s'insère du côté postérieur au niveau du trou optique. Le muscle oblique inférieur, quant à lui le plus court, est le seul qui n'est pas fixé au fond de l'orbite.

Précisons que les mouvements rotatifs du globe oculaire sont permis par l'articulation en rotule qui existe entre la sclère et la capsule de Ténon, gaine de l'orbite qui assure la suspension de celui-ci au sein de la cavité orbitale. Cette capsule faite d'une membrane fibro-élastique entoure l'hémisphère postérieur de l'œil et est séparée de la sclère par un tissu cellulaire très lâche, l'espace de Ténon. La capsule de Ténon fusionne à son extrémité antérieure avec la conjonctive bulbaire (limbe sclérocornéen) et se mêle au nerf optique et aux muscles oculomoteurs dans sa partie rétro et péri bulbaire [Oyster, 1999].

1.1.2 Anatomie et physiologie du globe oculaire

Comme chez la plupart des mammifères, oiseaux, reptiles et poissons, l'œil humain est constitué d'un globe oculaire comportant une calotte transparente sur sa partie antérieure, la cornée, et un tissu rigide de forme sphérique sur le reste de sa surface, la sclère ou sclérotique que l'on appelle communément "le blanc de l'œil". Plus précisément, la paroi du globe oculaire est formée de 3 enveloppes, ou tuniques, enveloppant les milieux transparents chargés d'acheminer les rayons lumineux sur la rétine. Ses principales composantes sont illustrées sur la schéma de la figure 1.5 représentant une coupe sagittale d'un œil adulte.

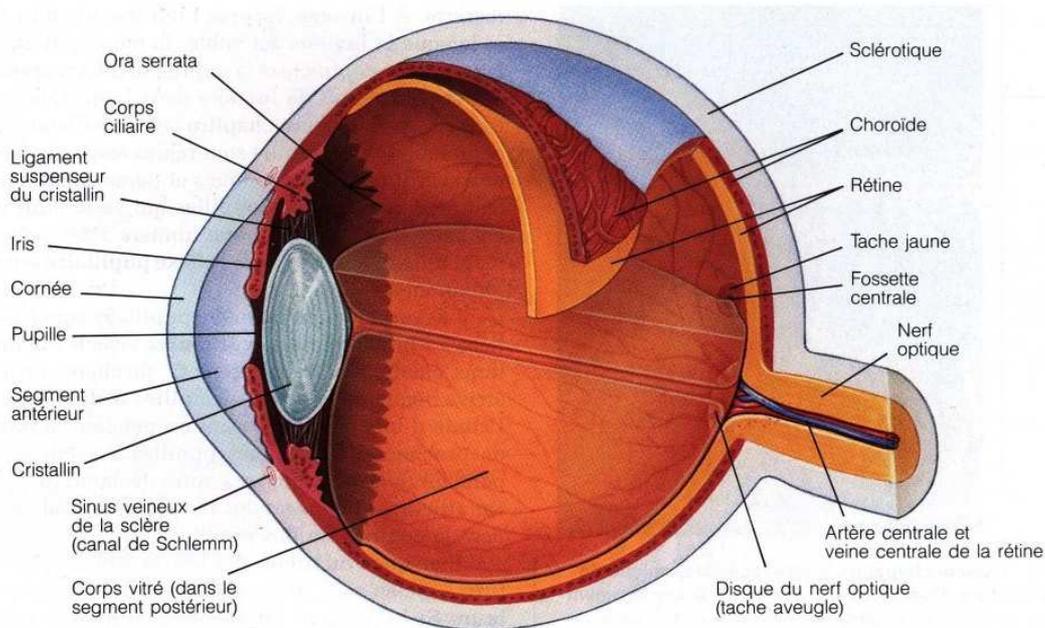


FIGURE 1.5 – Coupe sagittale de l'œil. Le corps vitré n'est représenté que dans la moitié inférieure de la cavité oculaire.

1.1.2.1 Les trois tuniques du globe oculaire

Tunique fibreuse (externe) La tunique fibreuse, externe, se compose sur sa partie postérieure de la sclère opaque (4/5 ème de la surface du globe) et sur sa partie antérieure de la cornée transparente.

La sclère est la plus résistante des tuniques de l'œil ; elle est formée d'un tissu fibreux dense et peu vascularisé assurant sa protection et son maintien structural. Sa partie antérieure est recouverte par la conjonctive bulbaire, muqueuse transparente qui assure la production d'un mucus lubrifiant. D'une épaisseur de 1 à 2 mm, la sclère laisse le passage aux fibres du nerf optique par une petite ouverture postérieure, la lame criblée, et se prolonge au niveau de sa partie antérieure par une membrane transparente circulaire et bombée vers l'extérieur, la cornée.

La cornée humaine est un tissu transparent avasculaire composé de trois couches, l'épithélium, le stroma et l'endothélium, séparées par deux membranes, les membranes de Bowman et de Descemet (Fig. 1.6). D'une épaisseur d'environ 50 μm , l'épithélium, qui est la

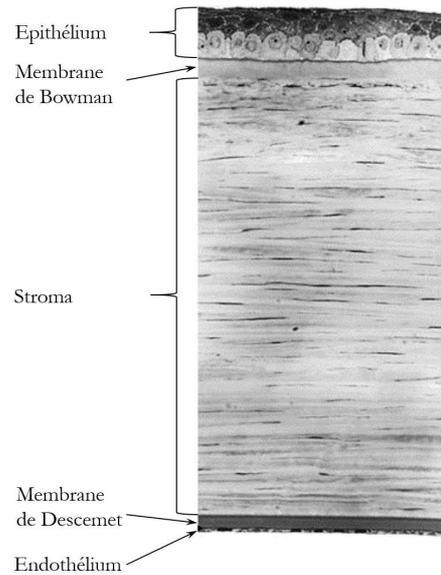


FIGURE 1.6 – Aspect histologique de la cornée humaine.

couche externe, constitue une barrière physique contre l'environnement extérieur et assure l'imperméabilité de la cornée. Le stroma est la couche la plus épaisse de la cornée, comptant pour 90% de son épaisseur totale. Il est composé d'eau à 78% et de collagène pour le reste.

L'endothélium est une monocouche cellulaire de quelques microns d'épaisseur dont le rôle est de réguler la quantité d'eau contenue dans le stroma. Dénuée de vaisseaux sanguins, la cornée assure sa nutrition essentiellement par imbibition de l'humeur aqueuse. Riche en fibres nerveuses dites nociceptives, ces dernières confèrent à la cornée la plus grande sensibilité tactile du corps humain. Cette sensibilité permet d'induire rapidement un clignement d'œil et une sécrétion lacrymale en cas d'agression par contact avec un objet ou attaque bactérienne.

Légèrement elliptique de face, la cornée mesure en moyenne, chez l'adulte, 11,7 mm de diamètre horizontal et 10,6 mm de diamètre vertical. Son épaisseur augmente du centre (environ 0,45 mm) vers la périphérie pour atteindre environ 0,7 mm au niveau du limbe. Le rayon de courbure de sa face extérieure est d'environ 7,8 mm en moyenne et celui de sa face intérieure d'environ 6,8 mm [Oyster, 1999]. La participation de la cornée au système optique de l'œil est détaillée ci-après.

Le limbe scléro-cornéen constitue la zone de transition entre la périphérie cornéenne transparente et la sclère opaque. Il joue un rôle fondamental au niveau de la nutrition et du métabolisme de la cornée périphérique grâce à la richesse de sa vascularisation.

Tunique uvéale (intermédiaire) D'une épaisseur plus importante autour de la papille (200 à 350 μm) qu'à l'ora serrata (85 à 150 μm), la tunique uvéale, dite aussi uvée, est constituée de la choroïde en arrière, puis du corps ciliaire et de l'iris en avant. La choroïde est une membrane riche en vaisseaux et nerfs tapissant les 2/3 postérieur du globe, entre la sclère et la rétine. C'est le tissu nourricier de l'œil ; les importants échanges métaboliques qui ont lieu avec la rétine se produisent au travers d'une couche tissulaire qui recouvre le tissu capillaire choroïdien : la membrane de Bruch. La choroïde se prolonge en avant par

le stroma du corps ciliaire au niveau de l'ora serrata.

Le corps ciliaire se remarque par un épaississement de l'uvée situé en couronne derrière l'iris. Il est essentiellement formé de muscles lisses dont les contractions permettent de tendre ou relâcher les fibres zonulaires, et ainsi modifier la courbure du cristallin. Ils s'agit de l'accommodation, mécanisme de la vision détaillé ci-après. C'est également le corps ciliaire qui sécrète l'humeur aqueuse.

L'iris est la portion la plus antérieure de l'uvée ; il est de structure pigmentée, donnant sa couleur à l'œil et percé en son centre d'un orifice circulaire, la pupille. Sa contraction ou sa dilatation réflexes règlent la quantité de lumière pénétrant dans l'œil par la pupille, à la manière d'un diaphragme. Il est situé dans l'humeur aqueuse entre la cornée et le cristallin, séparant ainsi la chambre antérieure de la chambre postérieure de l'œil. L'iris est innervé par des fibres du système nerveux autonome qui activent ses muscles dilatateurs et sphincters responsables de la dilatation (mydriase) et de la constriction (myosis) pupillaires.

Tunique nerveuse (interne) La tunique nerveuse se compose de la rétine et du nerf optique.

Tapissant le fond de l'œil, la rétine est le lieu de transduction du message lumineux venant de l'extérieur en signaux nerveux électriques destinés au cerveau. Elle se divise, dans le sens antéropostérieur, en deux versants dont la jonction suit une ligne en zigzag : l'ora serrata. La portion principale, postérieure à l'ora serrata, constitue la rétine fonctionnelle ou visuelle, et la petite portion antérieure forme la rétine aveugle. La rétine visuelle se compose d'un tissu neuronal très fin (0,1 à 0,5 mm d'épaisseur), qui fait partie du système nerveux central, dans lequel on peut distinguer deux couches majeures.

La couche externe (la plus en profondeur) ou épithélium pigmentaire est formée d'une seule couche de cellules opaque et de couleur brune.

La couche neurosensorielle ou neuroépithélium est formée de nombreux photo-récepteurs, les cônes et les bâtonnets, auxquels se superposent des cellules neuronales (cellules ganglionnaires et bipolaires propres à la rétine) dont les terminaisons acheminent l'information visuelle. Comme évoqué en introduction, on dénombre environ 130 millions de photo-récepteurs. Les bâtonnets, responsables de la vision nocturne, en constituent 95%. Ils ne sont sensibles qu'à la différence entre obscurité et lumière mais disposent de la plus grande sensibilité. Les cônes, responsables de la vision diurne, forment donc les 5% restants. Moins nombreux mais de taille plus importante ils permettent de différencier les couleurs (combinaison d'influx nerveux en provenance de bâtonnets sensibles soit au rouge, au vert ou au bleu). Les cônes sont présents en majorité au niveau de la macula, "tache jaune" d'environ 2 mm de large sur 1,5 mm de haut appartenant à la région centrale de la rétine. Au milieu de celle-ci se trouve une légère dépression avasculaire de 0,4 mm de diamètre, la fovéa, où sont présents, uniquement, des cônes très rapprochés. Constituant l'axe visuel, c'est le point de la rétine offrant la meilleure acuité, d'où provient la plupart de l'information visuelle arrivant au cerveau.

A proximité de la macula (environ 4 mm de la fovéa) se trouve la papille, zone où les fibres nerveuses (axones) se réunissent pour former le nerf optique, câble d'un diamètre moyen de 4 mm et d'une longueur d'environ 5 cm. La papille dispose quant à elle d'un diamètre d'environ 1,5 mm ; elle est également appelée tache aveugle de part son absence de photo-récepteurs. Le nerf optique compte environ 1 million de fibres axonales ce qui atteste d'un prétraitement de l'information visuelle au niveau de la rétine, lorsque l'on se

réfère au 130 millions de photo-récepteurs présents dans l'œil humain. Avec le nerf optique cheminent également les vaisseaux centraux de la rétine (artère centrale de la rétine et veine centrale de la rétine) qui se divisent en plusieurs pédicules juste après leur émergence au niveau de la papille ; les vaisseaux rétiniens sont responsables de la nutrition des couches internes de la rétine.

1.1.2.2 Les milieux transparents de la cavité oculaire

Le globe oculaire enferme les milieux transparents composés de l'humeur aqueuse, du cristallin et du corps vitré. La partie postérieure du cristallin marque la limite entre le segment antérieur comprenant toutes les structures oculaires jusqu'à la cornée et le segment postérieur s'étendant jusqu'à la rétine.

L'humeur aqueuse Il s'agit d'un liquide transparent qui remplit l'espace entre la cornée et le cristallin, liquide continuellement renouvelé (toutes les 2 à 3 heures) et qui, avec le corps vitré, maintient la pression intra-oculaire (PIO). L'humeur aqueuse est produite par les procès ciliaires et passe de la chambre postérieure vers la chambre antérieure à travers la pupille. Dans la chambre antérieure, elle est éliminée au niveau du trabéculum, situé dans l'angle irido-cornéen, passant par le canal de Schlemm qui la relie à la circulation générale. Le trabéculum agit comme un filtre et peut donc être obstrué (débris d'iris, excès de protéines), entraînant alors une élévation de la PIO. Cela peut conduire à l'apparition d'un glaucome, maladie affectant la tunique nerveuse décrite par la suite. L'humeur aqueuse est composée de 99,6 % d'eau, mais aussi de vitamine C, de glucose, d'acide lactique, de sodium et de chlore ; elle est pauvre en protéines et en acides aminés.

Le cristallin Le cristallin (voir Fig. 1.7) est une lentille biconvexe transparente, avasculaire et élastique, entouré d'une capsule élastique de collagène dont les faces antérieure et postérieure se réunissent au niveau de l'équateur où s'insèrent les fibres zonulaires de Zinn qui l'amarrent au corps ciliaire.

La capsule est plus épaisse en avant (environ 13 μm) qu'en arrière (environ 4 μm) et également plus épaisse à l'équateur au niveau de l'insertion des fibres zonulaires [Barraquer *et al.*, 2006]. Elle s'épaissit avec l'âge et son module d'élasticité s'accroît, pendant que celui des fibres zonulaires décroît [Michael *et al.*, 2012]. À l'intérieur de la capsule se trouve la couche des cellules épithéliales, qui recouvre toute la face antérieure du cristallin sur une seule couche et qui se développe à l'équateur en plusieurs couches.

L'intérieur du cristallin est formé d'une multitudes de cellules allongées formant des fibres disposées en feuillets concentriques de façon analogue au bulbe d'un oignon. Ces fibres cristalliniennes sont constituées de cellules allongées dont la particularité est l'absence d'organelles et notamment de noyau. Elles se développent tout au long de la vie. Ces fibres prenant naissance en périphérie du cristallin, la zone nucléaire (noyau) est formée des fibres les plus anciennes, la zone corticale (cortex) des plus récentes. Le cytoplasme des cellules cristalliniennes est constitué d'une importante concentration de protéines appelées les cristallines.

Le cristallin est disposé sur un plan frontal, son diamètre équatorial varie entre 8.5 et 10 mm. Son épaisseur axiale est de 4 à 5 mm ; elle augmente sensiblement avec l'âge du fait de la production continue des fibres cristalliniennes, à raison d'environ 0.02 mm

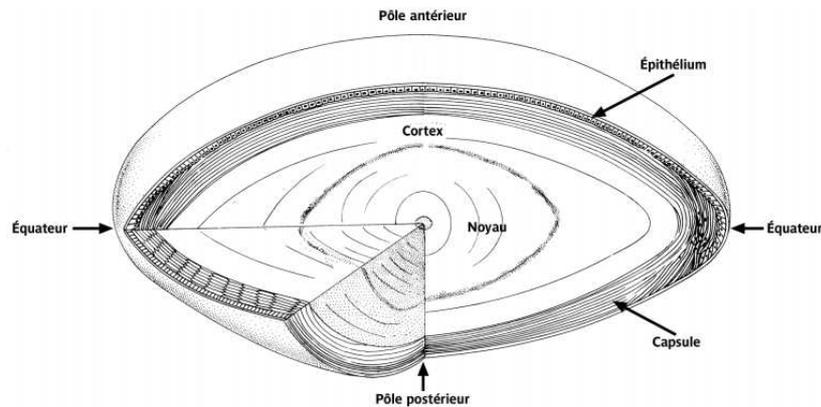


FIGURE 1.7 – Structure du cristallin adulte. La lentille est composée d'une série de couches concentriques. Les couches sont représentées plus épaisses qu'elles ne le sont en réalité. On distingue le noyau au centre de la lentille et le cortex en périphérie, le tout entouré de la capsule cristallinienne en collagène. Les pôles du cristallin sont situés aux centres des surfaces antérieures et postérieures.

par an [Dubbelman *et al.*, 2001]. Le volume du cristallin augmente donc tout au long de l'existence, occupant environ 90 mm^3 à l'âge de 3 mois, il peut atteindre 290 mm^3 vers quatre vingt dix ans.

Lentille naturelle de l'œil, le cristallin est au cœur du phénomène d'accommodation : sa courbure augmente sous l'effet de la contraction des muscles ciliaires, afin de permettre la vision de près. C'est essentiellement sa face antérieure qui se bombe ou s'aplatit, passant d'un rayon de courbure 6 à 7 mm, lorsque l'accommodation est maximale, à un rayon de courbure de 11 à 12 mm en son absence. Précisons que lorsque le cristallin n'est pas accommodé il est dit "au repos" car les muscles ciliaires sont alors relâchés. Cependant, celui-ci est manifestement en tension - transmise par la zonule - puisque lorsqu'il n'est soumis à aucune force, il adopte une forme plus bombée (notamment au niveau de sa face antérieure).

Le corps vitré Le corps vitré est une masse gélatineuse et transparente remplissant la cavité oculaire en arrière du cristallin. Il est composé à presque 99% d'eau, de sels, de sucres et de fibres de collagène riches en acide hyaluronique lui conférant sa viscosité. Occupant près des 90% du volume orbital, il est contenu dans une enveloppe également transparente, la hyaloïde. Le corps vitré participe au maintien de la rétine contre les parois du globe oculaire.

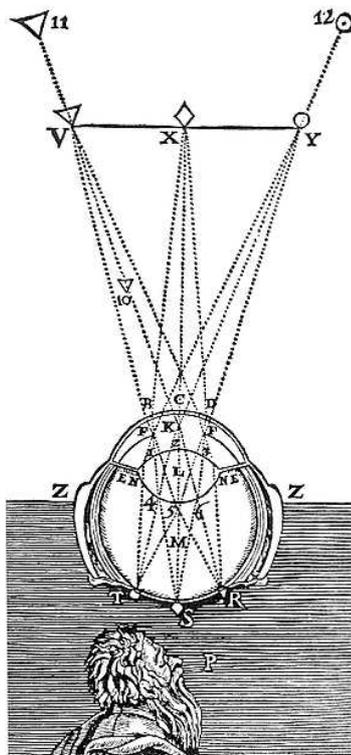
1.1.3 De l'œil à la vision

Le fonctionnement optique de l'œil ou plus précisément le mécanisme de la vision est un sujet qui intéresse l'homme depuis l'antiquité. Débattue par les différents penseurs grecs, la vision résulte pour Euclide (325-265 avant J-C) de rayons visuels émanant de l'œil et qui se propagent en ligne droite. L'idée que l'œil est un récepteur, comme supposé par Aristote, ne sera prouvé scientifiquement qu'en 1021 de notre ère, avec le "Traité d'optique" d'Ibn-Al-Haytham (965-1039), philosophe et scientifique arabe. Ce n'est qu'à

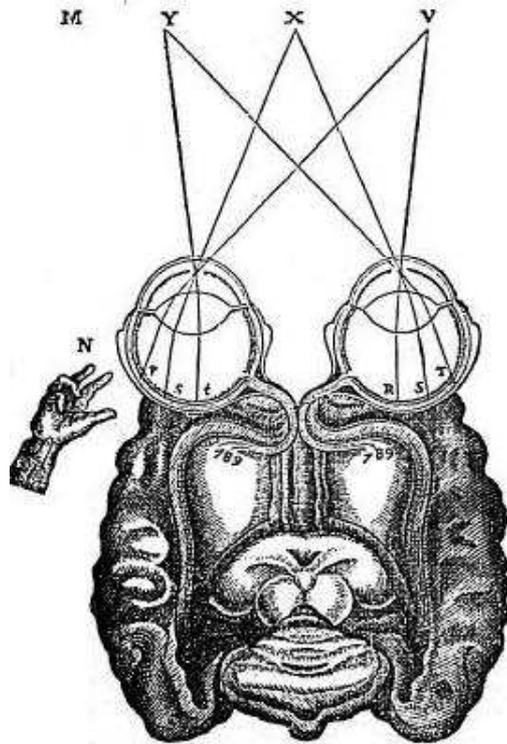
1.1. L'ŒIL HUMAIN

partir du développement de l'optique géométrique et des lois de la réfraction de Snell (1580-1626), reprises par Descartes (1596-1650), que la formation de l'image d'un objet sur la rétine, telle que nous la connaissons aujourd'hui, émerge.

Comme nous pouvons le voir sur la figure 1.8(a) extraite de "La Dioptrique" de Descartes, les rayons provenant d'un point vont être focalisés sur la rétine au moyen des deux lentilles naturelles que comporte l'œil, la cornée et le cristallin. La quantité de lumière parvenant jusqu'à la cornée est régie par l'iris qui adapte la taille de la pupille en fonction de l'intensité lumineuse reçue, à la manière d'un diaphragme. De plus, les deux illustrations de la figure 1.8 décrivent l'inversion de l'image sur la rétine, comme avait pu l'observer plus tôt Kepler (1571-1630) en disséquant un œil de bœuf.



(a) Formation de l'image inversée sur la rétine



(b) Transmission de l'image à l'âme

FIGURE 1.8 – Illustrations antiques du système oculaire extraites de "La Dioptrique" de Descartes - 1637

1.1.3.1 Un système optique adaptatif

Nous venons de voir que le système optique de l'œil se caractérise par un écran (la rétine), deux lentilles convergentes (la cornée et le cristallin) et un diaphragme (l'iris).

La cornée et le cristallin définissent quatre dioptries :

- air/cornée antérieure,
- cornée postérieure/humeur aqueuse,
- humeur aqueuse/face antérieure du cristallin

– face postérieure du cristallin/vitré

Le pouvoir dioptrique de l'œil entier se déduit ensuite de la somme des vergences de chacun de ces dioptries. Le pouvoir dioptrique ou puissance, noté π , définit la vergence d'un dioptre, c'est-à-dire sa capacité à faire converger ou diverger la lumière. Il dépend de la différence d'indice optique des 2 milieux qu'il sépare et est proportionnel à l'inverse de la distance focale du système optique et s'exprime en dioptrie, unité de symbole δ . Ainsi, pour un dioptre sphérique de rayon algébrique R , séparant dans le sens du trajet de la lumière deux milieux successifs d'indices n_1 et n_2 il s'exprime comme suit :

$$\pi = \frac{n_1 - n_2}{R} \quad (1.1)$$

Les indices optiques des milieux transparents oculaires sont donnés dans le tableau 1.1.

	Cornée	Humeur aqueuse	Cristallin	Vitré
Indice optique	1,377	1,337	1,413	1,336

TABLE 1.1 – Indices optiques des milieux transparents oculaires

La cornée est l'élément le plus réfractif de l'œil. Elle dispose d'un pouvoir dioptrique de 41 à 43 δ , ce qui représente environ 2/3 du pouvoir dioptrique oculaire lorsque le cristallin est au repos.

Par rapport à la cornée, le cristallin a la particularité de moduler son pouvoir dioptrique afin de maintenir une image nette sur la rétine lorsque l'objet se rapproche. Cette "mise au point" constitue le phénomène d'accommodation. Sa vergence s'accroît avec l'augmentation de sa courbure. Le cristallin constitue donc, d'un point de vue optique, une lentille biconvexe convergente, transparente, à focale variable. Au repos son pouvoir dioptrique est de l'ordre de 22 δ .

La distance la plus proche de l'œil à laquelle on peut encore bénéficier d'une image nette, c'est-à-dire pour une accommodation maximale, définit le *punctum proximum*. Il est d'environ 25 cm pour un œil emmétrope, c'est-à-dire exempt de défaut visuel. De même, le *punctum remotum* distance à laquelle un œil emmétrope perçoit encore une image nette en l'absence d'accommodation (cristallin au repos) est théoriquement situé à l'infini (rayons parallèle à la cornée focalisés sur la rétine). La distance entre ces deux points représente le parcours d'accommodation et la différence entre le pouvoir accommodatif du cristallin à l'état accommodé et celui à l'état de repos définit son amplitude accommodative. De 14 δ chez l'enfant, de 8 δ chez le jeune adulte, elle ne cesse de décroître avec l'âge.

1.1.3.2 Les différentes formes d'amétropie

Un œil est dit amétrope lorsqu'il n'effectue plus une mise au point correcte de l'image sur la rétine (voir Fig. 1.9).

La myopie Dans la myopie, la focalisation d'un objet situé à l'infini s'effectue en avant de la rétine. En conséquence, le *punctum remotum* est rapprochée par rapport à un œil emmétrope, d'où une vision floue au loin. Ce défaut visuel peut résulter d'un système optique défectueux dans lequel un cristallin anormalement bombé sera trop convergent (myopie d'indice), ou bien, et c'est le cas le plus fréquent, d'un œil trop allongé (myopie axiale).

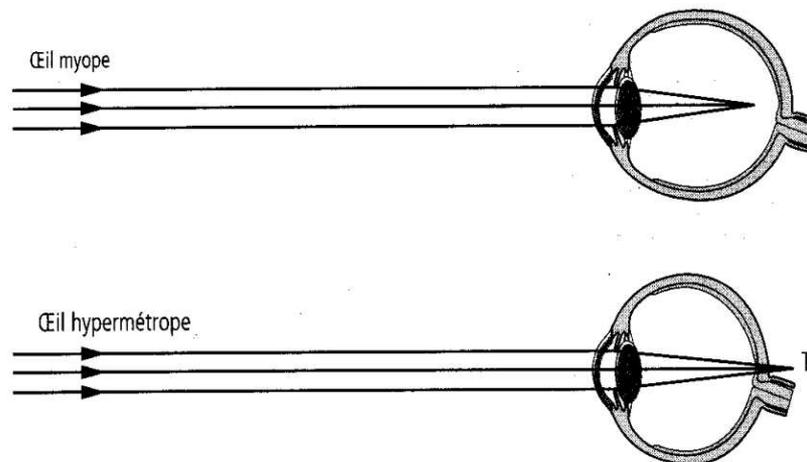


FIGURE 1.9 – Deux amétropies courantes : la myopie et l'hypermétropie

L'hypermétropie Il s'agit de l'inverse de la myopie, l'image d'un objet situé à l'infini se trouvera derrière la rétine. A l'image de la myopie, l'hypermétropie résulte le plus souvent d'une longueur axiale de l'œil trop courte et non d'un défaut de convergence de la cornée ou du cristallin.

L'astigmatie L'astigmatie correspond à un défaut du système optique oculaire dans lequel l'image d'un point n'est pas ponctuelle mais se retrouve étalée, dans le sens antéro-postérieur autour de la rétine. L'astigmatie est généralement associé à une asphéricité de la cornée responsable d'une variation de la focalisation en fonction de l'incidence des rayons lumineux (multi foyer).

La presbytie La presbytie correspond à une augmentation de la distance du *punctum proximum* et donc à une baisse de la vision de près. Elle résulte d'une perte de la fonction accommodative associée à une augmentation de la distance de focalisation du cristallin presbyte. Elle apparaît inéluctablement avec l'âge, le cristallin devenant plus volumineux et plus rigide, il peine à se bomber lorsque les muscles du corps ciliaire se relâchent.

1.1.4 Pathologies oculaires

Dans cette sous-section seules les principales pathologies oculaires observables aux ultrasons sont décrites. Elles sont illustrées le plus souvent par des images échographiques (mode-B) afin de familiariser le lecteur avec l'emploi des ultrasons en ophtalmologie, celui-ci étant détaillé dans la section suivante.

1.1.4.1 Pathologies du segment antérieur

Les principales pathologies du segment antérieur comprennent le kératocône, la conjonctivite, la kératite, l'uvéite antérieure et enfin la cataracte. Cette dernière empêche généralement l'examen optique du fond de l'œil, l'échographie devient alors une modalité privilégiée, notamment pour la planification d'une pose d'implant cristallinien intra-oculaire (IOL).

La Cataracte La cataracte est une affection oculaire définie par l'opacification partielle ou totale du cristallin, entraînant une diminution de l'acuité visuelle pouvant aller jusqu'à la cécité. Elle peut affecter un œil ou les deux yeux en même temps. Elle est d'après l'OMS l'une des causes majeures d'altération de la faculté visuelle.

Dans la majorité des cas, la cataracte résulte du vieillissement, se manifestant principalement chez les personnes de plus de 60 ans et avec une prévalence accrue chez les femmes [Zetterberg et Celojovic, 2014]. Les cataractes séniles progressent en général lentement. Par contre, des facteurs de risques tels que le diabète, le glaucome, l'hérédité, une maladie au cours de la vie intra-utérine (*e.g.* rubéole), un traumatisme à l'œil, une sur-exposition aux ultraviolets (UV) ou encore une contamination chimique peuvent induire des cataractes à tous âges. En fonction de la cause de son développement la cataracte sera dite secondaire (consécutives à une première opération de la cataracte), congénitale, traumatique ou radiative. La progression de ces types de cataracte est habituellement plus rapide.

Selon la haute autorité de la santé (rapport HAS de juillet 2010), la fréquence de cette maladie est en augmentation constante dans les pays industrialisés faisant de l'opération de la cataracte l'acte chirurgical le plus réalisé en France, avec près de 600000 interventions chirurgicales pratiquées en 2008 et 1 millions prévues en 2015.

En fonction de la zone anatomique opacifiée du cristallin (noyau, cortex, capsule), on distingue différentes sortes de cataracte. :

nucléaire : l'opacification touche le noyau du cristallin ; la baisse d'acuité visuelle associée se manifeste par une diminution de la vision de loin lorsqu'elle est liée à une myopie d'indice (augmentation de l'indice de réfraction du cristallin opacifié) et une vision double (diplopie) voire triple (triplopie). Cette forme de cataracte est la plus fréquente et de nombreux ophtalmologues la considère comme un vieillissement naturel du cristallin. Elle se rencontre donc principalement chez les personnes âgées, ou chez les myopes également.

corticale : l'opacification siège au niveau du cortex cristallinien, habituellement à l'équateur.

cortico-nucléaire : l'opacification concerne majoritairement le cortex et le noyau du cristallin. La luminosité perçue est considérablement diminuée. Il s'agit d'une forme fréquente de cataracte sénile.

sous capsulaire antérieure : l'opacification se trouve au niveau ou à proximité de la capsule antérieure du cristallin. Elle se rencontre préférentiellement en cas de diabète ou dans certaines formes d'allergies sévères.

sous capsulaire postérieure : l'opacification est située en avant de la capsule postérieure et est causée préférentiellement par certaines agressions physiques (*e.g.* UV) ou métabolique (*e.g.* tabagisme, carences alimentaires, corticoïdes,...). Elle entraîne plus volontiers une baisse de vision de près et est associée à des voiles de la vision et des sensations d'éblouissement.

totale : l'opacification atteint l'ensemble du cristallin. Cette forme très évoluée que l'on qualifie de cataracte "blanche" est parfois objectivable à l'œil nu, à l'éclairage direct de la pupille, le cristallin cataracté modifiant la lueur pupillaire qui apparaît grisâtre au lieu du rouge habituel.

Bien qu'identifiable puisqu'elle se manifeste par la présence d'échos dans l'intérieur du cristallin d'ordinaire anéchoïque [McNicholas *et al.*, 1994], la cataracte n'est généralement pas observée par ultrasons mais au moyen d'un biomicroscope (lampe à fente) dans la pratique ophtalmologique clinique. Cependant lorsqu'elle est trop dense, l'échographie

constitue la seule modalité permettant la mesure de la longueur axiale de l'œil. Comme nous le verrons dans le sous-chapitre suivant cette mesure - préalable à l'opération de la cataracte - est essentielle dans la calibration de la lentille intra-oculaire que l'on implante pour compenser la forte hypermétropie consécutive à l'ablation du cristallin.

1.1.4.2 Pathologies du segment postérieur

Le vitré, la choroïde, la rétine et en particulier la macula peuvent être le siège de nombreuses pathologies ou témoigner de troubles métaboliques ou systémiques. Cela inclut des tumeurs, des maladies inflammatoires, des dystrophies, des décollements de la rétine ou du vitré, des pathologies vasculaires rétiniennes etc...

Pathologies du vitré

Hyalopathie astéroïde La hyalopathie astéroïde est une maladie oculaire rare qui fait partie de ce qu'on appelle les corps flottants du vitré. Les corps flottants sont des opacités de tailles, de formes et de nature diverse présentes dans la cavité vitréenne. Si dans la majorité des cas ils résultent de la formation de petits agrégats de fibrilles liés à la condensation du vitré au cours du vieillissement, il s'agit dans le cas de la hyalopathie astéroïde de dépôts calciques et phospholipidiques. Le mécanisme d'apparition de cette maladie est encore relativement méconnu mais l'on sait qu'elle est liée à l'âge et serait associée à des maladies systémiques [Moss *et al.*, 2001] [Mitchell *et al.*, 2003].

Cette maladie se manifeste sur les images échographiques par des corps apparaissant de manière diffuse ou concentrée, quasi ponctuelle et hautement réfléchive (voir Fig. 1.10).

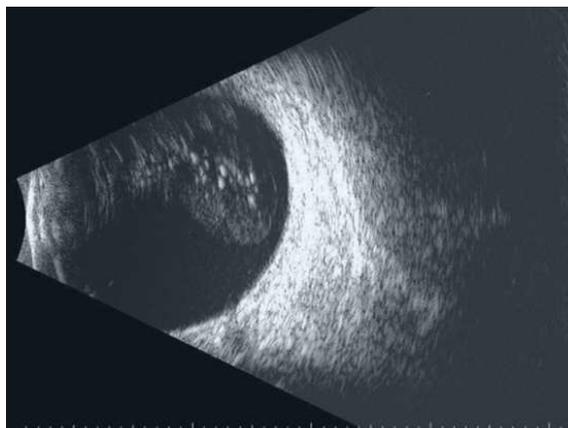


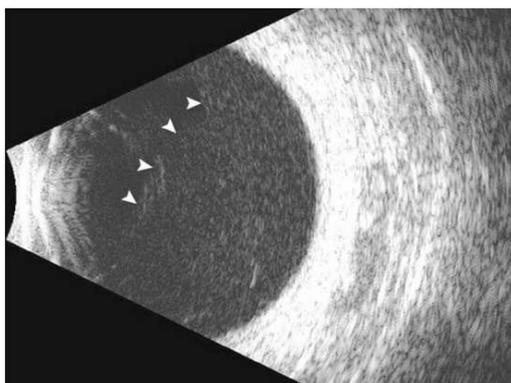
FIGURE 1.10 – Image échographique d'une hyalopathie astéroïde occupant partiellement la cavité vitréenne. "*Ophthalmic Ultraonography*" [Singh et Hayden, 2012]

Décollement postérieur du vitré De même que la rétine, le corps vitré peut subir un décollement, voire une rupture en cas de perforation de son enveloppe hyaloïde. Ce décollement survient généralement avec l'âge, lorsque la structure fibrillaire du gel vitréen dégénère et commence à se liquéfier (sénescence du vitré). Son inertie est alors accrue ce

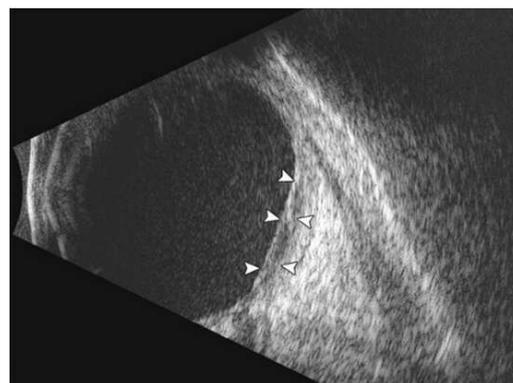
qui provoque des tensions plus importante sur sa paroi. Le vitré étant fortement attaché sur 360° au niveau de sa base - la limite antérieure de la rétine (ora serrata) - et seulement faiblement adhérent à la macula et au nerf optique, ses détachements de produisent préférentiellement au niveau du pôle postérieur[Sebag, 1987]. Chez près de la moitié des personnes atteintes, des portions du vitré restent attachées à la rétine exerçant ainsi des tractions parfois responsables de son déchirement [Kishi *et al.*, 1986].

Hémorragies vitréennes Bien que le vitré soit une structure avasculaire, une hémorragie vitréenne peut survenir suite à une extravasation sanguine au sein de sa cavité. Celle-ci peut résulter d'une rupture ou d'une diffusion au niveau des vaisseaux rétinieniens (anomalie congénitale ou néovaisseaux anormaux), d'un traumatisme ou encore d'une extension d'une hémorragie en provenance d'une autre source. On trouve ainsi dans les causes les plus communes d'hémorragie vitréenne, la rétinopathie diabétique proliférante (32%), les déchirures rétinieniens (30%), les rétinopaties proliférantes consécutives à l'occlusion de veines de la rétine, et enfin le détachement postérieur du vitré exempt de déchirure rétinienne (8%) [Spraul et Grossniklaus, 1997]. L'hémorragie dans le vitrée s'ensuit d'une formation rapide de caillots qui en principe disparaissent à raison d'environ 1% par jour. L'hémorragie vitréenne a une incidence de 7 pour 100000 au sein de la population globale[Spraul et Grossniklaus, 1997].

Une telle maladie requiert un examen échographique dynamique afin d'identifier les éventuels détachements, déchirures rétinienne, ou toute autre source potentielle d'hémorragie vitréenne. Lorsqu'elle est récente, l'hémorragie vitréenne apparaît sous la forme d'une multitude de réflecteurs répartis de façon diffuse dans l'ensemble du vitré et d'intensité faible ou moyenne sur les images échographiques (Fig. 1.11(a)). Ensuite, l'intensité de ces échos augmente progressivement avec la coagulation du sang. Au cours de ce phénomène, le caillot s'organise et se rétracte pouvant alors laisser apparaître des interfaces hautement réfléchives sur les images échographiques [Sharma *et al.*, 2008]. Celles-ci peuvent être confondues avec un détachement de la rétine lors d'un examen statique (Fig. 1.11(b)).



(a) Hémorragie récente : répartition diffuse des réflecteurs présentant des intensités faible à moyenne (têtes de flèche).



(b) Hémorragie dense avec formation d'interface s'apparentant à un décollement de rétine (têtes de flèche).

FIGURE 1.11 – Images échographiques d'hémorragies du vitré. *Vitreoretinal disorders* [Sharma *et al.*, 2008]

Pathologies de la rétine La rétine est sujette à décollement, déchirure, occlusion artérielle ou veineuse (rétinopathie), dégénérescences telle que la dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA), la rétinite pigmentaire ou encore l'amaurose congénitale de Leber.

Rétinopathie diabétique La rétinopathie diabétique survient dans le cadre d'un diabète et affecte la rétine indirectement par occlusion des artérioles qui l'alimente. À son stade initial, communément appelé "rétinopathie de fond", la rétinopathie diabétique est non proliférante (RDNP) et ne s'accompagne d'aucuns symptômes.

Lorsque le diabète est sévère (type II ou plus) elle peut devenir proliférante (RDP). Il existe alors une augmentation de la perméabilité des capillaires rétinien, provoquant hémorragies et exsudats. L'accumulation de ces fluides entraîne l'apparition d'œdème maculaire conduisant à l'occlusion des vaisseaux rétinien et en conséquence à des ischémies (défaut d'oxygénation) maculaires. De fait, la production du facteur de croissance de l'endothélium vasculaire est stimulée, aboutissant à la formation de capillaires anormaux et peu fonctionnels (néo-vascularisation). Ces néo-vaisseaux peuvent alors occlure la rétine et conduire progressivement à la cécité.

La fréquence de cette maladie est corrélée avec la glycémie sans que l'on puisse fixer un seuil en deçà duquel le risque est réduit [Wong *et al.*, 2008]. De nombreux diabétiques ont une RDNP moyenne, qui n'affecte généralement pas leur vision. Les formes proliférantes en touchent un peu moins de 10 % [Kempen *et al.*, 2004]. La rétinopathie diabétique est la principale responsable des cécités chez l'homme américain de moins de 70 ans [Roy *et al.*, 2004].

La présence d'hémorragie associée avec les formes avancées de rétinopathie diabétique nécessite l'emploi des ultrasons afin de dépister un éventuel décollement de rétine par traction sous-jacente.

La dégénérescence maculaire liée à l'âge La dégénérescence maculaire liée à l'âge (DMLA) ou dégénérescence maculaire sénile est une maladie dégénérative rétinienne chronique, évolutive et invalidante, qui débute généralement après l'âge de 50 ans. Elle atteint de manière sélective la macula en provoquant une dégénérescence de ses cellules visuelles. C'est la première cause de malvoyance après 50 ans dans les pays développés ; 12% de la population entre 65 et 75 ans présente une DMLA [Pascolini *et al.*, 2004]. On distingue trois formes de DMLA, une forme précoce et deux formes évolutives :

DMLA précoce : elle est caractérisée par la présence de drusen, petits dépôts de matériel amorphes dans la rétine et représente environ 30% des cas.

DMLA atrophique : évoluant lentement (sur des années), elle se manifeste par des altérations de l'épithélium pigmentaire et un amincissement de la macula consécutif à l'évolution des drusen et concerne environ 50% des cas.

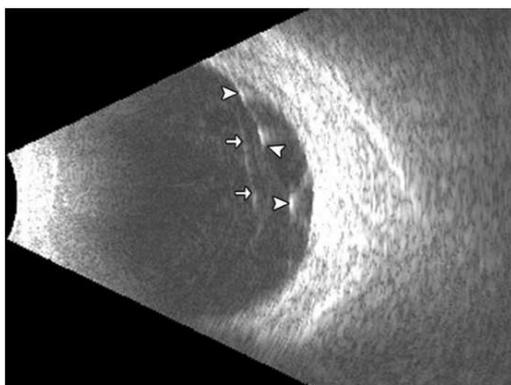
DMLA exsudative : représentant environ 20% des cas, elle est caractérisée par le développement de néovaisseaux choroïdiens sous la macula ; l'évolution de cette forme peut être très rapide, conduisant à la perte de la vision centrale en quelques semaines ou mois.

Les DMLA se remarquent en échographie sous la forme de masses de réflectivité interne moyennement élevée. Avec le temps, les hémorragies sous-rétiniennes associées à la DMLA se remarquent par des zones hypoéchogènes provoquant une excavation de la choroïde et d'apparence similaire au mélanome choroïdien.

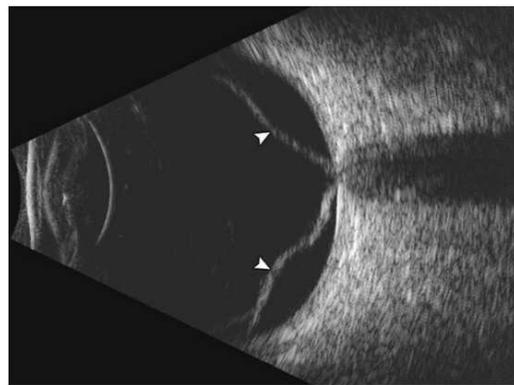
Décollement rétinien Les décollements de la rétine se produisent lorsque la rétine neurosensorielle se sépare de son épithélium pigmentaire (postérieure au reste de la rétine). Trois types de détachement sont à distinguer [Sodhi *et al.*, 2008] :

- **Rhegmatogène** : D'une incidence de 10/100000 dans la population générale, il s'agit du type de détachement le plus fréquent ; il se caractérise par la présence d'une déchirure - également appelée déchirure rétinienne par les ophtalmologues - sur toute l'épaisseur de la rétine. Les décollements rhegmatogènes se produisent des suites de l'action conjuguée de la liquéfaction du vitré, des forces de tractions que provoque une déchirure et enfin de la libre circulation du vitré liquéfié au travers de celle-ci vers l'espace sous-rétinien (espace normalement vide entre la rétine sensorielle et son épithélium pigmentaire) [Sodhi *et al.*, 2008].
- **Tractionnel** : Les détachements de type tractionnel sont les plus courants après ceux de type rhegmatogène [Haimann *et al.*, 1982]. Ils se produisent sous l'effet d'adhésions vitréo-rétinienne provoquant la séparation mécanique de la rétine neurosensorielle de son épithélium pigmentaire. Celles-ci peuvent résulter d'un décollement postérieur du vitré, d'un traumatisme ou encore d'une rétinopathie diabétique sévère. Les détachements tractionnels ont une forme de dôme dont le sommet (point de traction) constitue le point le plus éloigné de l'épithélium pigmentaire (voir Fig. 1.12(a)).
- **Exsudatif** : Les détachements exsudatifs sont le résultats d'une accumulation progressive de fluide entre la rétine neurosensorielle et l'épithélium pigmentaire. Ils traduisent une rupture, soit de la barrière hématorétinienne, soit de la barrière chorio-rétinienne.

Le détachement de type rhegmatogène est qualifié de primitif et les deux autres de secondaires. Ces différents mécanismes peuvent toutefois ne pas s'exclure mutuellement : décollement à la fois tractionnel et rhegmatogène dans certains cas de rétinopathie diabétique proliférante ou d'occlusion de la veine centrale de la rétine, décollement à la fois tractionnel et exsudatif dans certains cas de décollements post inflammatoires.



(a) Décollement de la rétine de type exsudatif (têtes de flèche) accompagné d'un décollement postérieur du vitré (flèches).



(b) Décollement de la rétine total.

FIGURE 1.12 – Images échographiques de décollement de la rétine. *Vitreoretinal disorders* [Sharma *et al.*, 2008]

1.1. L'ŒIL HUMAIN

Les détachements rétiniens sont hautement réfléchifs à l'échographie et s'apparentent à des cordes en suspension dans le vitré. Malgré les détachements, la rétine garde toujours contact avec la papille optique. Lorsque la rétine n'est plus attachée au niveau antérieur qu'à l'ora serrata et au niveau postérieur qu'à la papille, le décollement est total et prend la forme d'un entonnoir ce qui se traduit par un "V" sur la vue en coupe qu'offre une image échographique (voir Fig. 1.12(b)).

Rétinoschisis Le rétinosischisis est une maladie rétinienne provoquant une division de la rétine sensorielle en deux couches au milieu desquelles se forme des espaces kystiques [Straatsma, 1977]. Il existe deux formes de rétinosischisis : l'une dégénérative et l'autre juvénile. La forme dégénérative est idiopathique, progressant avec l'âge et touchant 0.7% de la population [Lewis, 2003]. La forme juvénile est d'origine génétique - liée au chromosome X - avec une incidence estimée entre 1/5000 et 1/25000 à travers le monde.

Tout comme le détachement de rétine, le rétinosischisis apparaît hautement réfléchif à l'échographie (Fig. 1.13), mais s'en distingue par une intensité légèrement moindre et une épaisseur moins marquée [Hillman et Ridgway, 1975]. En l'absence de trouble des milieux, le diagnostic du rétinosischisis peut être grandement facilité par un examen OCT qui donne une vision plus précise de la séparation en deux feuillets de la rétine et des espaces kystiques.

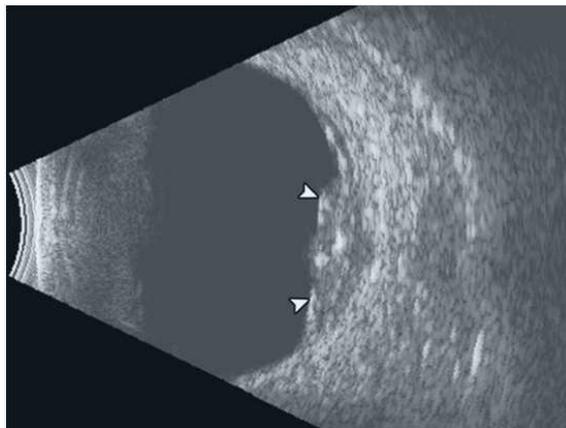


FIGURE 1.13 – Image échographique transverse d'un rétinosischisis. "*Vitreoretinal disorders*" [Sharma et al., 2008]

1.1.4.3 Atteintes du nerf optique

Les maladies du nerf optique s'avèrent en pratique difficiles à diagnostiquer du fait de l'impossibilité de pratiquer une biopsie. L'échographie constitue cependant un bon moyen de diagnostic et de suivi de ses principales affections : la névrite, l'œdème papillaire, les drusen papillaires et enfin la plus fréquente, le glaucome.

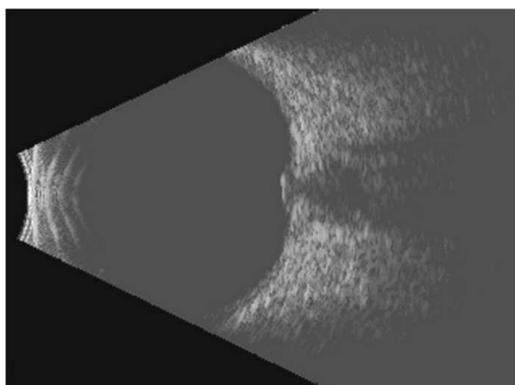
L'œdème papillaire L'œdème papillaire, appelé également stase papillaire, est une petite accumulation d'eau au niveau de la papille résultant généralement d'une hypertension intracrânienne. Tout comme pour la DMLA, l'œdème peut être la cause d'ischémie et entraîner une atrophie optique. Notons que la pression intracrânienne (PIC) est connue pour

être corrélée avec le diamètre de la gaine du nerf optique. Plus son diamètre augmente et plus la PIC sera élevée. Sa mesure constitue donc un moyen indirect pour évaluer la PIC. Les ultrasons constituent le seul moyen non invasif pour son observation.

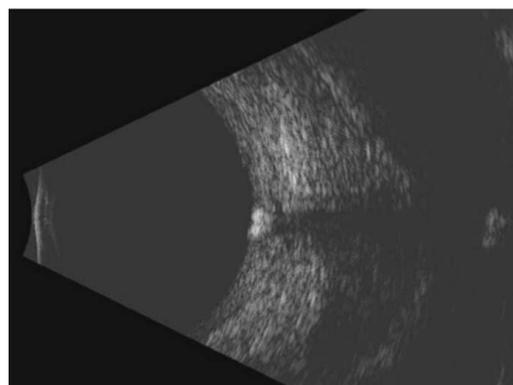
L'échographie en mode-B permet de distinguer l'œdème papillaire, hypoéchogène (voir Fig. 1.14(a)) des drusen papillaires.

Les drusen papillaires Les drusen du nerf optique sont des concrétions calciques issues de la membrane de Brush. D'évolution habituellement bénigne, les drusen peuvent toutefois s'accompagner d'anomalies progressives du champ visuel et entraîner de très rares complications aiguës. Les drusen du nerf optique peuvent ainsi se compliquer d'un œdème papillaire ischémique, les autres causes de perte visuelle dues uniquement au drusen demeurant exceptionnelles. Les drusen ont une incidence comprise entre 0.34% et 2% au sein de la population caucasienne [Zaouali *et al.*, 2014].

Bien que pouvant être visibles par ophtalmoscopie, il arrive que le diagnostic des drusen soit difficile, notamment lorsqu'ils sont enfouis dans la profondeur de la tête du nerf optique. L'analyse de la tête du nerf optique par échographie en mode-B est alors privilégiée pour identifier les drusen papillaires qui se caractérisent par une réflectivité élevée [Khonsari *et al.*, 2010] (voir Fig. 1.14(b)).



(a) œdème papillaire marqué par l'élévation de la papille optique.



(b) Drusen hautement calcifié au niveau de la papille ne présentant pas d'œdème papillaire.

FIGURE 1.14 – Images échographiques en coupe transverse d'atteintes du nerf optique "*Ophthalmic Ultraonography*" [Singh et Hayden, 2012]

Le Glaucome Le glaucome est une maladie dégénérative du nerf optique qui entraîne une perte progressive de la vision commençant tout d'abord en périphérie et progressant graduellement vers le centre. Cette maladie est souvent associée à une pression intra-oculaire (PIO) élevée qui comprime et endommage les fibres du nerf optique et de la rétine. Dans d'autres cas, malgré une PIO normale, une circulation sanguine inadéquate entraîne la mort (nécrose) des cellules du nerf optique et de la rétine. Parmi les symptômes du glaucome on trouve aussi une néo-vascularisation de l'iris et de l'œdème cornéen. La perte de vision associée au glaucome est permanente et irréversible, pouvant mener jusqu'à la cécité en l'absence de traitement. Les types de glaucome sont nombreux avec des mécanismes différents, le plus courant étant le glaucome chronique à angle ouvert (l'angle irido-cornéen) et

le plus grave le glaucome aigu à angle fermé.

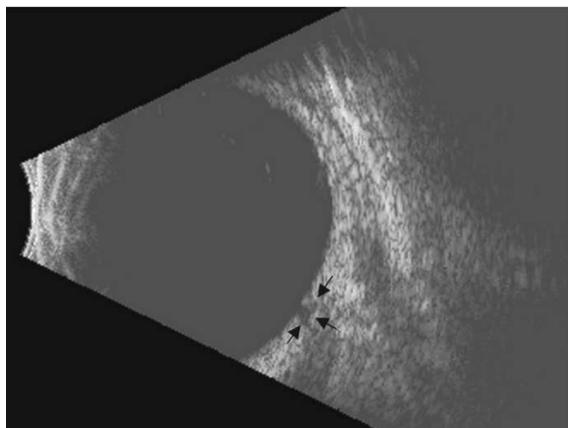


FIGURE 1.15 – Image échographique montrant le renforcement du disque optique provoqué par un glaucome. "*Ophthalmic Ultraonography*" [Singh et Hayden, 2012]

Le diagnostic du glaucome s'effectue donc à plusieurs niveaux, en combinant la mesure de la PIO (tonométrie) qui s'accompagne de la mesure de l'épaisseur cornéenne (pachymétrie), l'évaluation de l'angle irido-cornéen (gonioscopie) et enfin de l'aspect du nerf optique, particulièrement de sa tête. En cas d'opacification, l'échographie du segment postérieur est pratiquée pour l'évaluation de la tête du nerf optique (voir Fig 1.15).

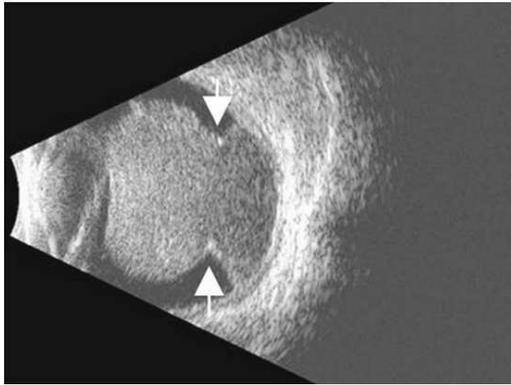
1.1.4.4 Tumeurs intra-oculaires

Bien que rares en comparaison des autres formes d'affections de l'œil, les tumeurs intra-oculaires nécessitent une modalité d'imagerie précise ayant une grande capacité de différenciation tissulaire. Les tumeurs intra-oculaires peuvent être en effet de natures variées, allant de tumeurs bénignes asymptomatiques à des tumeurs malignes pouvant compromettre la vue, voire la vie. L'échographie constitue depuis longtemps une des modalités favorite (par rapport au scanner, l'IRM et l'OCT) pour leur visualisation (localisation, étendue, extension sclérale) localisation, leur caractérisation et leur suivi (développement et régression). Nous allons donner ici la description de quelques unes des tumeurs les plus fréquemment rencontrées.

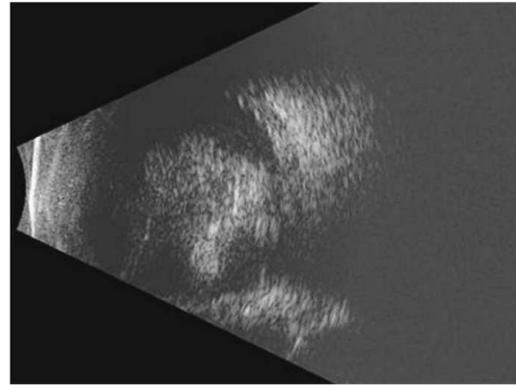
Mélanome choroïdien Le mélanome de la choroïde est une tumeur maligne qui bien que rare, représente la cause la plus fréquente de cancer de l'œil chez l'adulte.

Les ultrasons sont bien adaptés pour caractériser ce type de tumeur et les différencier d'autres entités pouvant présenter une apparence clinique similaire. Notons que l'iris et le corps ciliaire sont eux aussi sujets à mélanome. Les mélanomes sont en général moyennement échogènes (voir Fig. 1.16(a)).

Rétinoblastome Affectant la rétine, le rétinoblastome est la tumeur maligne intraoculaire la plus fréquente de la prime enfance et de l'enfance (90% des personnes touchées sont des enfants de moins de 3 ans), avec une incidence de 1/14 000 à 1/20 000 naissances vivantes [Grossniklaus, 2014]. Le rétinoblastome se manifeste le plus souvent par une leucorie (reflet



(a) Mélanome choroidien en contact avec la capsule postérieure du cristallin. Les flèches indiquent une rupture de la membrane de Bruch.



(b) Rétinoblastome se présentant sous la forme d'une masse intraoculaire calcifiée.

FIGURE 1.16 – Images échographiques de tumeurs intraoculaires "*Ophthalmic Ultrasonography*" [Singh et Hayden, 2012]

blanchâtre de la pupille) et un strabisme. D'autres symptômes, tels une baisse de l'acuité visuelle, une inflammation oculaire ou encore une cellulite orbitale peuvent aussi être observés [Grossniklaus, 2014]. Soixante pour-cent des rétinoblastomes sont unilatéraux et la plupart de ces formes ne sont pas héréditaires [Grossniklaus, 2014]. En général, l'aspect du rétinoblastome varie suivant sa progression (voir Fig. 1.16(b)). Il apparaît au début sous la forme d'une lésion transparente légèrement blanchâtre au niveau de la rétine sensorielle qui progressivement va grossir et s'opacifier. Il s'accompagne d'une dégradation des vaisseaux sanguins de la rétine. A un stade avancé, il peut s'accompagner d'un glaucome néo-vasculaire, d'œdème cornée, d'une hémorragie dans la chambre antérieure (hyphéma) ou dans le vitré.

La leucorie étant diagnostiquée à l'issue d'un examen de fond d'œil (modalité optique), le rétinoblastome est ensuite confirmé au moyen des ultrasons. Les tumeurs portant des lésions calcifiées auront une échogénicité d'autant plus importante que la calcification sera prononcée, tandis que les autres seront faiblement échogènes. Lorsqu'un certain degré de calcification est atteint, les images échographiques affichent typiquement une masse intra ou sous rétinale irrégulière aux contours arrondis, comme on peut l'apprécier sur la figure 1.16(b).

1.1.4.5 Maladies inflammatoires oculaires

Les uvéites comprennent un vaste panel d'inflammations oculaires impliquant l'iris, le corps ciliaire et la choroïde. L'incidence des uvéites est élevée, avec 52.4/100000 cas reportés aux États Unis [Gritz et Wong, 2004]. Elles sont majoritairement localisées (à 90%) dans le segment antérieur, avec une préférence pour l'iris [Shah *et al.*, 1992]. Les inflammations peuvent également toucher le tissu scléral et la cavité orbitale.

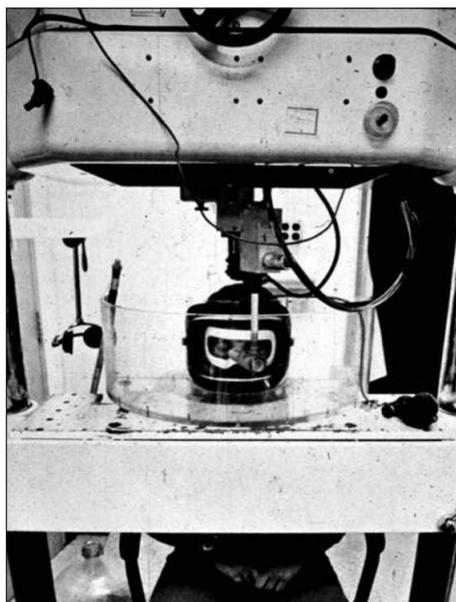
Les ultrasons jouent un rôle important dans l'évaluation de nombre d'inflammations affectant le globe et ses annexes. Si pour les inflammations du segment antérieur les techniques optiques sont favorisées en l'absence d'opacification, l'échographie s'avère très utile

pour les inflammations touchant à la sclère ou aux muscles oculomoteurs. Les inflammations se remarquent échographiquement par des exsudats hautement échogènes dans le voisinage de la zone inflammée.

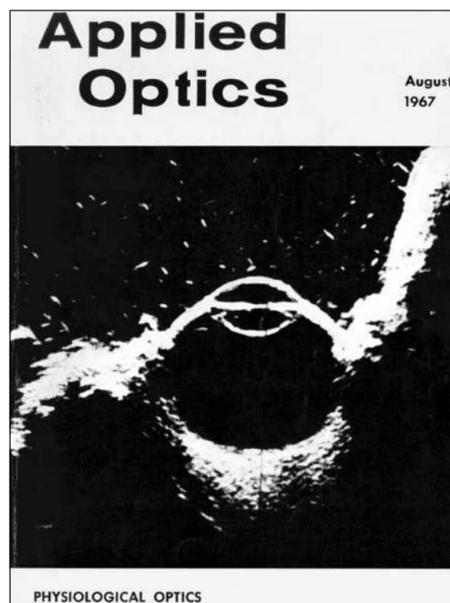
1.2 L'Échographie oculaire : Pratique clinique et devenir

Pratiquée depuis près de 50 ans, l'échographie oculaire se distingue des autres types d'échographie médicale par les fréquences élevées qu'elle nécessite pour l'observation des petites structures propres à l'anatomie oculaire. Les fréquences employées de nos jours vont ainsi de 8 MHz pour l'observation des tissus orbitaux à 100 MHz pour l'observation de la cornée.

Initiée au milieu des années 50 par Mundt et Hughes[Mundt et Hughes, 1956], l'échographie de l'œil fut l'une des premières applications des ultrasons en médecine[Oksala et Lehtinen, 1957]. Près de 20 ans de développements techniques et technologiques ont peu à peu conduit à l'émergence de l'échographie ophtalmique dans la pratique clinique et ophtalmologique. Parmi les acteurs de cet essor, figurent Baum et Greenwood, premiers chercheurs à avoir mis au point un système d'imagerie en mode-B [Baum et Greenwood, 1958b], [Baum et Greenwood, 1958a] (voir Fig. 1.17), ou encore Ossoinig qui, au milieu des années 70 a proposé toute une sémiologie en mode-A - encore utilisée de nos jours - des différentes pathologies oculaires et orbitaires [Ossoinig, 1974], [Ossoinig et Till, 1975], [Ossoinig *et al.*, 1979], [Ossoinig, 1979]



(a) Système d'immersion au moyen d'un masque tel que développé par Baum pour l'observation d'un ou des deux yeux.



(b) L'une des premières publications d'une échographie en mode-B de l'œil, par Baum.

FIGURE 1.17 – Les débuts de l'échographie oculaire. *Ultrasonography of the Eye and Orbit*

En l'espace de quelques décennies, l'imagerie de l'œil et de l'orbite n'a cessé de se développer, profitant des progrès constants d'autres techniques, comme la radiologie (scanner), l'IRM ou spécifiques à l'ophtalmologie. Bien que représentant une des plus an-

ciennes modalités pour son exploration (en particulier avec la biométrie en mode-A décrite dès la fin des années 1950), le caractère confidentiel de l'échographie oculaire a longtemps confiné son utilisation à un cercle restreint d'ophtalmologistes et d'échographistes [Bergès *et al.*, 2006]. Depuis l'apparition puis le développement continu du mode-B permettant la restitution d'une image anatomique bidimensionnelle, l'échographie s'est imposée comme une technique de référence, en particulier comme un prolongement de l'examen clinique quand les milieux opaques interdisaient l'accès au fond d'œil [Bergès *et al.*, 2006] [Sandra Frazier Byrne, 2002]. Une étape supplémentaire a été franchie avec l'apparition et le perfectionnement de l'écho-Doppler couleur et pulsé [Bergès *et al.*, 2006] [Lieb, 1993].

Dans cette section, nous allons tenter de dresser un panorama complet des différentes spécialités que comporte l'échographie ophtalmique.

1.2.1 Aspect échographique des tissus oculaires normaux

Nous allons donner ici une brève description de l'aspect que revêtent les principales structures anatomiques de l'œil sur les images échographiques (mode-B). Rappelons que le globe oculaire est arbitrairement divisé en un segment antérieur (cornée, iris, corps ciliaire et cristallin) et un segment postérieur (corps vitré, rétine, choroïde et sclère). Précisons aussi que l'échogénicité se définit comme la capacité d'un milieu à renvoyer un écho lorsque celui-ci est parcouru par une onde ultrasonore. Plus une structure est échogène et plus l'intensité des pixels qui la représentent sur l'image échographique sera importante. L'intensité d'un écho résultant d'une réflexion - comme on l'observe à l'interface entre deux tissus n'ayant pas la même impédance acoustique lorsque celle-ci est de grande taille par rapport à la longueur d'onde - sera d'autant plus importante que la différence d'impédance sera grande et que la sonde sera orientée de façon normale à cette interface (réflexion maximale). L'échogénicité que nous décrivons ici est sans lien avec l'inclinaison de la sonde, il s'agit de l'échogénicité intrinsèque des tissus oculaires normaux traduisant donc la différence d'impédance acoustique.

Segment antérieur L'épithélium et l'endothélium de la cornée (interfaces couplant acoustique/cornée et cornée/humeur aqueuse respectivement) apparaissent comme des lignes hyperéchogènes.

Postérieur à l'iris, le corps ciliaire est représenté par une masse hyperéchogène (de façon homogène) aux contours irréguliers, en contact avec les pôles supérieur et inférieur du cristallin [Ossoinig, 1974]. L'humeur aqueuse emplissant la chambre antérieure, de même que les autres milieux transparents est anéchogène.

Le contenu du cristallin (noyau et cortex) est également anéchogène ; seules ses capsules antérieure et postérieure le sont, la première générant un écho plus intense que la seconde [Sandra Frazier Byrne, 2002].

Segment postérieur Le vitré est, à l'image des autres milieux transparents, totalement anéchogène. L'interface qu'il forme avec le fond de l'œil est très marquée. Le complexe rétine, choroïde et sclère forme quant à lui une bande hyperéchogène [Sandra Frazier Byrne, 2002]. L'individualisation des trois couches peut s'avérer difficile surtout lorsque l'on utilise une sonde ultrasonore de fréquence inférieure à 20 MHz [Coleman *et al.*, 2004b]. La rétine et la choroïde se distinguent cependant par une échogénicité légèrement moins importante que

celle de la sclère. [Sandra Frazier Byrne, 2002]

La papille et le nerf optique La papille optique apparaît sous la forme d'un écho particulier, se détachant du reste de l'interface vitréo-rétinienne. Cette zone est plus échogène que le reste de la surface scléro-choroïdo-rétinienne ; souvent décrite comme une légère dépression, elle peut également se trouver au même niveau, voire surélevée, par rapport à la rétine [Sandra Frazier Byrne, 2002]. Faisant suite à cette papille, se trouve évidemment le nerf optique qui apparaît sous la forme d'un tunnel sombre en coupe axiale du fait de l'hyporéflexivité des fibres nerveuses optiques.

Cône rétrobulbaire Les muscles oculomoteurs forment une bande globalement anéchogène accompagnée de quelques faibles échos internes. Ils s'observent depuis l'aire rétrobulbaire jusqu'à leur lieu d'attache sur le globe. Le coussinet adipeux formé par la graisse orbitaire est quant à lui hétérogène et très échogène, ce qui apporte un contraste favorisant la visualisation de la sclère, le nerf optique et les muscles [Sandra Frazier Byrne, 2002].

1.2.2 Instrumentation et techniques d'examen

1.2.2.1 Indications pour l'examen

Les principales indications de l'échographie en ophtalmologie sont de suppléer aux méthodes optiques s'il existe un trouble des milieux (*e.g.* taie cornéenne, hyphéma, hypopion, cataracte évoluée, hémorragie intravitréenne...), d'explorer les zones non accessibles par ailleurs (*e.g.* rétine périphérique, notamment chez le pseudo-phaque), de différencier les structures (*e.g.* vitré, hyaloïde postérieure, rétine...) et de mesurer les différentes anomalies et segments du globe (tumeurs, longueur axiale) [Singh et Hayden, 2012]. En cas d'hémorragie du vitré, elle est essentielle pour le diagnostic des déchirures de la rétine [Nischal *et al.*, 1995a].

L'échographie se révèle ainsi particulièrement utile dans sa capacité à différencier les tissus sains de ceux pathologiques, notamment les tumeurs (*e.g.* mélanome choroïdien, rétinoblastome) ou encore pour distinguer les détachements choroïdiens d'origine séreuse de ceux hémorragiques, les détachements rétinien rhégmato-gènes de ceux de type exudatifs, les drusen papillaires des œdèmes, *etc...*

L'emploi d'une sonde échographique n'est contre-indiqué que dans de rares cas, presque exclusivement lors d'une suspicion de rupture du globe oculaire, en cas de traumatisme ou des suites d'une chirurgie. La pression exercée par la sonde durant l'examen risque alors de provoquer une extrusion du contenu oculaire.

1.2.2.2 Différentes sondes pour différents examens et différents modes

Les sondes US employées dans la pratique ophtalmologique sont constituées d'un unique transducteur permettant l'affichage mono-dimensionnel en mode-A et bi-dimensionnel en mode-B, grâce à un balayage mécanique. Ce balayage peut être linéaire, délivrant une image rectangulaire comme en UBM, ou suivant un arc délivrant une image sectorielle comme dans l'exploration du segment postérieur et de l'orbite.

Les différents examens pratiqués en ultrasonographie ophtalmique permettent d'évaluer toutes les zones du globe de façon méthodologique et reproductible [Ossoinig, 1974] [Byrne, 1979] [Fisher *et al.*, 1991] [Ossoinig, 1979] [Ossoinig *et al.*, 1979] [Farah *et al.*, 1984] [Byrne, 1986] [Farah *et al.*, 1984] [Byrne, 1986] [DiBernardo *et al.*, 1992] [Boldt *et al.*, 2008] [Byrne *et al.*, 2002]. Le type d'examen dépend de la zone à observer. Traditionnellement, le B-scan contact et le A-scan diagnostique sont utilisés dans l'évaluation du globe postérieur et de l'orbite. Les structures oculaires antérieures peuvent être évaluées avec un B-scan en immersion mais sont le plus souvent évaluées par biomicroscopie ultrasonore (UBM). L'examen peut se pratiquer en statique ou bien en dynamique. En dynamique soit l'œil est immobile (fixe un point) et la sonde est mobile, soit l'on demande au patient d'effectuer des mouvements oculaires pendant que la sonde est maintenue immobile.

La fréquence centrale des différentes sondes US que comptent l'échographie ophtalmique est régie par le compromis résolution spatiale *versus* profondeur d'exploration. En effet, plus celle-ci sera élevée, plus la résolution spatiale sera importante, mais plus la profondeur de pénétration sera faible. En effet, si l'atténuation dans l'eau est de 0.02 dB/mm à 10 MHz, elle est de 0.55 dB/mm à 50 MHz [Silverman, 2009].

Ainsi, les sondes échographiques de mode-A utiles pour l'observation de la longueur axiale ou le diagnostique des pathologies du segment postérieur et de l'orbite, fonctionnent à des fréquences généralement comprises entre 8 à 12 MHz.

Les sondes utilisées en mode-B emploient quant à elles des fréquences plus variées, régies par la profondeur d'exploration que l'on souhaite atteindre :

- **10 MHz** pour l'exploration du globe et de l'orbite
- **20 MHz** pour l'exploration de la cornée jusqu'à la partie postérieure du cristallin voire jusqu'au fond du bulbe
- **35 MHz** pour l'exploration de la cornée jusqu'à l'équateur du cristallin
- **50 MHz** pour l'exploration de la cornée jusqu'à la face antérieure du cristallin
- **100 MHz** pour l'exploration de la cornée exclusivement

L'emploi de fréquence supérieure à 35 MHz (très haute fréquence) est qualifié dans la pratique ophtalmologique de Biomicroscopie ultrasonore (UBM pour Ultrasound Biomicroscopy), terme introduit par Pavlin et Foster en 1991 [Pavlin *et al.*, 1991].

1.2.2.3 Le positionnement de la sonde en mode-B dans l'examen du segment postérieur

Du positionnement de la sonde ultrasonore dépend la section d'œil que l'on observe. Dans la pratique ophtalmologique, différents types de coupe ont été définis de façon à pouvoir observer, de façon générale, l'ensemble du segment postérieur et, de façon plus précise, ses structures anatomiques essentielles (*e.g.* la papille optique, la macula).

Par analogie avec la terminologie anglaise, nous allons employer à présent le terme "scan" pour évoquer la zone balayée par la sonde échographique, l'apposition de "A-" ou "B-" permettant de faire la distinction avec le mode employé pour sa réalisation.

Les différents types de scan pour l'observation du segment postérieur s'obtiennent soit en appliquant la sonde sur la cornée (voie transcornéenne), soit sur la sclère (voie transclérale); ils peuvent être axiaux, transverses ou longitudinaux (voir Figs. 1.18 et 1.19).

Le couplant acoustique employé peut être soit un gel appliqué préalablement sur le nez de sonde, soit un liquide (eau, solution physiologique) contenu au moyen d'une cupule. On

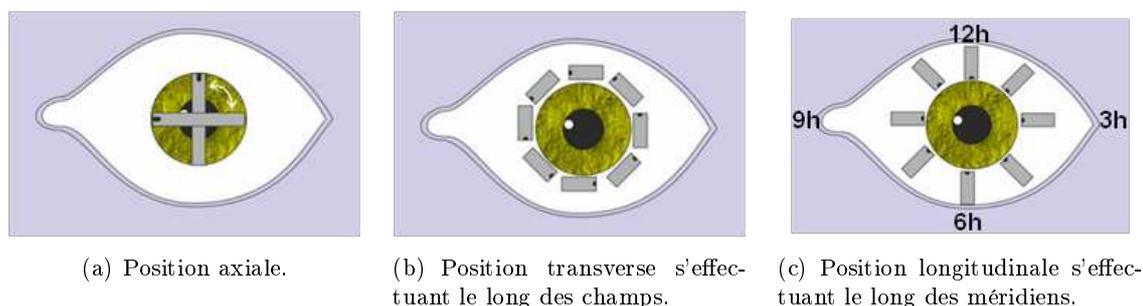
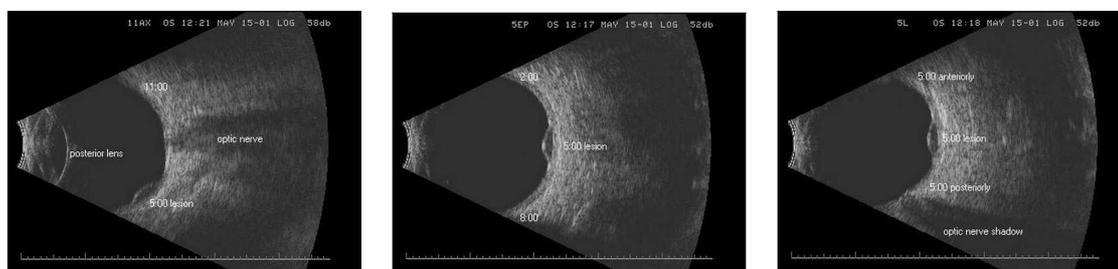


FIGURE 1.18 – Positionnement de la sonde échographique pour les différents types de scan en mode-B.

parle respectivement de technique d'examen contact et immersion.



(a) B-scan axial laissant apparaître le mélanome à 5H. La face postérieure du cristallin est centrée, à gauche du B-scan, de même que le nerf optique sur la droite. (b) B-scan transverse du même mélanome. Le fait que la coupe suivant un cadran s'étendant de 2H (haut) à 8H (bas) indique que le scan s'est effectué du côté nasal. (c) B-scan longitudinal offrant une vue antéro postérieure du même mélanome, situé au centre, à droite du scan. Le nerf optique est visible sur quadrant inférieur.

FIGURE 1.19 – B-scans d'un même mélanome choroïdien, vue sous des coupes différentes. "B-scan Ocular Ultrasound" [Waldron et al., 2012]

Position transcornéenne Bien que ce type de positionnement ne soit pas le plus pratiqué ni le plus agréable du fait de la sensibilité de la cornée, il est néanmoins d'un intérêt majeur car il délivre des informations sur les structure oculaires du fond de l'œil les plus essentielles.

B-scan axial Les B-scan axial est particulièrement utile dans l'évaluation du cristallin et de certaines maladies affectant le nerf optique, l'espace de tenon et la macula.

Pouvant être horizontal, vertical ou oblique, le B-scan axial s'obtient en positionnant la sonde sur la cornée (au centre) de façon à ce que le pôle postérieur du cristallin soit aligné avec le nerf optique [Sandra Frazier Byrne, 2002]. Le B-scan horizontal est le plus utile puisqu'il permet l'observation conjointe de la macula et du nerf optique.

Il est important de préciser que le B-scan axial tel que défini pour l'imagerie en mode-B du segment postérieur diffère de celui que l'on réalise en mode-A. En effet, le A-scan axial



FIGURE 1.20 – Position de la sonde lors d'un scan transcornéen axial vertical.

est quant à lui aligné avec la macula et non le nerf optique et ceci en vue de mesurer la longueur axiale de l'œil.

B-scans para-axial La réalisation d'un B-scan para-axial peut être utile dans l'évaluation de la région péri-papillaire du fond de l'œil, c'est-à-dire directement adjacente au nerf optique. Ce type de scan est obtenu en plaçant la sonde face à la cornée comme pour le scan axial, en revanche, la sonde n'est pas orientée vers le nerf optique mais vers une zone péri-papillaire d'intérêt. Les scans para-axiaux sont essentiels dans l'obtention des dimensions précises de lésions péri-papillaires de masse. Ils sont également utiles dans la localisation de la macula, la sonde étant alors orientée le long de l'axe visuel, de la même façon que pour un examen biométrique en mode-A. La dénomination de ce type de scan varie en fonction de la position de la sonde US. En position horizontale (marqueur de la sonde orienté nasalement), le scan sera dénommé HMAc et le nerf optique apparaîtra légèrement décentré vers la gauche (côté nasal) [Sandra Frazier Byrne, 2002]. En position verticale, le marqueur de la sonde pointe vers midi et le scan est dénommé VMAC [Sandra Frazier Byrne, 2002]. Le nerf optique n'est pas visible sur ce type de scan.

Bien que permettant l'observation de structures essentielles de l'anatomie oculaire, les B-scans transcornéens - qu'ils soient axiaux ou para-axiaux - ne délivrent pas une image du fond de l'œil aussi résolue que les B-scans transcléaux. En effet, contraste et résolution spatiale sont compromis par les importantes atténuation et réfraction induites par la propagation des ultrasons au travers du cristallin [Sokollu, 1968], [Lizzi *et al.*, 1970], [Joel K. Shugar, Eugene de Juan Jr., Brooks W. McCuen II, James Tiedeman, Maurice R. Landers III, 1986]. A cette dégradation s'ajoute une distorsion des structures postérieures au cristallin. Les ophtalmologues recommandent en conséquence d'éviter le cristallin si possible. Ces altérations se retrouvent également, parfois en plus accentuées, chez les personnes dotés d'IOL (pseudo-phaque) où en fonction du matériau de l'IOL, des effets de réverbérations peuvent apparaître (échos de répétition sur le B-scan).

Nous reviendrons sur ces effets - au cœur de ce travail de thèse - dans le chapitre suivant.

Position transclérale Les B-scans transcléraux sont généralement pratiqués en première intention pour effectuer un balayage dynamique du segment oculaire postérieur en cas de trouble des milieux. Ils sont en conséquence les plus pratiqués cliniquement et s'effectuent après administration d'un anesthésiant. On distingue les scans longitudinaux (le long des méridiens) des scans transverses (le long des champs); deux exemples sont illustrés sur la figure 1.21.

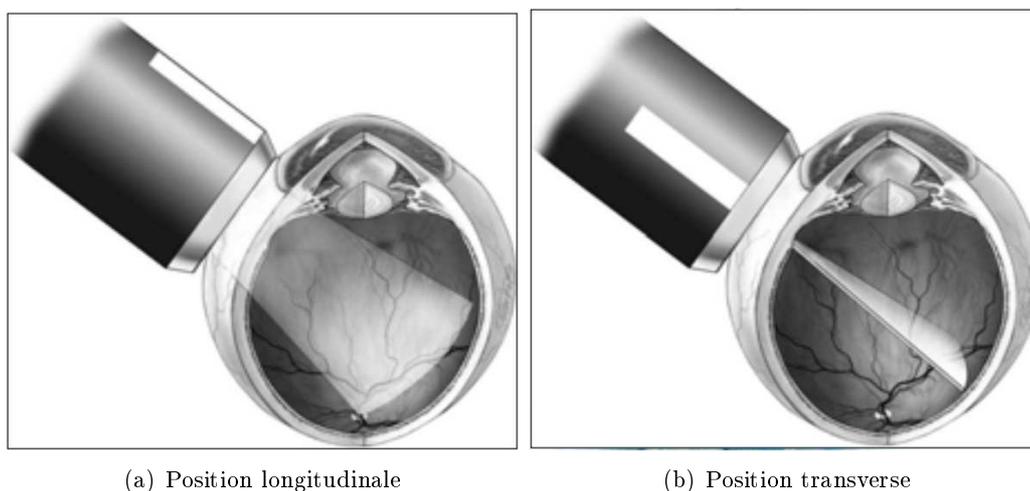


FIGURE 1.21 – Les deux types de scans transcléraux

A l'instar des scans transcornéens, ils permettent de visualiser le disque optique ou la macula. Bien qu'ils ne bénéficient pas d'une vue en incidence normale, les ophtalmologues y ont tout de même recours préférentiellement en cas de cataracte prononcée ou en présence d'IOL. Le scan longitudinal est alors privilégié par rapport au transverse car il permet la visualisation conjointe de la macula et d'une portion du nerf optique, incluant sa papille.

En pratique, la sonde est placée sur la conjonctive, en périphérie de la cornée et le patient est sollicité pour effectuer les mouvements oculaires permettant d'obtenir les scans désirés. L'exploration se réalise suivant les méridiens ou les champs (Fig. 1.18).

Les méridiens (Fig. 1.18(c)) sont des cercles imaginaires passant par les pôles et numérotés comme un cadran horaire. Ainsi une sonde placée à 3h sera placée en position horizontale et du côté nasal sur l'œil droit et temporal sur le gauche. Les champs (Fig. 1.18(b)) sont perpendiculaires aux méridiens et définissent une couronne au niveau de la limbe cornéenne. On distingue quatre champs principaux : nasal, temporal, supérieur (vers la tête) et inférieur (vers les pieds).

B-scan transverse La sonde est posée en contact avec la sclère, le long d'un champ pouvant se situer sur le limbe ou être plus proche de l'équateur, de façon à se trouver du côté opposé au cadran que l'on souhaite observer. Le scan transverse est ainsi désigné par la position horaire du centre de celui-ci, accompagné de l'appréciation de l'éloignement avec le limbe labellisé comme suit : P pour le pôle postérieur, EP pour équateur/postérieur, PE pour postérieur/équateur, E pour l'équateur, EA pour antérieur à l'équateur, O pour l'ora serrata et CB pour le corps ciliaire [Sandra Frazier Byrne, 2002]. Les scans transverses sont les scans transcornéens les plus réalisés. Ils permettent d'apprécier l'extension latérale

d'une pathologie sur approximativement un quart de cadran horaire (6h).

B-scan longitudinal Les scans longitudinaux, également dits radiaires, s'obtiennent en positionnant la sonde dans la direction d'un méridien (Fig. 1.18(c)). Les scans longitudinaux permettent d'apprécier l'étendue radiale d'une pathologie sur environ une heure et sont désignés relativement à la position horaire de la section imagée. Ainsi, si la sonde est placée à 3h, le plan imagé sera à 9h et le scan sera donc dénommé longitudinal de 3h, ou L3.

Le scan longitudinal est généralement utilisé en complément du scan transverse. Il est notamment utile dans la visualisation des tumeurs intraoculaires et de certaines déchirures rétiniennes postérieures (localisation d'un point de traction). Le scan longitudinal offre également un moyen pour l'évaluation du disque optique et son voisinage. Bien que ne permettant pas d'observer ces structures en incidences normale contrairement au scan axial, on l'utilise tout de même en pratique pour s'affranchir des effets néfastes provoqués par la traversée du cristallin.

L'examen échographique typique de l'œil en l'absence d'indication particulière comprend cinq scans : quatre transverses (les quatre cadrants) et un axial.

1.2.3 Le mode-A

Première application des ultrasons dans l'histoire de l'échographie médicale et plus particulièrement de l'ophtalmologie, le mode-A ou Amplitude se résume à un affichage mono dimensionnel de l'intensité ultrasonore reçue au cours du temps le long de l'axe de la sonde. Il est toujours utilisé de nos jours à des fins biométriques et/ou diagnostiques. On distingue ainsi deux types de mode-A utilisés en échographie ophtalmique : le mode-A biométrique et le mode-A quantitatif (standardized en anglais) [Byrne et Green, 2002]. Ces deux modes utilisent des transducteurs fonctionnant à des fréquences de travail légèrement différentes et ne reposent pas sur les mêmes algorithmes d'amplification.

1.2.3.1 Le mode-A biométrique

Ce mode est optimisé pour la mesure de la longueur axiale du globe oculaire. Il fonctionne avec une sonde de fréquence 10 à 12 MHz et une courbe d'amplification linéaire [Byrne, 1995]. La sonde doit être placée dans l'axe optique, en contact ou en immersion.

La célérité ultrasonore au sein des différentes structures oculaires traversées le long de l'axe visuel à température physiologique (35°C) étant bien établie, elle offre des mesures relativement précises [Oksala et Lehtinen, 1958].

L'échographie constituant à ses débuts l'un des seuls moyen d'exploration non invasif de l'œil, elle a rapidement été employée à des fins biométriques, et s'est progressivement imposée dans la mesure de la longueur axiale du globe. Celle-ci s'effectue dans l'axe visuel, depuis la face antérieure de la cornée jusqu'à l'interface vitréo-rétinienne au niveau maculaire (Fig. 1.22). Elle s'accompagne de la mesure de la profondeur de la chambre antérieure et postérieure, et de l'épaisseur du cristallin.

La mesure de la longueur axiale est utile d'une part dans le diagnostic des amétropies axiales mais surtout en prévision de la pose d'un implant intra-oculaire (IOL). La connaissance de la longueur axiale de l'œil constitue en effet, une information préopéra-

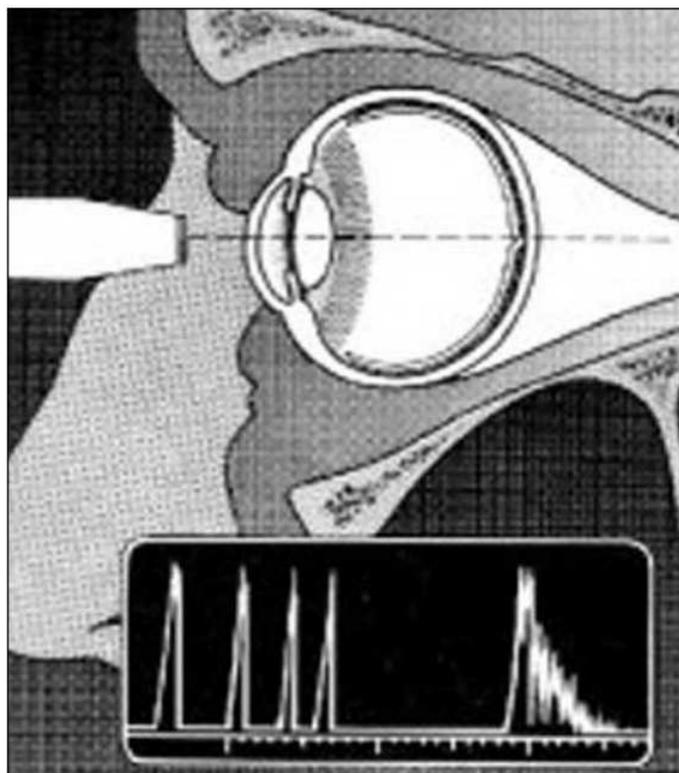


FIGURE 1.22 – Schéma d'un examen biométrique en mode-A et échogramme typique.

toire essentielle tant pour le positionnement de l'IOL que pour le calcul de son pouvoir dioptrique.

On distingue deux techniques biométriques en mode-A :

- par contact, dont la désignation courante est AUS (applanation ultrasound),
- par immersion, dont la désignation est IUS (immersion ultrasound).

La technique AUS est la plus répandue bien que responsable d'une moindre précision que l'IUS, puisque la longueur axiale observée peut être biaisée par la pression exercée sur la cornée par la sonde.

La mesure précise de la longueur axiale est très importante puisqu'elle fournit avec la kératométrie (mesure de l'astigmatisme cornéen) les deux principaux - parmi six au total - paramètres permettant le calcul de la puissance de l'implant [Olsen, 2007]. Les imprécisions sur la mesure de la longueur axiale sont reconnues comme étant la source majeure d'erreur réfractive post opératoire [Olsen, 2007]. En effet, une erreur de $100 \mu\text{m}$ dans la mesure de sa longueur conduira à un défaut de correction de 0.27δ [Olsen, 2007].

1.2.3.2 Le mode-A diagnostic

Le mode-A diagnostic ou quantitatif est un outil de diagnostic particulier développé par Ossoinig [Ossoinig, 1974] [Ossoinig *et al.*, 1979] dans l'objectif de faciliter la différenciation des différents tissus oculaires. La sémiologie qu'il a définie dans les années 70 est encore utilisée de nos jours, lorsqu'à l'issue d'un examen en mode-B une lésion intraoculaire ou orbitale est révélée. Ce mode utilise une sonde à 8 MHz et une courbe d'amplification en

forme de S. Ce type d'amplification est optimisé pour la différenciation des tissus oculaires, bénéficiant à la fois de la large gamme d'amplification logarithmique et de la sensibilité élevée de l'amplification linéaire. Il est standardisé de façon à ce que le pic d'un écho rétinien en incidence normale soit affiché à 100% de l'échelle d'intensité du A-scan. De même, les structures oculaires particulièrement denses comme la choroïde et la sclère vont également produire des échos dont le pic atteint 100%. Toutes les autres structures intra-oculaires de densités plus faibles afficheront des échos dont les pics seront inférieurs. Le niveau de réflectivité des pics observés permet d'identifier et d'évaluer des tumeurs intra-oculaires ou orbitales. Lorsque le mode-A standardisé est combiné au mode-B, on parle d'échographie quantitative. Il s'agit d'une méthode fiable dans l'évaluation des lésions oculaires basée sur la topographie, les propriétés quantitatives et cinétiques des intensités des échos [Ossoinig *et al.*, 1979] [Byrne, 1979] [Byrne, 1984]. L'échographie quantitative est également utile pour la différenciation des membranes vitréorétiniennes.

1.2.4 Imagerie du segment postérieur et de l'orbite

1.2.4.1 Le segment postérieur

La recherche de maladies vitréo-rétiniennes est l'indication la plus courante dans l'imagerie US du segment postérieur. Au delà de la possibilité de voir cette zone en cas d'opacité comme lors d'une hémorragie du vitré, l'imagerie US du segment postérieur fournit des informations uniques sur le fond de l'œil comparativement aux autres modalités d'imagerie [Green, 1987] [Nischal *et al.*, 1995b]. En particulier, elle permet l'identification, l'évaluation et le suivi d'un nombre important de pathologies du segment postérieur telles que les déchirures rétiniennes [DiBernardo *et al.*, 1992] [Jalkh *et al.*, 1983], les détachements du vitré ou de la rétine [Kerman et Coleman, 1978], [Sutherland *et al.*, 1975], [Blumenkranz et Byrne, 1982], [Zvornicanin *et al.*, 2012], les rétinoshisis, les détachements de l'épithélium pigmentaire rétinien [Silva et Brockhurst, 1976], les hémorragies sub-rétiniennes [Bloome et Ruiz, 1978], et des lésions disciformes (dystrophies rétiniennes) [Valencia *et al.*, 1994].

L'évaluation du fond postérieur se fait en suivant la méthodologie décrite au début de cette section. Tous les quadrants horaires de l'œil doivent être évalués pour ne manquer aucune pathologie. Les modes-A diagnostique et biométrique sont à présent fréquemment associés au mode-B.

Les sondes employées ont généralement une fréquence centrale de 10 MHz, parfois 20 MHz. Une sonde de 10 MHz dédiée à l'exploration du fond de l'œil est typiquement dotée d'un transducteur de 10 mm de diamètre focalisé à 30 mm soit un $F - number$ de 3 (ratio focale/diamètre transducteur). De telles caractéristiques offrent théoriquement - en milieu homogène - une résolution axiale de 150 μm et latérale de 450 μm à la focale, sur une profondeur de champ d'environ 9.6 mm.

1.2.4.2 L'orbite

L'échographie de l'orbite s'intéresse aux vaisseaux orbitaires (doppler), à la structure de la graisse orbitale, et à la glande lacrymale. L'atténuation et les aberrations de phase provoquées par la traversée de la graisse orbitale s'ajoutent à celles de la traversée de la sclère ou du cristallin, rendant l'exploration de la cavité orbitale difficile par ultrasons à haute fréquence, d'où l'emploi de fréquence allant de 6 à 13 MHz seulement. L'examen s'effectue

généralement de façon trans-palpébrale avec, comme couplant acoustique, du gel échographique. De nos jours, c'est principalement l'étude des écoulements sanguins qui subsiste dans la pratique clinique car les progrès de l'IRM et des scanners ont relégués l'échographie en mode-B au second plan dans l'évaluation de l'orbite [Lizzi et Coleman, 2004]. L'observation des écoulements sanguins orbitaux est de plus en plus souvent associé à des sondes US permettant un balayage tridimensionnel de la cavité. L'échographie orbitale reste tout de même d'un intérêt notable pour le guidage de l'anesthésie du globe. Elle permet de voir la diffusion de l'anesthésique - anéchoïque - au niveau du cône musculaire rétro-bulbaire mais surtout de guider le positionnement de l'aiguille afin d'éviter toute déformation voire perforation du globe. Enfin, elle fournit un moyen d'observer le diamètre de la gaine du nerf optique (ONSD pour optic nerve sheath diameter en anglais), diamètre connu pour être reliée à la pression intracrânienne [Whiteley *et al.*, 2014]. Elle constitue à ce titre un moyen de dépistage non invasif de l'hypertension intracrânienne.

1.2.5 Imagerie du segment antérieur

1.2.5.1 Technique d'immersion

L'imagerie du segment antérieur par technique d'immersion consiste à placer une sonde US - dédiée ordinairement à l'exploration du fond de l'œil - à plusieurs millimètres de la cornée de façon à rapprocher sa distance focale (environ 20 mm) du segment antérieur. Le couplage acoustique n'est alors plus assuré par un gel échographique mais par une solution saline équilibrée. Celle-ci est maintenue en contact avec la surface oculaire au moyen d'un cylindre ou d'un entonnoir sans fond épousant la forme de l'œil écarquillé. Un tel "récipient" limite l'inclinaison de la sonde US, c'est pourquoi cette technique est essentiellement utilisée de nos jours pour visualiser l'ora serrata, structure trop postérieure pour être visualisée correctement par biomicroscopie ultrasonore.

1.2.5.2 La biomicroscopie ultrasonore - UBM

L'échographie de très haute fréquence appliquée au segment antérieur a été pratiquée pour la première fois au début des années 90 par Charles Pavlin. Ce dernier a alors introduit le terme biomicroscopie ultrasonore (UBM) et démontré son intérêt pour le diagnostic du glaucome et de tumeurs irido-ciliaires [Pavlin *et al.*, 1991].

L'UBM repose sur l'emploi de sondes échographiques de fréquence supérieure ou égale à 35 MHz dotée d'une focalisation courte - comparativement aux sondes du segment postérieur et de l'orbite - comprise entre 10 et 12 mm, de façon à obtenir une meilleure résolution sur le segment antérieur et en particulier au niveau et derrière l'iris.

Une sonde UBM de 50 MHz typique est constituée d'un transducteur de 6 mm de diamètre focalisé à 12 mm soit un $F - number$ de 2 (ratio focale/diamètre transducteur). De telles caractéristiques offrent théoriquement - en milieu homogène - une résolution axiale de 30 μm et latérale de 60 μm à la focale, sur une profondeur de champ d'environ 0.85 mm.

La résolution des appareils UBM est inférieure à la résolution des tomographes à cohérence optique du segment antérieur (AS-OCT) récents mais l'avantage de l'échographie est son très haut pouvoir de pénétration à travers les tissus opaques offrant notamment une très bonne visualisation des procès ciliaires, quelque soit la pigmentation de l'iris.

1.2.6 Les ultrasons face aux autres modalités dans la pratique ophtalmologique

1.2.6.1 Dans la biométrie oculaire

La biométrie oculaire est une vaste discipline dans laquelle interviennent de nombreuses modalités, essentiellement optiques. La biométrie oculaire s'intéresse à la mesure de dimensions variées, pour les besoins de la chirurgie réfractive, de la chirurgie de la cataracte (calibration IOL), de l'identification du glaucome ou encore de certaines malformations (mégacornéa). Parmi les principales dimensions mesurées, on trouve la longueur axiale, l'épaisseur de la cornée (pachymétrie), les dimensions du cristallin (phakométrie), la courbure de la cornée (kératométrie), l'angle irido-cornéen (goniométrie).

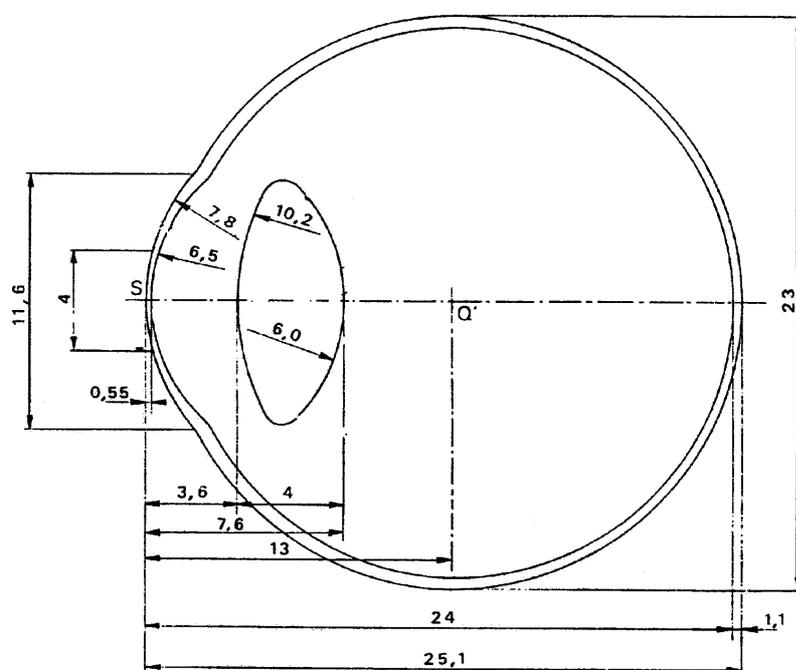


FIGURE 1.23 – Dimensions moyennes d'un œil emmétrope (dimensions en mm).

Kératométrie La kératométrie se mesure exclusivement à l'aide d'un appareil optique, l'ophtalmomètre. Par la mesure des variations de courbure cornéenne, elle permet de déduire la valeur de l'astigmatisme cornéen, valeur qui intervient de façon significative dans le calcul de la puissance d'un implant intraoculaire. La kératométrie est également effectuée fréquemment pour l'adaptation des lentilles de contact [Rajabi *et al.*, 2011].

Pachymétrie La pachymétrie permet la mesure précise de l'épaisseur de la cornée dont la connaissance est déterminante pour la chirurgie réfractive (correction de l'amétropie par photoablation laser) et la mesure de la pression intraoculaire (tonométrie). Plusieurs

modalités telles l'OCT spectral ou le topographe cornéen permettent sa mesure mais c'est le pachymètre à ultrasons, précisément à l'aide de l'UBM, qui est utilisé de façon privilégiée.

Angle iridocornéen Difficilement accessible par la lampe à fente, la mesure de l'angle irido-cornéen se fait traditionnellement à l'aide d'un instrument optique, le goniomètre. Cependant, ces dernières années ont vu l'émergence de l'UBM et de l'OCT du segment antérieure qui permettent une analyse morphologique plus détaillée de cet angle, en autorisant la visualisation du site d'insertion de l'iris et de sa forme. Ces deux techniques offrent en plus la possibilité de mesurer la profondeur de la chambre antérieure. Grâce à sa capacité à visualiser les structures en arrière de l'épithélium pigmenté irien - contrairement à l'OCT - l'UBM constitue l'examen de référence pour le diagnostic du syndrome d'iris plateau [?].

Longueur axiale Première application médicale de l'échographie ophtalmique, la biométrie ultrasonore, et plus particulièrement, la mesure de la longueur axiale, est cependant menacée de nos jours par une technique optique apparue récemment : l'interférométrie à cohérence partielle (PCI). Cette technique s'emploie également sous le nom de laser doppler interferometry. Elle offre une résolution bien meilleure et limite significativement les imprécisions sur la mesure de la longueur axiale et par conséquent contribue à un meilleur ajustement du pouvoir dioptrique des implants intraoculaires. En effet, si les ultrasons offrent une précision de $100 \mu m$, ce qui correspond à une imprécision de correction de 0.28δ , la PCI atteint une précision de $30 \mu m$, soit moins de 0.1δ d'erreur de correction réfractive.

Bien que l'emploi des ultrasons soit toujours utile et nécessaire en cas de cataracte avancée ou d'opacification quelconque, la PCI est devenue, en l'absence de trouble des milieux, la technique de référence.

Phakométrie La phakométrie est une technique de mesure des rayons de courbure antérieur et postérieur du cristallin. Bien que pouvant s'effectuer par échographie, les deux techniques privilégiées de nos jours pour sa mesure, sont l'imagerie Scheimpflug et l'imagerie de Purkinje [Rosales *et al.*, 2006].

L'avantage de cette dernière est la possibilité d'effectuer des mesures alors que l'œil est entrain de fixer une cible, ce qui est utile pour observer les variations de la géométrie cristallinienne lors de l'accommodation. Les images de Purkinje également dénommées images de Purkinje-Sanson se forment des réflexions liées au changement d'indice que l'on observe au niveau des 4 dioptries de l'œil humain. Elles sont donc au nombre de quatre, chacune renseignant sur la géométrie (courbure) du dioptré dont elle est issue. Ainsi, la troisième image renseigne sur la courbure antérieure du cristallin et la quatrième sur sa courbure postérieure. Bien que populaires ces deux techniques présentent l'inconvénient de nécessiter une dilatation pupillaire ce qui est connu pour perturber le processus d'accommodation [Beers et Van Der Heijde, 1996].

Bien que les techniques optiques aient pris le pas, l'échographie a déjà démontré, par le passé, son intérêt dans la phakométrie et notamment dans l'étude du processus d'accommodation [Beers et Van Der Heijde, 1996].

1.2.6.2 Dans le diagnostique

Au niveau du segment antérieur, la biomicroscopie ultrasonore se révèle être une alternative de plus en plus prometteuse face à sa principale concurrente, l'imagerie par tomographie optique cohérente du segment antérieur (AS-OCT). Bien que d'une résolution inférieure, elle permet d'atteindre des zones inaccessibles optiquement qui la rende unique et nécessaire. Ainsi, elle est la seule à offrir une observation des procès ciliaire et de la chambre postérieure. Par conséquent, seule l'imagerie par UBM peut-être utilisée après la pose d'un IOL de chambre postérieure pour vérifier son bon emplacement, notamment au niveau de ses haptiques (extensions de l'IOL permettant son positionnement). En revanche, la pachymétrie cornéenne sera plus précise à l'AS-OCT. L'UBM s'avère également déterminante dans le diagnostique de certains glaucomes, notamment ceux invoquant une position antérieure des procès ciliaires (iris plateau quand il est associé à une fermeture de l'angle irido-cornéen). Enfin, l'UBM est, grâce à sa plus grande profondeur d'exploration, clairement plus avantageuse que l'AS-OCT dans le diagnostique des tumeurs de l'iris ou du corps ciliaire. La technologie UBM a finalement trouvé sa place dans la pratique ophtalmologique, en s'avérant complémentaire de l'AS-OCT.

1.2.6.3 Axes de développement

Actuellement, la limite essentielle de l'échographie oculaire réside en l'utilisation de transducteurs mono-éléments. Ces transducteurs, bien qu'offrant à haute fréquence une résolution spatiale élevée autour de la focale, sont limités par une profondeur de champ restreinte, particulièrement préjudiciable à l'imagerie du fond de l'œil.

Il est théoriquement possible de s'affranchir de cette limitation par l'emploi de sondes multi-éléments, dont la disponibilité récente sur le marché, à des fréquences pertinentes pour l'exploration du fond de l'œil (autour de 20 MHz), annonce cette technologie comme étant la voie de développement futur de l'échographie oculaire [Silverman, 2009].