

Anatomie de la papille optique et des fibres optiques rétiniennes

Anatomy of the optic papilla and retinal optic fibres

A. Labbé

Mots-clés :

Papille
Fibres nerveuses rétiniennes
Lame criblée

Keywords:

Papilla
Retinal nerve fibers
Cribriform plate

La papille ou tête du nerf optique représente un support structurel mais aussi fonctionnel pour l'ensemble des axones des cellules ganglionnaires rétiniennes. Elle peut être divisée au niveau histologique en quatre régions : la couche des fibres nerveuses rétiniennes, la portion prélaminaire, la portion laminaire ou lame criblée, et la portion rétrolaminaire. La région laminaire correspond à la lame criblée dont la fonction principale est de permettre le passage des fibres nerveuses rétiniennes et des vaisseaux centraux de la rétine au travers du canal scléral, tout en préservant ces structures du gradient de pression entre les espaces intra- et extraoculaires.

© 2016 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

The papilla or the optic nerve head represents a structural as well as functional support for all the axons of the retinal ganglionic cells. It can be divided histologically into four regions: the retinal nerve fiber layer, the prelaminar section, the laminal section or lamina cribrosa, and the retrolaminar section. The laminal region corresponds to the cribriform plate whose principal function is to enable the passing of the retinal nerve fibers and the central vessels of the retina through the scleral canal, while protecting these structures from the pressure gradient between the intra- and extraocular spaces.

© 2016 Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

Plan

■ Anatomie de la papille et des fibres nerveuses rétiniennes	1
Embryologie	1
Anatomie macroscopique de la papille	2
Anatomie microscopique de la papille et des fibres nerveuses rétiniennes	4
■ Vascularisation de la tête du nerf optique	6
Artères ciliaires	7
Artère centrale de la rétine	7
Vascularisation de la papille et des fibres nerveuses rétiniennes	8
Drainage veineux	8
Microarchitecture vasculaire	8

■ Anatomie de la papille et des fibres nerveuses rétiniennes

Le nerf optique peut être divisé en une partie intraoculaire qui comprend la couche des cellules ganglionnaires rétiniennes (CGR), la couche des fibres nerveuses rétiniennes et la papille (ou tête du nerf optique – TNO), et une partie rétrobulbaire qui comprend la portion intraorbitaire, la portion intracanaliculaire dans le canal optique et la portion intracrânienne qui aboutit au chiasma puis au tractus optique jusqu'au corps géniculé latéral [1]. La papille est un support structurel et fonctionnel pour l'ensemble des axones des CGR qui la traverse.

Embryologie

L'embryogenèse aboutit à la mise en place des trois tissus fondamentaux de l'embryon : l'ectoblaste, le mésoblaste et l'entoblaste. Le développement de l'appareil visuel fait appel à deux de ces feuillets : l'ectoblaste pour la rétine, le nerf optique et le cristallin, et le mésoblaste pour les parois du globe oculaire et une grande partie des annexes [1-3].

La vésicule optique primitive, qui est une évagination du tube neural, est la première structure oculaire qui apparaît à partir de la troisième semaine de gestation (Fig. 1). L'extension progressive des cellules neuroectodermiques forme une dépression centrale puis s'invagine sur elle-même pour former la vésicule optique secondaire ou cupule optique (Fig. 1) [1-3, 5]. Cette cupule optique reste reliée au diencephale par le pédoncule optique, futur nerf

optique. La papille optique, encore virtuelle, se situe à la jonction entre le pédoncule et la vésicule optique [1-3, 5]. Simultanément, le pédoncule optique s'allonge et s'invagine, créant ainsi une rainure centrale inférieure sur toute sa longueur jusqu'à la partie inférieure de la cupule optique antérieure. Vers la quatrième semaine, par cette fente ou fissure embryonnaire pénètre l'artère hyaloïdienne, future artère centrale de la rétine. La fente embryonnaire commence à se fermer à partir de la cinquième semaine de gestation et s'achève à la septième semaine par l'extension et l'accolement des deux feuillets cellulaires constituant la vésicule et le pédicule optique ; l'artère hyaloïdienne est alors incluse dans le futur nerf optique [1-3, 5]. Le feuillet cellulaire externe unistratifié correspond à l'ébauche de l'épithélium pigmentaire et le feuillet interne, qui formera une couche multistratifiée, correspond à l'ébauche de la rétine neurosensorielle (Fig. 1) [1-3, 5]. L'absence de fermeture de la fente embryonnaire est ainsi responsable d'un colobome choroïdier-tinien toujours situé dans la partie inférieure du globe oculaire [2].

Parallèlement au développement du pédoncule optique, les cellules se divisent et migrent dans la couche interne de la cupule optique pour donner la future rétine. Les premières cellules à se différencier sont les futures cellules ganglionnaires de la rétine et les cellules de Müller [1]. Entre la cinquième et sixième semaine, les CGR développent des axones qui convergent vers la papille primitive et formeront la couche des fibres nerveuses rétiniennes [1, 3]. Ces axones atteignent la papille primitive vers la septième semaine et le cerveau primitif, en formant le futur chiasma optique, entre les septième et huitième semaines. À partir de la septième semaine se forme également le futur système glial du nerf optique lorsque les cellules du feuillet interne du pédoncule optique se différencient en glioblastes et se multiplient en rangées longitudinales parallèles aux axones du nerf optique [1]. Les cellules du feuillet externe forment le manchon glial périphérique. La gaine du nerf optique se différencie en dure-mère, pie-mère et arachnoïde vers les 13^e et 14^e semaines [1].

Au niveau de la TNO primitif, la lame criblée se développe après l'apparition des axones des cellules ganglionnaires et de l'artère hyaloïdienne qui constitueront son futur contenu [1, 3]. Ainsi, vers la huitième semaine, les cellules gliales provenant du feuillet externe du pédoncule optique viennent former un réseau provisoire autour des axones des cellules ganglionnaires, puis une vascularisation apparaît vers les 13^e et 14^e semaines. Ce réseau est ensuite renforcé par des cellules mésenchymateuses vers le quatrième mois. La lame criblée est considérée comme une structure mature vers le septième mois. Elle est séparée des cellules sclérales qui l'entourent par un feuillet continu de cellules gliales qui apparaît vers la neuvième semaine. De même, à partir de la

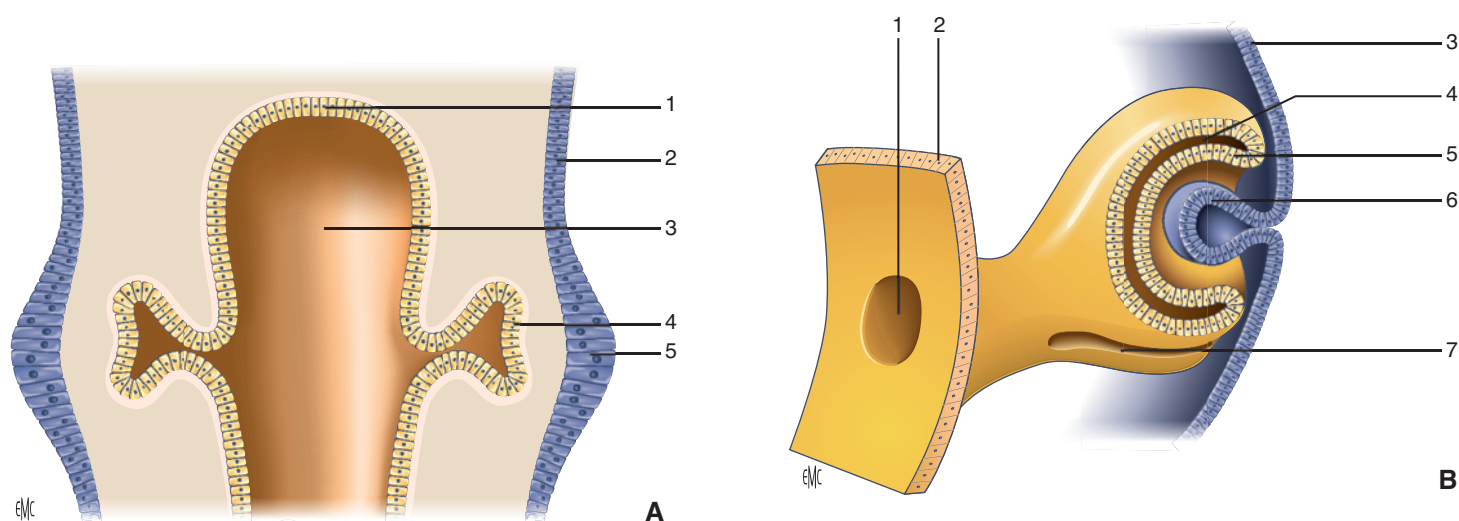


Figure 1. Coupes schématisques de la vésicule optique (A) et de la cupule optique (B) (d'après [4]).

A. 1. Tube neural ; 2. épiblaste ; 3. diencéphale ; 4. vésicule optique primaire.

B. 1. Lumière du pédicule optique ; 2. diencéphale ; 3. ectoderme ; 4. couche cellulaire interne de la cupule optique ; 5. couche cellulaire externe de la cupule optique ; 6. vésicule cristallinienne ; 7. fente foetale primitive.

huitième semaine, l'artère hyaloïdienne est recouverte de cellules gliales qui prolifèrent et forment une structure conique autour de l'artère appelée papille de Bergmeister. L'importance de l'atrophie de ces cellules et du système hyaloïdien avant la naissance pourrait ainsi influencer la surface et le volume de la future excavation papillaire [1, 3].

La myélinisation se fait de la partie proximale jusqu'à la partie distale du nerf optique. Elle se développe ainsi près du chiasma vers le septième mois et s'achève à la lame criblée approximativement un mois après la naissance [1].

Anatomie macroscopique de la papille

On distingue plusieurs éléments lors de l'analyse de la papille : de dedans en dehors, l'excavation au centre, puis l'anneau neurorétinien, l'anneau scléral péripapillaire et enfin la zone parapapillaire (Fig. 2) [1, 5].

Dimensions et forme

La taille de la papille est très variable d'un individu à l'autre, mais également entre les deux yeux d'un même individu. Une asymétrie de taille entre les deux papilles d'un même individu est ainsi observée dans approximativement 10 % de la population normale [6, 7]. En mesurant directement la taille de la TNO sur plus de 100 yeux énucléés, le diamètre minimal moyen était de $1,67 \pm 0,72$ mm, le diamètre maximal moyen de $1,92 \pm 0,32$ mm et la surface moyenne de $2,59 \pm 0,72$ mm² (de 0,68 à 4,42 mm²) [8]. Dans une vaste étude clinique basée sur l'analyse photographique de la taille de la papille, Jonas et al. ont retrouvé un diamètre vertical moyen de $1,92 \pm 0,29$ mm (0,96 à 2,91 mm) et un diamètre horizontal moyen de $1,76 \pm 0,31$ mm (0,91 à 2,61 mm) [7, 9]. Ces mêmes auteurs ont montré que la surface moyenne de la papille était de $2,69 \pm 0,70$ mm² (0,80 à 5,54 mm²), avec une distribution gaussienne et une variabilité interindividuelle de 1 à 6,8 [7, 10]. Les mesures de taille de la papille et de l'excavation sont différentes en fonction des appareils utilisés ; ainsi, dans une population adulte de sujets normaux, la surface de la papille est mesurée entre 2,29 et 3,09 mm² sur des stéréophotographies, et entre 1,60 et 2,63 mm² en tomographie par cohérence optique (OCT) [11].

La plupart des papilles ont une forme plus ou moins ovalisée à grand axe vertical, le diamètre vertical étant plus grand que le diamètre horizontal d'approximativement 7 à 10 % [7, 9]. Les très grands nerfs optiques sont appelés macrodisques et les très petits nerfs optiques sont appelés microdisques. En considérant la



Figure 2. Papille normale de l'œil gauche.

surface de la papille, les macrodisques sont des papilles dont l'aire est supérieure à 4,09 mm² et les microdisques sont les papilles dont la surface est inférieure à 1,29 mm². Ces deux extrêmes correspondent à environ 2 % de la population générale [7, 9]. Les macrodisques primitifs peuvent être asymptomatiques (grande papille physiologique) ou symptomatiques, avec des anomalies morphologiques ou fonctionnelles comme un colobome papillaire, une fossette ou encore un *morning-glory syndrome* [7].

Excavation papillaire

L'excavation papillaire correspond à la portion centrale de la TNO dépourvue de fibres nerveuses rétiniennes. Comme pour la taille de la papille, la taille de l'excavation est aussi une donnée variable dans la population [11]. La surface de l'excavation est le paramètre le plus souvent mesuré, avec une surface moyenne comprise entre 0,53 et 1,40 mm² (de 0,00 à 3,07 mm²) [7]. Dans une population de sujets normaux, le diamètre horizontal moyen de l'excavation a été mesuré à 0,83 ± 0,58 mm (0,00 à 2,08 mm) alors que le diamètre vertical moyen mesurait 0,77 ± 0,55 mm (0,00 à 2,13 mm) [7]. L'excavation normale est ovale horizontalement, soit l'inverse de ce qui est observé au niveau du disque optique dont le diamètre vertical est le plus grand [10]. Il existe une corrélation entre la taille de la papille et celle de l'excavation, les grandes papilles ayant également de grandes excavations [7, 11]. Cela est un élément important de l'analyse clinique du nerf optique puisqu'il n'y a normalement pas d'excavation dans les petites papilles (1,6 à 1,8 mm²) [7].

Le rapport C/D correspond au rapport entre le diamètre de l'excavation (C pour *cup*) et le diamètre de la papille (D pour *disc*). Compte tenu de la forme de la papille et de son excavation, le rapport C/D est habituellement plus grand dans son diamètre horizontal que vertical [7]. À l'image de la papille et de l'excavation, le rapport C/D montre également de très grandes variations interindividuelles allant chez les sujets normaux de 0 jusqu'à 0,84 [7]. Un rapport C/D élevé est donc considéré comme physiologique dans les grandes papilles alors qu'une excavation moyenne doit être considérée comme pathologique dans une petite papille [9]. Dans une étude portant sur 139 sujets normaux, il a été observé une différence de C/D supérieure à 0,3 entre les deux yeux chez 1 % des sujets, supérieure à 0,2 chez 4 % et une différence supérieure à 0,1 chez 16 % des patients [7]. Une asymétrie de rapport C/D supérieure à 0,2 entre les deux papilles d'un même individu est habituellement considérée comme un élément pathologique. Néanmoins, cet élément ne peut être interprété qu'en comparant la taille des papilles afin d'éliminer une asymétrie de taille responsable de l'asymétrie du rapport C/D.

Anneau neurorétinien

L'anneau neurorétinien est la partie essentielle de la papille car il correspond aux axones des CGR. Comme pour la taille de la papille, la surface de l'anneau neurorétinien est très variable entre les individus et selon les méthodes de mesure utilisées. Dans une étude sur photographies du nerf optique d'une population normale, Jonas et al. avaient retrouvé des mesures normales allant de 0,80 à 4,66 mm², avec une mesure moyenne de 1,97 ± 0,50 mm² [6, 7]. La surface de l'anneau neurorétinien est néanmoins corrélée à la taille de la papille, une grande papille ayant un grand anneau neurorétinien et inversement [6].

L'anneau neurorétinien est en général plus large dans sa partie inférieure, suivie par sa partie supérieure, puis nasale et temporale [7], mais il existe de nombreuses variations physiologiques, notamment pour les papilles de grande et de petite tailles, ou encore les papilles disversiques. Cette forme de l'anneau neurorétinien peut s'expliquer par plusieurs facteurs :

- la distribution des fibres nerveuses rétiniennes dans le nerf optique ;
- la localisation de la fovéa légèrement inférieure par rapport au nerf optique ;
- la morphologie de la lame criblée, avec les pores les plus larges dans les régions inférieures et supérieures ;
- le diamètre des artérioles rétiniennes qui est plus grand au niveau de l'arcade inférotemporale [6, 9].

Anneau scléral péripapillaire et atrophie péripapillaire

L'anneau scléral péripapillaire, ou encore anneau scléral d'Elschnig, apparaît comme une ligne blanche circulaire. Il délimite la papille avec l'anneau neurorétinien en dedans et la zone péripapillaire en dehors. Il est plus visible chez les sujets porteurs d'une atrophie optique.



Figure 3. Papille avec une atrophie péripapillaire. La zone péripapillaire est habituellement séparée en deux zones : la zone périphérique ou zone alpha (flèche blanche) et la zone bêta qui est située entre la zone alpha et l'anneau scléral péripapillaire (flèche noire).

La zone péripapillaire peut être le siège d'une atrophie chorio-rétinienne qui est habituellement séparée en deux zones : la zone périphérique ou zone alpha (α) et la zone bêta (β) qui est située entre la zone α et l'anneau scléral péripapillaire (Fig. 3) [12]. La zone α correspond à un amincissement de la couche chorio-rétinienne péripapillaire et apparaît cliniquement comme une zone de pigmentation irrégulière [1, 13]. Elle est retrouvée avec une taille variable chez 83,9 % des yeux de sujets normaux [1]. La zone β correspond à une atrophie importante de l'épithélium pigmenté et de la choriocapillaire avec une visualisation accrue des vaisseaux choroïdiens et de la sclère adjacente à l'anneau scléral péripapillaire (Fig. 3) [1, 13]. La zone β est plus rare que la zone α car elle n'est retrouvée que dans approximativement 17 % des yeux [1, 11]. La surface de ces deux zones augmente avec l'âge et est corrélée à la taille de la papille [14]. Les deux zones α et β sont décrites chez les sujets normaux, chez les sujets glaucomateux ou encore chez les myopes. Grâce aux techniques d'imagerie les plus récentes comme l'OCT mais aussi en histologie, cette séparation de l'atrophie péripapillaire en deux zones α et β est maintenant discutée [15]. Il a ainsi été observé chez des yeux myopes, entre la zone β (caractérisée par la présence de la membrane de Bruch) et le bord du nerf optique, une zone appelée γ (gamma) composée simplement de la sclère et de la couche des fibres nerveuses rétiniennes. Une zone appelée δ (delta), présente uniquement chez les yeux très fortement myopes, correspondrait quant à elle à la partie centrale de la zone γ [15].

Variations morphologiques de la papille

Des différences dans la morphologie des papilles ont été observées en fonction de l'origine ethnique. Plusieurs études ont ainsi observé des papilles de plus grande surface avec de plus grandes excavations et un rapport C/D plus élevé chez les sujets d'origine africaine par rapport aux autres origines ethniques [11, 16]. La surface moyenne de la papille serait ainsi mesurée entre 1,84 et 2,50 mm² avec une excavation de 0,57 à 0,95 mm² chez les sujets d'origine africaine, entre 1,97 et 2,67 mm² avec une excavation de 0,47 à 0,93 mm² chez les sujets d'origine asiatique, et entre 1,65 et 2,34 mm² avec une excavation de 0,12 à 0,70 mm² chez

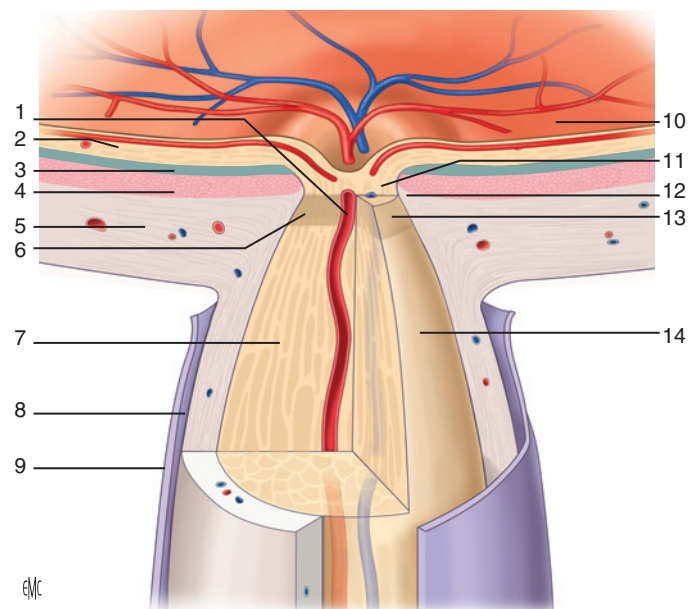


Figure 4. Papille et du canal scléral (d'après [4]). 1. Artère centrale de la rétine ; 2. rétine ; 3. épithélium pigmentaire ; 4. choroïde ; 5. sclère ; 6. lame criblée ; 7. fibres nerveuses ; 8. espace subarachnoïdien ; 9. dure-mère ; 10. papille ; 11. région prélaminaire ; 12. cercle artériel de Zinn-Haller ; 13. région laminaire ; 14. région rétrolaminaire.

les sujets d'origine caucasienne [11]. La surface de la papille serait ainsi 12 % plus large chez les sujets d'origine africaine par rapport aux sujets caucasiens [17].

Les résultats concernant l'existence de différences morphologiques entre les papilles des hommes et des femmes sont discordants [6]. Par ailleurs, dans les études retrouvant une différence, celle-ci était faible [16]. Dans la vaste étude épidémiologique Framingham Study qui portait sur plus de 10 000 sujets, il a néanmoins été retrouvé que les femmes avaient un rapport C/D horizontal et vertical plus petit que les hommes [18].

Des études ont montré qu'une myopie ou une hypermétropie faible (-5 à +5 dioptries) ne semblait pas influencer la taille du disque optique [7]. Néanmoins, en dehors de ces limites, la myopie forte serait associée significativement à des papilles de plus grande taille et les hypermétropies fortes à des papilles de plus petite taille [6, 11, 17, 19].

Avec l'âge, une diminution progressive du nombre de fibres nerveuses rétiniennes a été démontrée [6, 20, 21]. Ces résultats pourraient être corrélés à l'observation clinique de l'élargissement progressif du rapport C/D et de la diminution de la surface de l'anneau neurorétinien liés à l'âge, en dehors de l'existence d'un glaucome [6]. Néanmoins, ces résultats ne sont pas retrouvés de manière constante [22]. Enfin, l'âge ne semble pas être un facteur influençant la taille de la papille.

Anatomie microscopique de la papille et des fibres nerveuses rétiniennes

La papille ou TNO est une zone de transition à travers laquelle les axones des CGR quittent le globe oculaire pour former le nerf optique. La TNO peut être divisée au niveau histologique en quatre zones (d'avant en arrière) : la couche des fibres nerveuses rétiniennes, la portion prélaminaire, la portion laminaire ou lame criblée et la portion rétrolaminaire (Fig. 4, 5).

Couche des fibres nerveuses rétiniennes

La partie la plus antérieure de la TNO correspond à la couche des fibres nerveuses rétiniennes. Elle est constituée par les axones des cellules ganglionnaires dans leur transition de la rétine superficielle à la composition neuronale du nerf optique. Le nombre moyen de fibres nerveuses rétiniennes est estimé à 1 200 000, avec des variations chez les sujets normaux allant de 750 000 à



Figure 5. Coupe histologique d'une papille normale. Épaisseur prélaminaire (a), épaisseur totale de la lame criblée (b), distance entre la surface antérieure de la lame criblée et l'espace sous-arachnoïdien (c), distance entre la membrane limitante interne et l'espace sous-arachnoïdien (d), diamètre du nerf optique au niveau du canal scléral (e) et 1 mm en arrière de la lame criblée, épaisseur de la partie postérieure de la lame criblée (g). LC : lamina cribrosa ; PL : région prélaminaire ; PoL : région post-laminaire (d'après [23]).

1 500 000 axones [16, 20]. Le diamètre moyen des fibres nerveuses rétiniennes est approximativement de 1 μm (de 0,1 à 8,3 μm), avec des variations en fonction de leur localisation [1, 24]. Le diamètre des axones est ainsi significativement plus petit dans les régions temporales et internes du nerf optique que dans les régions nasales et externes [25, 26]. La variabilité du nombre de fibres nerveuses rétiniennes mais aussi la taille de la papille pourraient ainsi résulter du nombre de CGR créées pendant l'embryogenèse, et de leur régression jusqu'à la naissance.

L'organisation des axones des CGR est bien systématisée lors de leur passage au niveau de la papille. Les fibres provenant des cellules ganglionnaires les plus périphériques cheminent à proximité de la choroïde et pénètrent en périphérie de l'anneau neurorétinien, alors que les fibres provenant des cellules ganglionnaires proches de la papille cheminent proche du vitré et occupent une portion plus centrale dans la papille [27] (Fig. 6). Le nombre de fibres nerveuses rétiniennes est corrélé à l'âge, avec une perte physiologique de fibres nerveuses rétiniennes d'approximativement 5500 fibres par an [1, 28, 29], soit approximativement 0,3 % par an [20].

Région prélaminaire

La portion prélaminaire est située juste en arrière de la couche des fibres nerveuses rétiniennes. Histologiquement, la portion prélaminaire de la papille est constituée des fibres nerveuses rétiniennes, des vaisseaux rétiniens et de cellules gliales. Les axones représentent 90 % du tissu constituant la papille à sa partie superficielle [3]. Les astrocytes sont les cellules gliales principales de la portion prélaminaire et sont organisés de manière plane perpendiculaire aux axones des CGR. Ces cellules ont un rôle de support essentiel pour les axones des CGR, à l'image des cellules de Müller de la rétine [1]. Les astrocytes forment également une interface séparant les axones des tissus conjonctifs avoisinants [1]. La matrice extracellulaire de la région prélaminaire est différente de celle de la lame criblée ; elle contient du collagène de type IV, de la laminine, de la fibronectine et du collagène de type III, associés à la matrice extracellulaire de la paroi des vaisseaux sanguins [30].

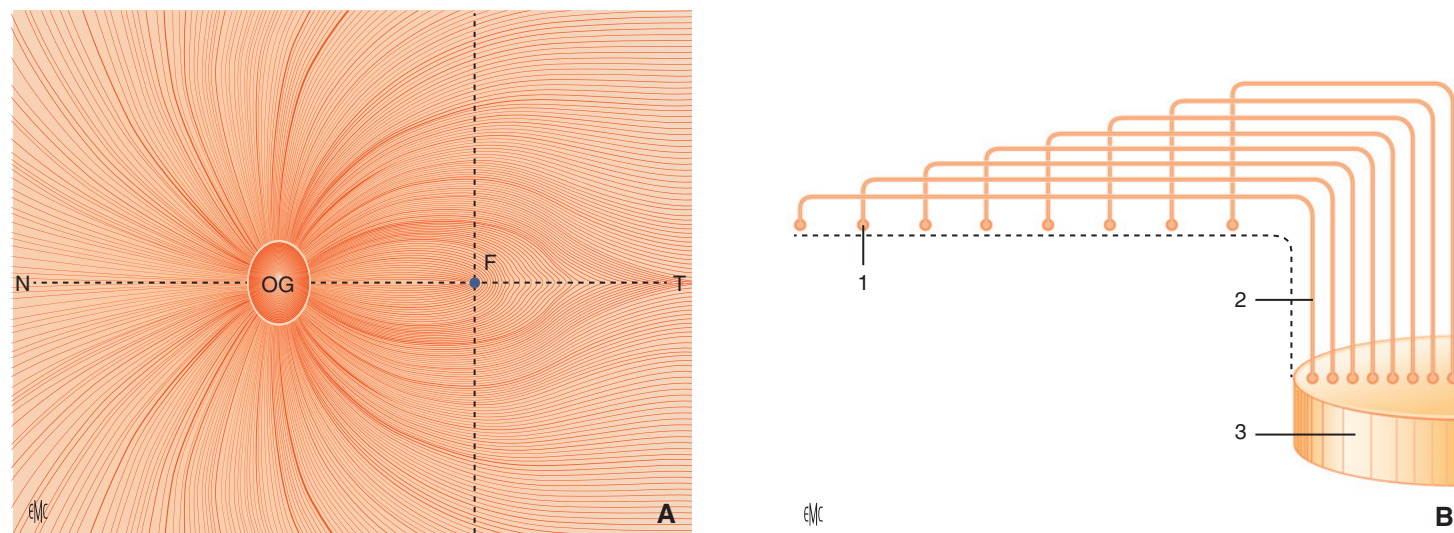


Figure 6. Disposition des axones des cellules ganglionnaires rétiniennes lors de leur passage au niveau de la tête du nerf optique (A, B). Les fibres provenant des cellules ganglionnaires les plus périphériques cheminent à proximité de la choroïde et pénètrent en périphérie de l'anneau neurorétinien alors que les fibres provenant des cellules ganglionnaires proches de la papille cheminent proche du vitré et occupent une portion plus centrale dans la papille (d'après [4]).
B. 1. Cellule ganglionnaire rétinienne ; 2. axone de la cellule ganglionnaire ; 3. tête du nerf optique.

Région laminaire ou lame criblée

La région laminaire correspond à la lame criblée ou lamina cribrosa ; elle est en continuité avec les parois du canal scléral [3]. La fonction principale de la lame criblée est de permettre le passage des fibres nerveuses rétiniennes et des vaisseaux centraux de la rétine au travers du canal scléral, tout en préservant ces structures du gradient de pression entre les espaces intra- et extraoculaires [1].

Morphologiquement, la lame criblée est légèrement incurvée, avec une concavité antérieure, ses couches internes communiquant avec le réseau glial prélaminaire et ses couches externes fusionnant avec les septums rétrobulbaires du nerf optique [1]. La lame criblée correspond à un tamis à plusieurs étages constitué par le tiers antérieur de la sclère postérieure [3]. Dans les yeux normaux, la lame criblée mesure approximativement 237 μm de hauteur [31]. Elle est composée de fibres de collagènes et élastiques qui s'entrecroisent en feuillets de tissus conjonctifs fenêtrés. Ces feuillets contiennent également des capillaires entourés par une membrane basale et quelques cellules d'aspect fibroblastiques appelées cellules de la lame criblée [31-33]. Ces lames de tissu conjonctif sont perforées par 200 à 400 orifices irréguliers de tailles variables (de 22,5 à 500 μm) [34] formant des canaux à travers lesquels les axones des cellules ganglionnaires passent (Fig. 7) [1, 31]. La taille de ces pores varie ainsi au niveau de la lame criblée : ceux-ci sont plus larges dans les parties inférieures et supérieures du nerf optique que dans les régions nasales et temporales [33]. Le nombre des pores de la lame criblée augmente en fonction de la profondeur au sein de la lame criblée : il sont ainsi plus nombreux au niveau de la partie profonde de la lame criblée [36]. Des orifices centraux plus larges permettent le passage de l'artère et de la veine centrale de la rétine. Les orifices de la lame criblée sont parfois observés au fond de l'excavation de la TNO. Les techniques d'imagerie nouvelles comme l'optique adaptative [37] ou encore l'imagerie en tomographie par cohérence optique *spectral domain* (OCT-SD) [38] (Fig. 8) permettent aussi de visualiser directement la lame criblée.

De composition différente de la matrice extracellulaire de la sclère, la matrice extracellulaire de la lame criblée est constituée de nombreuses fibres d'élastine, de collagène de types I, III et IV, de laminine et de protéoglycanes [30, 39]. Le corps des feuillets de la lame criblée contient de nombreuses fibres d'élastine, un réseau de membrane basale filamenteuse, et du collagène fibrillaire de types I et III [30]. L'organisation des fibres d'élastine de la lame criblée serait ainsi essentielle au rôle mécanique de protection des fibres nerveuses rétiniennes qui la traversent. Séparant le corps de ces feuillets cribliformes des astrocytes qui les entourent, on retrouve une couche bien définie et continue composée de collagène de type IV, de laminine et de protéoglycane [39]. Ces

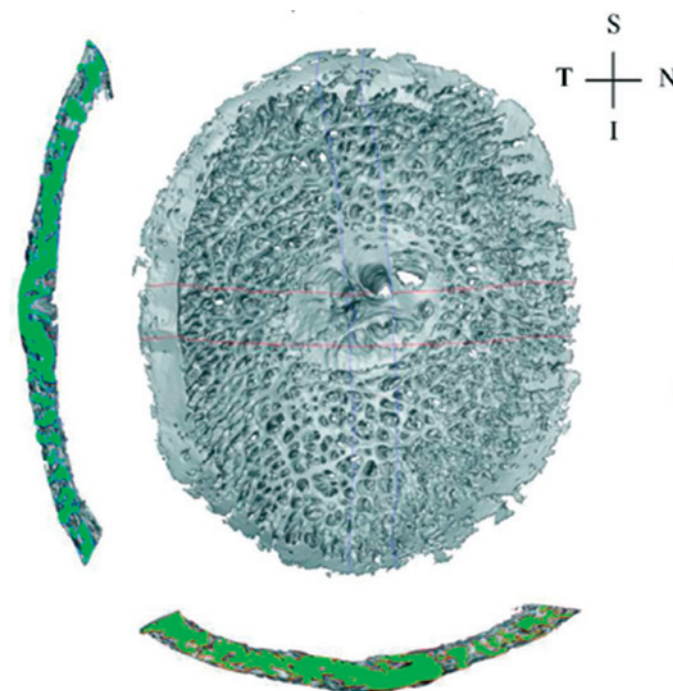


Figure 7. Reconstruction en trois dimensions du tissu conjonctif de la lame criblée chez le singe (d'après [35]). S : supérieur ; I : inférieur ; N : nasal ; T : temporal.

structures lamellaires, qui correspondent à la membrane basale des astrocytes, s'étendent de manière linéaire au sein du corps des feuillets cribliformes, formant ainsi un réseau de matériel filamenteux [32, 40]. La zone d'insertion de la lame criblée au niveau de la sclère contient des fibres élastiques disposées de façon concentrique circonférentielle, et arrangée de manière serrée autour des régions laminaires et prélaminaires de la TNO. Dans sa partie externe, la portion intralaminaire du nerf optique est recouverte par le tissu de Jacoby qui correspond à des couches verticales de tissu conjonctif et d'astrocytes entourant et séparant le nerf optique du tissu péripapillaire adjacent [1]. Les fibres élastiques de la lame criblée sont en continuité ou proviennent de ces fibres élastiques périphériques [30, 32, 40]. Les astrocytes de la lame criblée ont également des prolongements qui viennent s'insérer dans les fibres élastiques de la zone d'insertion et forment ainsi un

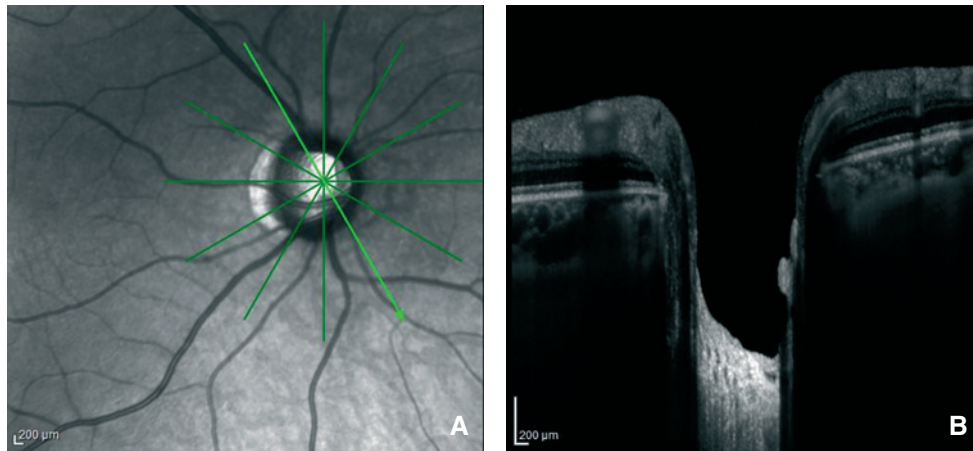


Figure 8. Image en tomographie par cohérence optique (OCT-EDI) de la papille et de la lame criblée (A, B).

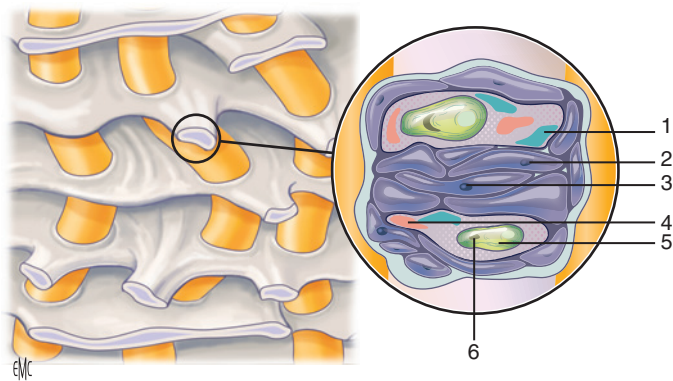


Figure 9. Représentation schématique d'une section de la lame criblée montrant les relations entre les astrocytes (2), le collagène (1), l'élastine (4), les cellules endothéliales (6), les membranes basales (5) et les fibres nerveuses adjacentes (3) (d'après [4]).

véritable ancrage [30]. Un autre composant important de la matrice extracellulaire de la lame criblée sont les protéoglycannes [30, 39]. Ces molécules seraient particulièrement importantes pour la fonction mécanique de soutien de la lame criblée.

Les astrocytes sont les cellules gliales prédominantes au niveau de la TNO [41]. Ils forment une couche continue qui entoure les orifices de la lame criblée et communiquent par l'intermédiaire de jonctions cellulaires pour former un réseau protecteur pour les axones des CGR [41]. À l'image de la région prélaminaire, les astrocytes isolent au sein des septums de la lame criblée les axones les uns des autres et du tissu conjonctif adjacent, y compris des vaisseaux sanguins [1]. Les astrocytes peuvent être distingués en fonction de leur expression de molécules d'adhésion en deux populations, ceux qui recouvrent les tubes gliaux qui guident les axones au sein de la lame criblée et ceux qui recouvrent les feuillettes de la lame criblée [41]. Leur position entre la lame criblée et les axones leur confère un rôle essentiel pour transférer aux axones les modifications de la lame criblée (Fig. 9). Les astrocytes ont un rôle fonctionnel important en maintenant l'environnement extracellulaire constant afin de permettre les échanges ioniques impliqués dans la conduction du potentiel d'action par les axones des CGR. Les astrocytes sont aussi essentiels pour le maintien des feuillettes de la lame criblée, où ils sont impliqués dans la production de collagène et d'élastine qui contribuent à l'intégrité structurelle de la lame criblée [41]. Enfin, les astrocytes fabriquent la membrane basale qui recouvre le corps des feuillettes de la lame criblée.

En plus des astrocytes, une autre population de cellules a été identifiée au sein de la lame criblée [42]. Elles ont été classées en cellules gliales mais n'expriment pas la GFAP (*glial fibrillary acid protein*) [43]. Ces cellules ont une forme étoilée et sont situées au

sein des feuillettes de la lame criblée, mais leur relation exacte avec les CGR demeure non précisée ; elles pourraient toutefois intervenir dans le remodelage de la lame criblée dans le glaucome [42].

L'artère et la veine centrale de la rétine sont entourées d'une gaine conjonctive périvasculaire, et sont fixées l'une à l'autre et au tissu conjonctif qui forme les bords de la lame criblée. L'endothélium capillaire est à ce niveau continu et non fenêtré [1, 3].

Région rétrolaminaire

La portion rétrolaminaire du nerf optique commence à la partie postérieure de la lame criblée ; elle est marquée par le début de la myélinisation axonale et est entourée par les gaines méningées du système nerveux central [1, 3]. La myélinisation des axones postérieure à la lame criblée augmente la taille du nerf optique jusqu'à 3 à 4 mm, soit deux à trois fois la taille de la papille [24]. La portion rétrolaminaire est composée par les axones des CGR, par les oligodendrocytes qui forment la couche de myéline autour de ces axones, par les astrocytes qui recouvrent les fibres myélinisées et les séparent du tissu conjonctif voisin, y compris les vaisseaux sanguins, et enfin par les septums du nerf optique qui divisent incomplètement les fibres nerveuses rétiniennes en faisceaux et ont une fonction nutritionnelle et de support [1, 3]. Au centre de la portion distale du nerf optique se trouvent également les vaisseaux rétiniens centraux. Enfin, en périphérie, les gaines du nerf optique séparent le nerf optique de la sclère, avec, de l'intérieur vers l'extérieur : la pie-mère, l'arachnoïde et la dure-mère. Les gaines méningées qui entourent le nerf optique réalisent un espace qui communique avec le système ventriculaire cérébral [1, 3].

Dans la région rétrolaminaire, la matrice extracellulaire des septums est continue et a des caractéristiques similaires à celle de la pie-mère [30]. La membrane basale de ces septums est par ailleurs en continuité avec la membrane basale des feuillettes de la lame criblée. Il y a donc une transition entre l'organisation transversale de la matrice extracellulaire de la lame criblée et les colonnes longitudinales des septums rétrolaminaires [32].

■ Vascularisation de la tête du nerf optique

Le réseau artériel de la partie antérieure du nerf optique provient entièrement des branches de l'artère ophtalmique, une branche de la carotide interne [3] (Fig. 10). La portion orbitaire de l'artère ophtalmique vascularise ainsi la majeure partie du globe oculaire par les branches de l'artère centrale de la rétine et les artères ciliorétiniennes. La vascularisation de la portion antérieure du nerf optique et de la région péripapillaire présente néanmoins de nombreuses variations, faisant de sa description exacte un sujet de controverse [44, 45]. Parallèlement, le drainage veineux de la

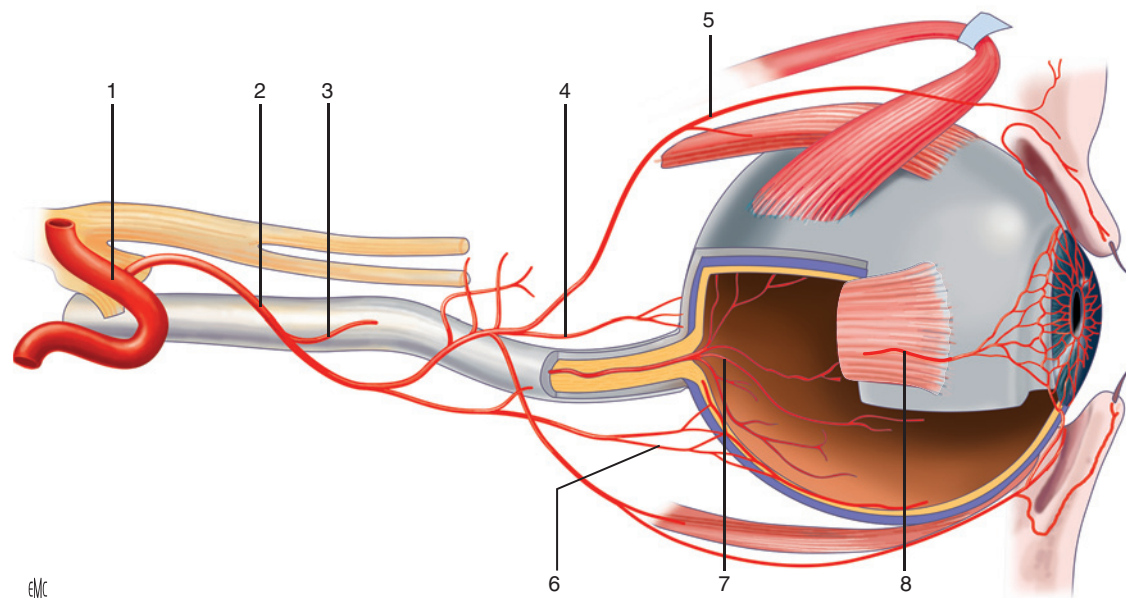


Figure 10. Vascularisation de l'orbite et de l'œil (d'après [4]). 1. Artère de la carotide interne ; 2. artère ophtalmique ; 3. artère centrale de la rétine ; 4. artère ciliaire postérieure médiale ; 5. branche frontale de l'artère ophtalmique ; 6. artère ciliaire courte postérieure ; 7. artère ciliaire longue postérieure ; 8. artère ciliaire antérieure.

portion antérieure du nerf optique ne s'effectue que par une seule veine : la veine centrale de la rétine.

Artères ciliaires

La plupart des individus ont entre deux et trois (de 1 à 5) artères ciliaires postérieures qui proviennent de l'artère ophtalmique au niveau de la partie postérieure de l'orbite [3, 44, 46, 47]. Ces artères ciliaires postérieures sont organisées le plus souvent en deux contingents latéral et médial qui donnent ensuite les artères ciliaires longues postérieures et les artères ciliaires courtes postérieures. Les artères ciliaires longues postérieures avancent antérieurement en dehors du globe oculaire avant de pénétrer la sclère pour vasculariser l'iris, le corps ciliaire et la région antérieure de la choroïde. Les artères ciliaires postérieures se dirigent antérieurement avant de se diviser en 10 à 20 artères ciliaires courtes postérieures, juste avant de pénétrer dans la sclère autour du nerf optique [3, 44, 46, 47]. Quelques artères ciliaires courtes postérieures se projettent sans se diviser directement au travers de la sclère dans la choroïde, et d'autres se divisent dans la sclère pour donner des branches qui vascularisent la choroïde et la TNO. Les artères ciliaires courtes postérieures vascularisent ainsi la choroïde péripapillaire et la plus grande partie de la portion antérieure du nerf optique (Fig. 10, 11). Certaines branches des artères ciliaires courtes postérieures peuvent confluer pour former un cercle artériel microscopique au sein des espaces scléaux péripapillaires, le cercle artériel de Zinn-Haller. Ce cercle artériel, qui peut entourer complètement le nerf optique, serait le plus souvent incomplet [44, 45]. Excepté pour la couche superficielle des fibres nerveuses de la TNO dont la vascularisation provient de l'artère centrale de la rétine, pour quelques branches rétrolaminaires de l'artère centrale de la rétine et quelques branches provenant de la vascularisation choroïdienne, le système artériel principal de la partie antérieure du nerf optique provient des artères ciliaires courtes postérieures [44, 46].

Artère centrale de la rétine

L'artère centrale de la rétine est aussi une branche orbitaire postérieure de l'artère ophtalmique. Elle pénètre le nerf optique approximativement 10 à 15 mm en arrière du globe oculaire et toujours à sa face inférieure [3]. L'artère centrale de la rétine progresse antérieurement, adjacente à la veine centrale de la rétine

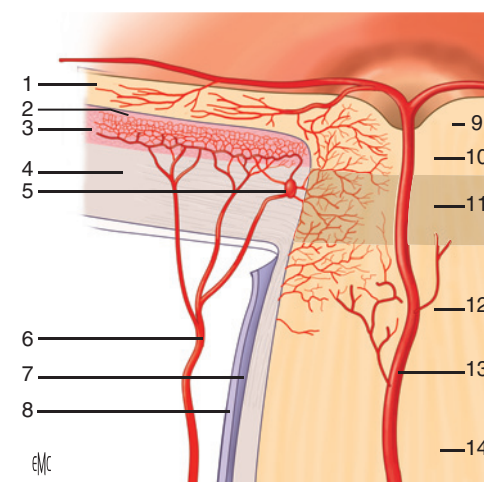


Figure 11. Vascularisation artérielle de la tête du nerf optique (d'après [4]). 1. Rétine ; 2. épithélium pigmentaire ; 3. choroïde ; 4. sclère ; 5. cercle artériel de Zinn-Haller ; 6. artère ciliaire courte postérieure ; 7. artères piales ; 8. dure-mère ; 9. couche des fibres nerveuses ; 10. région prélaminaire ; 11. région laminaire ; 12. région rétrolaminaire ; 13. artère centrale de la rétine ; 14. nerf optique.

dans la portion centrale du nerf optique. L'artère centrale de la rétine vascularise en premier lieu la rétine et la portion la plus superficielle de la papille. Elle n'a pratiquement aucune branche au sein du nerf optique, excepté occasionnellement dans sa partie rétrolaminaire [45, 46] (Fig. 10, 11). Certains auteurs ont ainsi décrit des collatérales intraneurales qui partent perpendiculairement du tronc de l'artère centrale de la rétine vers la périphérie, mais leur nombre serait très variable et leur présence limitée à la région rétrolaminaire du nerf optique [44, 48]. Des branches piales provenant de la face antérieure de l'artère centrale de la rétine peuvent parfois également contribuer à la vascularisation de la TNO. Ces branches progressent à la surface du nerf optique et se divisent en de très nombreuses branches collatérales terminales qui naissent perpendiculairement et pénètrent dans le nerf optique [3]. Enfin, l'artère ophtalmique et les artères ciliaires postérieures pourraient aussi, dans certains cas, contribuer à la vascularisation de la TNO [46].

Vascularisation de la papille et des fibres nerveuses rétiniennes

Couche des fibres nerveuses superficielles

La couche superficielle des fibres nerveuses rétiniennes est principalement vascularisée par des artérols récurrentes provenant des branches péripapillaires des artères rétiniennes [47] (Fig. 11). Ces petites artères qui se dirigent vers le centre de la TNO sont appelées vaisseaux épipapillaires [45]. Les capillaires provenant de ces vaisseaux sont continus avec les capillaires rétiniens de la périphérie de la papille et ont aussi des anastomoses postérieures avec les capillaires de la portion prélaminaire de la TNO [44]. La zone temporale de la couche des fibres nerveuses peut aussi avoir une contribution artérielle d'une artère cilioretinienne lorsque celle-ci est présente [44, 45]. Il n'y a pas de contribution directe choroïdienne au niveau de la couche superficielle des fibres nerveuses [47]. Les vaisseaux de la couche des fibres nerveuses rétiniennes sont, comme ceux de la rétine et du nerf optique, non fenêtrés et les jonctions serrées entre les cellules endothéliales font partie de la barrière hématorétinienne [3].

Portion prélaminaire

Pour certains auteurs, la région prélaminaire recevrait sa vascularisation par des branches directes des artères ciliaires courtes postérieures et par des branches provenant du cercle artériel de Zinn-Haller lorsque celui-ci est présent (Fig. 11) [45, 47, 49]. Pour d'autres, comme Hayreh et al., celle-ci proviendrait de fines branches centripètes issues de la choroïde péripapillaire [44, 48]. Des branches provenant des artères ciliaires courtes postérieures peuvent également traverser la choroïde pour vasculariser la région prélaminaire [47]. L'artère centrale de la rétine ne semble pas participer à la vascularisation de la région prélaminaire [44, 49].

Portion laminaire

La région laminaire est ainsi vascularisée par les artères ciliaires courtes postérieures soit directement, soit par l'intermédiaire du cercle artériel de Zinn-Haller [44, 45, 48-50]. La région laminaire est la région la plus richement vascularisée de la TNO. Les artérols précapillaires perforent les bords externes de la lame criblée avant de se diviser en un réseau capillaire intraseptal [44, 47, 48] (Fig. 11). Des artères se divisent également en provenance du système ciliaire court postérieur pour s'anastomoser aux artères piales, qui contribuent aussi à la vascularisation de la région laminaire [44]. La choroïde péripapillaire ne contribuerait qu'occasionnellement à la vascularisation de la région laminaire sans connexion véritable [45, 46]. L'artère centrale de la rétine ne donnerait aucune branche venant vasculariser la région de la lame criblée [44, 45].

Portion rétrolaminaire

La région rétrolaminaire est essentiellement vascularisée par des branches des artères piales et du système artériel ciliaire court postérieur (Fig. 11) [44, 45, 47-50]. Il existe ainsi une vascularisation centripète à partir du système vasculaire pial. Ce dernier reçoit des branches piales récurrentes provenant du cercle de Zinn-Haller et des artères ciliaires courtes postérieures, et parfois de la choroïde péripapillaire [44]. Des branches piales de l'artère centrale de la rétine ou d'autres artères orbitaires peuvent aussi contribuer à la vascularisation de la région rétrolaminaire dans certains cas [44, 48]. Alors que l'artère centrale de la rétine ne contribue pas aux régions prélaminaire et laminaire, elle contribue parfois avec de petites branches centrifuges à la région rétrolaminaire [47]. Ces artères s'anastomosent avec le réseau capillaire formé par les artères piales et les artères ciliaires courtes postérieures.

Choroïde péripapillaire

La couche la plus interne de la choroïde, la choriocapillaire, est composée d'un riche réseau anastomotique de capillaires fenêtrés qui débutent à la limite de la papille. Les capillaires de la choriocapillaire sont séparés et distincts de ceux de la TNO. La plupart des études montrent que la choroïde péripapillaire est vascularisée principalement par des branches des artères ciliaires courtes

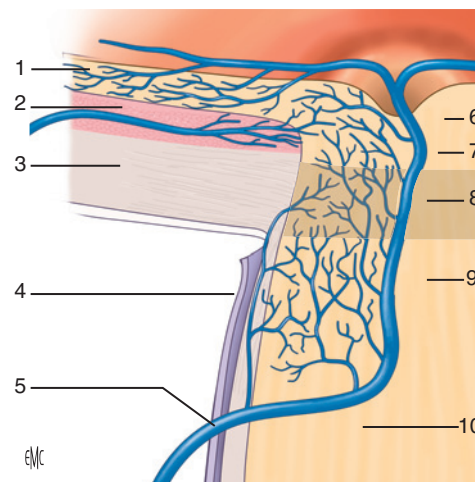


Figure 12. Drainage veineux de la tête du nerf optique (d'après [4]). 1. Rétine ; 2. choroïde ; 3. sclère ; 4. dure-mère ; 5. veine centrale de la rétine ; 6. couche des fibres nerveuses ; 7. région prélaminaire ; 8. région laminaire ; 9. région rétrolaminaire ; 10. nerf optique.

postérieures, directement ou via le cercle de Zinn-Haller [45, 49, 50]. La choroïde péripapillaire peut également donner de petites branches au niveau des régions prélaminaires et laminaires de la TNO [44].

Drainage veineux

Alors qu'il existe un réseau vasculaire artériel très développé provenant de nombreux vaisseaux, le drainage veineux de la portion antérieure du nerf optique ne s'effectue principalement que par une seule veine : la veine centrale de la rétine [3, 45]. Dans la couche des fibres nerveuses rétiniennes, le sang est drainé directement dans les veines rétiniennes qui se rejoignent pour former la veine centrale de la rétine (Fig. 12). Dans la portion prélaminaire, laminaire et rétrolaminaire, le drainage veineux se fait également par la veine centrale de la rétine ou des efférentes axiales de la veine centrale de la rétine [45, 49]. Dans la région prélaminaire, de petites veinules connectant le nerf optique aux veines de la choroïde péripapillaire ont été également identifiées [44]. En périphérie de la région laminaire et rétrolaminaire, le drainage veineux peut aussi se faire via les veines piales. Celles-ci se jettent finalement dans la veine centrale de la rétine lorsqu'elle sort du nerf optique. Parce que la veine centrale de la rétine est le principal système de drainage de la TNO, un flux sanguin centripète est créé au sein du nerf optique. Ce flux n'est retrouvé que chez l'homme et les primates [49].

Pour le drainage de la choroïde péripapillaire, des veines choroïdiennes émergent approximativement 200 à 300 μ en périphérie du nerf optique. Ces veines se drainent dans le système vortiqueux [45]. À l'inverse du nerf optique, il existe donc un flux centrifuge de sang dans la région choroïdienne péripapillaire.

Microarchitecture vasculaire

Les capillaires de la rétine péripapillaire, de la partie superficielle du nerf optique, de la TNO et de la région rétrolaminaire sont anatomiquement confluent et forment un réseau vasculaire non fenêtré continu tout le long de la portion antérieure du nerf optique [47]. La choriocapillaire péripapillaire ne s'anastomose cependant pas avec les plexus capillaires dans la région prélaminaire [44]. Par ailleurs, il existe des différences dans l'organisation de ces capillaires dans la portion antérieure de la TNO et au niveau de la lame criblée. Alors que les capillaires de la région prélaminaire et rétrolaminaire ont une organisation irrégulière et complexe (capillaires longitudinaux et transverses), ceux de la région laminaire sont à l'image de l'organisation des septums du tissu conjonctif de la lame criblée, organisés principalement de manière transverse [33, 44, 50]. Les précapillaires périphériques à la

lame criblée se branchent ainsi aux capillaires intralaminaires au sein de ces septums pour former un réseau polygonal. Les capillaires de la région rétrolaminaire sont moins organisés mais ont un riche réseau d'anastomoses avec les capillaires de la région laminaire.

La plupart de vaisseaux au niveau de la TNO sont des capillaires avec quelques artérioles précapillaires en particulier en périphérie du nerf [45, 48, 50]. Lorsque les artérioles pénètrent dans le nerf optique, une transition rapide se fait ainsi en artérioles précapillaires, puis en capillaires. Les artérioles ont une couche de muscle lisse limitée entourant les cellules endothéliales [45]. Les capillaires sont composés d'une couche unique de cellules endothéliales reliées entre elles par des jonctions serrées entourées par un tissu glial de soutien et de péricytes intermittents [45]. La couche de muscle lisse et les péricytes des précapillaires et capillaires ont des capacités contractiles et pourraient avoir ainsi une activité vasomotrice locale [45, 49].

Les cellules gliales et les astrocytes en particulier pourraient jouer un rôle dans la régulation du message nerveux et dans la vascularisation [41]. Dans la région laminaire, les astrocytes recouvrent les espaces entre les lamelles de collagène et envoient des prolongements entre les fibres nerveuses rétiniennes. Ils recouvrent également les vaisseaux et sont concentrés sur les bords des tissus entourant le nerf optique. Cette proximité entre les astrocytes et les vaisseaux sanguins pourrait suggérer un rôle de régulation vasculaire pour les astrocytes au niveau de la TNO [47, 51].

“ Points essentiels

- La papille est un support structurel et fonctionnel pour l'ensemble des axones des cellules ganglionnaires rétiniennes qui la traverse.
- La tête du nerf optique peut être divisée au niveau histologique en quatre zones : la couche des fibres nerveuses rétiniennes, la portion prélaminaire, la portion laminaire ou lame criblée, et la portion rétrolaminaire.
- La fonction principale de la lame criblée est de permettre le passage des fibres nerveuses rétiniennes et des vaisseaux centraux de la rétine au travers du canal scléral tout en préservant ces structures du gradient de pression entre les espaces intra- et extraoculaires.
- Le réseau artériel de la partie antérieure du nerf optique provient entièrement des branches de l'artère optique, une branche de la carotide interne.
- Les artères ciliaires courtes postérieures vascularisent la choroïde péripapillaire et la plus grande partie de la portion antérieure du nerf optique.

Déclaration d'intérêts : l'auteur déclare ne pas avoir de liens d'intérêts en relation avec cet article.



■ Références

- [1] Jonas JB, Naumann GO. The optic nerve: its embryology, histology, and morphology. In: Varma R, Spaeth GL, Parker KW, editors. *The optic nerve in glaucoma*. Philadelphia: JB Lippincott; 1993.
- [2] De Laage de Meux P. *Ophthalmologie pédiatrique*. Paris: Masson; 2003, 441 p.
- [3] Hamard H, Chevaleraud J, Rondot P. *Neuropathies optiques*. Paris: Masson; 1986.
- [4] Renard JP, Sellem E. *Le GPAO, Rapport 2014 de la Société française d'ophtalmologie*. Issy-les-Moulineaux : Elsevier-Masson ; 2014. Chap. 6 : Labbé A. Anatomie de la tête et de la portion antérieure du nerf optique, p. 43-56.
- [5] Rouland JF. Anatomie de la papille optique. *EMC* (Elsevier Masson SAS, Paris), Ophtalmologie, 21-008-A-05, 1997.
- [6] Sing NM, Anderson SF, Townsend JC. The normal optic nerve head. *Optom Vis Sci* 2000;**77**:293-301.
- [7] Jonas JB, Gusek GC, Naumann GO. Optic disc, cup and neuroretinal rim size, configuration and correlations in normal eyes. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 1988;**29**:1151-8.
- [8] Jonas JB, Gusek GC, Guggenmoos-Holzmann I, Naumann GO. Size of the optic nerve scleral canal and comparison with intravitreal determination of optic disc dimensions. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 1988;**26**:213-5.
- [9] Jonas JB, Budde WM, Panda-Jonas S. Ophthalmoscopic evaluation of the optic nerve head. *Surv Ophthalmol* 1999;**43**:293-320.
- [10] Jonas JB, Zach FM, Gusek GC, Naumann GO. Pseudogliomatous physiologic large cups. *Am J Ophthalmol* 1989;**107**:137-44.
- [11] Samarawickrama C, Hong T, Jonas JB, Mitchell P. Measurement of normal optic nerve head parameters. *Surv Ophthalmol* 2012;**57**:317-36.
- [12] Jonas JB, Nguyen XN, Gusek GC, Naumann GO. Parapapillary chorioretinal atrophy in normal and glaucoma eyes. I. Morphometric data. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 1989;**30**:908-18.
- [13] Rensch F, Jonas JB. Direct micropometry of alpha zone and beta zone parapapillary atrophy. *Br J Ophthalmol* 2008;**92**:1617-9.
- [14] Wang Y, Xu L, Zhang L. Peripapillary atrophy in elderly Chinese in rural and urban Beijing. *Eye* 2008;**22**:261-6.
- [15] Jonas JB, Jonas SB, Jonas RA. Parapapillary atrophy: histological gamma zone and delta zone. *PLoS One* 2012;**7**:e47237.
- [16] Hoffmann EM, Zangwill LM, Crowston JG, Weinreb RN. Optic disk size and glaucoma. *Surv Ophthalmol* 2007;**52**:32-49.
- [17] Varma R, Tielsch JM, Quigley HA. Race-, age-, gender-, and refractive error-related differences in the normal optic disc. *Arch Ophthalmol* 1994;**112**:1068-76.
- [18] Leibowitz HM, Krueger DE, Maunders LR. The Framingham Eye Study monograph: An ophthalmological and epidemiological study of cataract, glaucoma, diabetic retinopathy, macular degeneration, and visual acuity in a general population of 2631 adults, 1973-1975. *Surv Ophthalmol* 1980;**24**(Suppl.):335-610.
- [19] Jonas JB, Gusek GC, Naumann GO. Optic disk morphometry in high myopia. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 1988;**26**:587-90.
- [20] Jonas JB, Muller-Bergh JA, Schlotzer-Schrehardt UM, Naumann GO. Histomorphometry of the human optic nerve. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 1990;**31**:736-44.
- [21] Repka MX, Quigley HA. The effect of age on normal human optic nerve fiber number and diameter. *Ophthalmology* 1989;**96**:26-32.
- [22] Moya FJ, Brigatti L, Caprioli J. Effect of aging on optic nerve appearance: a longitudinal study. *Br J Ophthalmol* 1999;**83**:567-72.
- [23] Balaratnasingam C, Morgan WH, Johnstone V, Pandav SS, Cringle SJ, Dao-Yi Y. Histomorphometric measurements in human and dog optic nerve and an estimation of optic nerve pressure gradients in human. *Exp Eye Res* 2009;**89**:618-28.
- [24] Varma R, Minckler DS. Anatomy and pathophysiology of the retina and optic nerve. In: Ritch R, Shields BM, Krupin T, editors. *The glaucomas: basic sciences*. St Louis, Missouri: Mosby; 1996.
- [25] Jonas JB, Nguyen NX, Naumann GO. The retinal nerve fiber layer in normal eyes. *Ophthalmology* 1989;**96**:627-32.
- [26] Minckler DS. Correlations between anatomic features and axonal transport in primate optic nerve head. *Trans Am Ophthalmol Soc* 1986;**84**:429-52.
- [27] Radius RL, Anderson DR. The histology of retinal nerve fiber layer bundles and bundle defects. *Arch Ophthalmol* 1979;**97**:948-50.
- [28] Potts AM, Hodges D, Shelman CB. Morphology of the primate optic nerve. I. Method and total fiber count. *Invest Ophthalmol* 1972;**11**:980-8.
- [29] Ogden TE. Nerve fiber layer of the primate retina: morphometric analysis. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 1984;**25**:19-29.
- [30] Hernandez MR, Gong H. Extracellular matrix of the trabecular meshwork and optic nerve head. In: Ritch R, Shields BM, Krupin T, editors. *The glaucomas: basic sciences*. St Louis: CV Mosby; 1996.
- [31] Quigley HA, Hohman RM, Addicks EM. Morphologic changes in the lamina cribrosa correlated with neural loss in open-angle glaucoma. *Am J Ophthalmol* 1983;**95**:673-91.
- [32] Hernandez MR, Luo XX, Igoe F, Neufeld AH. Extracellular matrix of the human lamina cribrosa. *Am J Ophthalmol* 1987;**104**:567-76.
- [33] Quigley HA, Addicks EM. Regional differences in the structure of the lamina cribrosa and their relation to glaucomatous optic nerve damage. *Arch Ophthalmol* 1981;**99**:137-43.
- [34] Airaksinen PJ, Drance SM. Neuroretinal rim area and retinal nerve fiber layer in glaucoma. *Arch Ophthalmol* 1985;**103**:203-4.

- [35] Grytza R, Girkin CA, Libertaux V, Crawford Downs J. Perspectives on biomechanical growth and remodeling mechanisms in glaucoma. *Mech Res Commun* 2012;**42**:92–106.
- [36] Ogden TE, Duggan J, Danley K, Wilcox M, Minckler DS. Morphometry of nerve fiber bundle pores in the optic nerve head of the human. *Exp Eye Res* 1988;**46**:559–68.
- [37] Akagi T, Hangai M, Takayama K, Nonaka A, Ooto S, Yoshimura N. In vivo imaging of lamina cribrosa pores by adaptive optics scanning laser ophthalmoscopy. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2012;**53**:4111–9.
- [38] Park HY, Jeon SH, Park CK. Enhanced depth imaging detects lamina cribrosa thickness differences in normal tension glaucoma and primary open-angle glaucoma. *Ophthalmology* 2012;**119**:10–20.
- [39] Caparas VL, Cintron C, Hernandez-Neufeld MR. Immunohistochemistry of proteoglycans in human lamina cribrosa. *Am J Ophthalmol* 1991;**112**:489–95.
- [40] Goldbaum MH, Jeng SY, Logemann R, Weinreb RN. The extracellular matrix of the human optic nerve. *Arch Ophthalmol* 1989;**107**:1225–31.
- [41] Hernandez MR. The optic nerve head in glaucoma: role of astrocytes in tissue remodeling. *Prog Retin Eye Res* 2000;**19**:297–321.
- [42] Morgan J. Pathogenesis of glaucomatous optic neuropathy. In: Shaarawy TM, Sherwood MB, Hitchings RA, Crowston JG, editors. *Glaucoma*. Philadelphia: Saunders Elsevier; 2009.
- [43] Kirwan RP, Leonard MO, Murphy M. Transforming growth factor-beta-regulated gene transcription and protein expression in human GFAP-negative lamina cribrosa cells. *Glia* 2005;**52**:309–24.
- [44] Hayreh SS. The blood supply of the optic nerve head and the evaluation of it - myth and reality. *Prog Retin Eye Res* 2001;**20**:563–93.
- [45] Cioffi GA, Van Buskirk EM. Vasculature of the anterior optic nerve and peripapillary choroid. In: Ritch R, Shields BM, Krupin T, editors. *The glaucomas: basic sciences*. St Louis: CV Mosby; 1996.
- [46] Onda E, Cioffi GA, Bacon DR, Van Buskirk EM. Microvasculature of the human optic nerve. *Am J Ophthalmol* 1995;**120**:92–102.
- [47] Mackenzie PJ, Cioffi GA. Vascular anatomy of the optic nerve head. *Can J Ophthalmol* 2008;**43**:308–12.
- [48] Hayreh SS. Blood supply of the optic nerve head in health and disease. In: Lambrou GN, Greve EL, editors. *Ocular blood flow in glaucoma*. Amsterdam: Kugler and Ghedini; 1989.
- [49] Cioffi GA, Van Buskirk EM. Microvasculature of the anterior optic nerve. *Surv Ophthalmol* 1994;**38**(Suppl.):S107–16.
- [50] Lieberman MF, Maumenee AE, Green WR. Histologic studies of the vasculature of the anterior optic nerve. *Am J Ophthalmol* 1976;**82**:405–23.
- [51] Attwell D, Buchan AM, Charpak S, Lauritzen M, Macvicar BA, Newman EA. Glial and neuronal control of brain blood flow. *Nature* 2010;**468**:232–43.

A. Labbé, Professeur des Universités, praticien hospitalier (alabbe@15-20.fr).

Université de Versailles, Saint-Quentin-en-Yvelines, Versailles, France.

Service d'ophtalmologie, Hôpital Ambroise-Paré, AP-HP, Boulogne-Billancourt, France.

Service d'ophtalmologie, Centre hospitalier national d'ophtalmologie des Quinze-Vingts, 28, rue de Charenton, 75012 Paris, France.

Toute référence à cet article doit porter la mention : Labbé A. Anatomie de la papille optique et des fibres optiques réiniennes. EMC - Ophtalmologie 2016;13(4):1-10 [Article 21-008-A-05].

Disponibles sur www.em-consulte.com



Arbres
décisionnels



Iconographies
supplémentaires



Vidéos/
Animations



Documents
légaux



Information
au patient



Informations
supplémentaires



Auto-
évaluations



Cas
clinique