

■ Le dossier – L'imagerie grand champ

Imagerie grand champ et choroïde : doit-on revoir nos conceptions ?

RÉSUMÉ : La choroïde est un tissu vasculaire dont la fonction principale est d'assurer les apports énergétiques de l'épithélium pigmentaire et la rétine externe. L'imagerie grand champ ($> 100^\circ$), en particulier associée à l'injection de colorant, a permis d'affiner nos connaissances sur l'anatomie et la circulation choroïdienne. Elle permet de visualiser aisément les zones de séparation des eaux (*watershed zones*) et la distribution des veines vortiqueuses (parfois nombreuses) en périphérie du globe oculaire. Dans la chorioretinopathie séreuse centrale, on pourra visualiser un retard de remplissage choroïdien, des veines choroïdiennes dilatées, des anastomoses veineuses intervortex et des zones d'hyperperméabilité vasculaire choroïdienne.

Chez les patients ayant présenté une forme sévère d'infection au SARS-CoV-2, une étude récente a retrouvé dans près de 20 % des cas des zones d'hypervascularisation choroïdienne semblables à celles observées dans les hémangiomes choroïdiens.



M. MAUGET-FAÿSSE¹, B. WOLFF²

¹ Centre d'investigation clinique, Fondation Ophtalmologique Rothschild, PARIS.

² Centre ophtalmologique Maison Rouge, STRASBOURG.

■ En préambule

La choroïde est un tissu vasculaire spongieux, situé en arrière de la rétine, dont l'organisation est restée longtemps mal comprise des anatomopathologistes comme des ophtalmologues. Les travaux d'Hayreh ont énormément contribué aux avancées des connaissances à ce sujet [1-3]. Ceux-ci étaient basés sur des études *post mortem* ainsi que sur des études *in vivo* grâce à l'angiographie à la fluorescéine chez le singe et chez l'homme. Il a pu définir, grâce à ses observations rigoureuses, la distribution segmentaire et terminale de la circulation des artères ciliaires, leur nomenclature, leur nombre et leur origine, ainsi que la distribution des *watersheds* (zones de séparation des eaux) et leur importance en clinique, car ce sont des zones très sensibles à l'ischémie (*fig. 1*).

Au cours des dix dernières années, l'introduction de l'imagerie grand champ a considérablement augmenté et affiné nos

connaissances sur l'anatomie et la circulation choroïdienne. Depuis 2005, des systèmes sans contact permettent d'imager la rétine dans des champs allant jusqu'à 200° (Optos Californie, Écosse, Royaume-Uni). La documentation de la périphérie choroïdienne permet non seulement le diagnostic, le monitoring et le suivi des pathologies la concernant, mais a aussi un rôle irremplaçable pour l'enseignement, l'éducation du patient, sans oublier un rôle médico-légal et une utilité en télémedecine.

L'étude de la choroïde est un domaine dans lequel nous avons encore beaucoup à apprendre, en particulier sur la distribution exacte des artères ciliaires et des drainages veineux, qu'ils soient considérés normaux ou pathologiques.

Comment optimiser la visualisation de la choroïde ?

Pour bien l'étudier, l'utilisation de colorant reste nécessaire. L'angiographie au

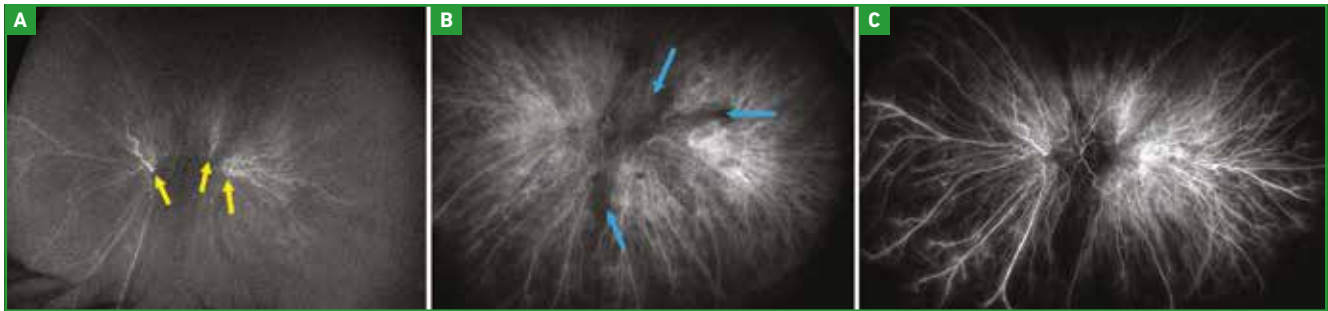


Fig. 1 : Temps très précoces d'une angiographie ICG grand champ. Mise en évidence de 3 artères ciliaires courtes postérieures (**A, flèches jaunes**), suivie rapidement par la visualisation des lignes de séparation des eaux (*watersheds*) aux temps artérioveineux précoces (**B, flèches bleues**). Aux temps artérioveineux tardifs (**C**), les veines choroïdiennes commencent à apparaître.

vert d'indocyanine (ICG) a été considérée à juste titre comme le *gold standard* pour l'exploration de ce tissu. Contrairement à la fluorescéine, l'ICG a une excellente pénétration au travers de l'épithélium pigmentaire et des hémorragies. De plus, la grande affinité de ce colorant vis-à-vis des protéines du plasma évite qu'il ne diffuse au travers des parois fenestrées des capillaires, permettant ainsi de distinguer parfaitement les détails du réseau choroïdien [4].

La choroïde a la particularité d'avoir un flux sanguin 10 fois supérieur à celui de l'artère centrale de la rétine. Contrairement à la rétine, le drainage veineux est d'allure centrifuge en direction des ampoules vortiqueuses situées le plus souvent en avant de l'équateur du globe oculaire. Au-delà des ampoules vortiqueuses, le flux veineux plonge à travers la sclère pour rejoindre les veines ophtalmiques. On comprend donc que, pour étudier correctement la choroïde, la vidéoangiographie grand champ permet le mieux d'analyser la cinétique générale du flux sanguin des vaisseaux (pulsatilité, retard de perfusion...). Ces systèmes de drainage des larges vaisseaux choroïdiens ont récemment suscité un grand intérêt pour comprendre en particulier la physiopathogénie du spectre des pachychoroïdes et de la chorioretinopathie séreuse centrale (CRSC) [5].

Il persiste néanmoins de nombreuses interrogations : qu'est-ce qu'une cho-

roïde normale ? Pourquoi une choroïde devient-elle anormale ? Que signifient ces modifications ? Le but de cet article est d'exposer les nouvelles conceptions apportées par l'étude en imagerie grand champ de la choroïde par l'angiographie au vert d'indocyanine.

Nouvelles conceptions apportées par l'imagerie grand champ dans la choroïde normale

L'équipe de Sadda a étudié le nombre et la distribution des ampoules vortiqueuses

de 36 yeux considérés comme normaux à l'aide de l'imagerie grand champ de l'Optos (Optos PLC, Dunfermline, Écosse) et de l'angiographie au vert d'indocyanine [6, 7]. L'objectif était de mieux définir la circulation choroïdienne normale afin de l'utiliser comme référence dans de futures études. Les ampoules vortiqueuses sont définies par la convergence de multiples (au moins 4) et larges veines choroïdiennes dans un unique tronc ampolaire qui effectue un court trajet intrascléral au niveau de l'équateur, avant de quitter le globe oculaire pour être drainé dans les veines ophtalmiques (**fig. 2**).

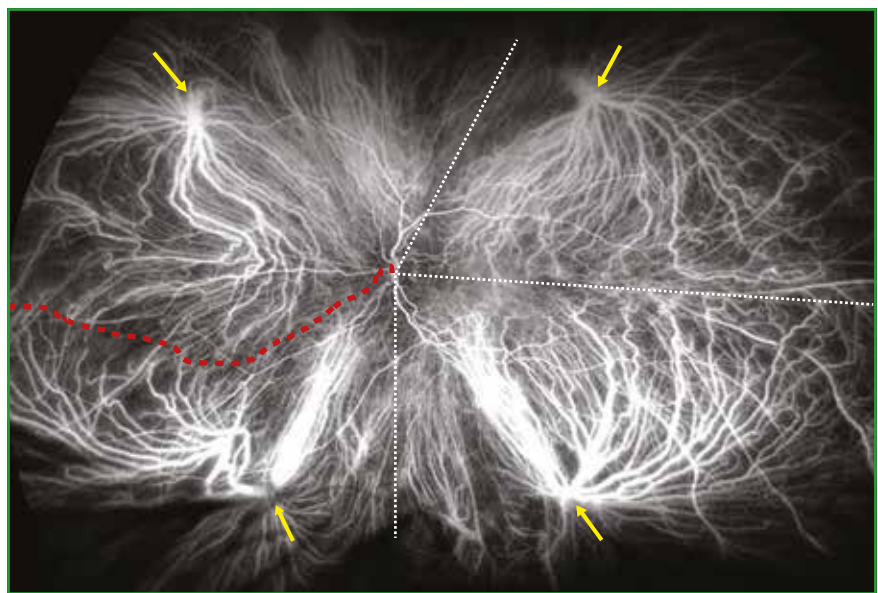


Fig. 2 : Circulation vasculaire choroïdienne aux temps veineux tardifs qui montre la présence de 4 ampoules vortiqueuses principales (**flèches jaunes**). Les pointillés dessinent la localisation des *watersheds*, qui peuvent ne pas être linéaires (**pointillés rouges**).

I Le dossier – L'imagerie grand champ

Contrairement à ce que l'on pensait, le nombre des ampoules vortiqueuses discernables est fréquemment et substantiellement beaucoup plus important que les 4 classiques veines vortiqueuses que l'on pensait drainer les 4 principaux quadrants. En effet, dans cette étude, la moyenne des ampoules vortiqueuses observées par l'ultra-grand champ était de $8,0 \pm 2,1$ (5-13) sur 36 yeux considérés comme normaux. Aucune vortiqueuse n'a été décelée dans les méridiens de 3 et 9 heures.

Il est par ailleurs important de noter que les *watersheds* ne sont pas nécessairement linéaires et peuvent avoir un trajet courbe.

Nouvelles conceptions apportées par l'imagerie grand champ dans la choroïde du myope

Dans la myopie forte, l'ensemble des veines vortiqueuses visualisées par l'imagerie ultra-grand champ met bien en évidence des relations entre les veines vortiqueuses et les staphylomes. Dans une étude de l'équipe d'Ohno-Matsui portant sur 302 yeux myopes de plus de 8 dioptries, des veines vortiqueuses postérieures (situées en arrière de l'équateur) ont été retrouvées dans 26 % des cas [8] (**fig. 3**). La prévalence d'un staphylome postérieur était plus grande chez les yeux présentant une veine vortiqueuse postérieure.

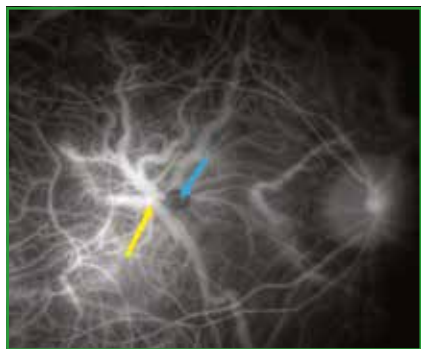


Fig. 3 : Veines vortiqueuses s'abouchant dans l'aire maculaire (**flèche jaune**) chez un patient myope fort avec néovaisseaux choroïdiens (**flèche bleue**).

Pourquoi cette particularité ? Il semblerait que les berges abruptes du staphylome obligent les veines choroïdiennes à se dérouter et à se drainer dans une zone proche de celui-ci.

Nouvelles conceptions apportées par l'imagerie grand champ dans le spectre des pachychoroïdes et la CRSC [9, 10]

Dans la CRSC, la macula est soulevée en raison d'une fuite de liquide au niveau de l'épithélium pigmentaire rétinien. Le liquide semble provenir d'une hyperperméabilité vasculaire choroïdienne, mais la cause du liquide reste jusqu'alors controversée. Les mécanismes de régulation du flux sanguin choroïdien éventuellement impliqués dans la pathogenèse des CRSC et des maladies du spectre des pachychoroïdes sont actuellement à l'étude.

En tant que seules voies de sortie du globe de la circulation veineuse choroïde, les ampoules vortiqueuses et le trajet intrascléral des veines vortiqueuses pourraient être des sites importants de régulation du flux choroïdien par modulation de la résistance au flux.

Des avancées récentes sur la vascularisation choroïdienne ont été obtenues grâce aux progrès de la tomographie par cohérence optique (OCT) et de l'utilisation de l'angiographie ICG grand champ. Récemment, Spaide a soulevé l'hypothèse que certaines maladies oculaires pouvaient avoir comme origine des problèmes d'insuffisance veineuse choroïdienne chronique [9]. Certains des processus physiopathologiques de ces maladies choroïdiennes pourraient se rapprocher de ceux trouvés dans l'insuffisance veineuse chronique (IVC) affectant d'autres systèmes organiques.

Au niveau de la choroïde, certains tableaux tels que l'occlusion d'une veine vortiqueuse, la fistule du sinus

caverneux carotidien et la neuropathie associée aux vols spatiaux ont des manifestations quelque peu différentes en raison de dissemblances de l'étiologie sous-jacente, de l'acuité de l'apparition et de l'importance de l'atteinte extraoculaire. Néanmoins, la surcharge veineuse apparaît comme étant une cause fondamentale de ces troubles. D'ailleurs, les yeux atteints de CRSC ou d'anomalies liées aux pachychoroïdes présentent des similitudes avec les yeux qui ont présentés une occlusion de veine vortiqueuse, une fistule du sinus caverneux carotidien ou une neuropathie associée aux vols spatiaux. En effet, ces yeux présentent un retard de remplissage choroïdien, des veines dilatées, des anastomoses veineuses intervortex et une hyperperméabilité vasculaire choroïdienne (**fig. 4**).

Alors que les patients qui présentent une occlusion de veine vortiqueuse, une fistule du sinus caverneux carotidien ou une neuropathie associée aux vols spatiaux ont des anomalies extraoculaires à l'origine de l'insuffisance veineuse choroïdienne, les yeux atteints de CRSC et d'anomalies liées à une pachychoroïde semblent avoir un dysfonctionnement intrinsèque du flux veineux choroïdien. Des anomalies vasculaires choroïdiennes similaires ont été retrouvées dans le syndrome des pachychoroïdes péripapillaires [11]. Cependant, dans ce syndrome, les anastomoses veineuses intervortex se situent dans la région péripapillaire.

>>> Hypothèses physiopathologiques

Selon le principe de Starling, la forte pression hydrostatique des capillaires artériels favorise la perte de fluides vers les tissus [12]. Ces fluides sont ensuite réabsorbés par les capillaires veineux en raison d'une importante diminution de la pression hydrostatique et de l'augmentation de la pression osmotique. Ainsi, en cas d'augmentation de l'un de ces deux paramètres au niveau veineux, on observera une majoration du liquide interstitiel et un gonflement des tissus concernés.

Le dossier – L'imagerie grand champ

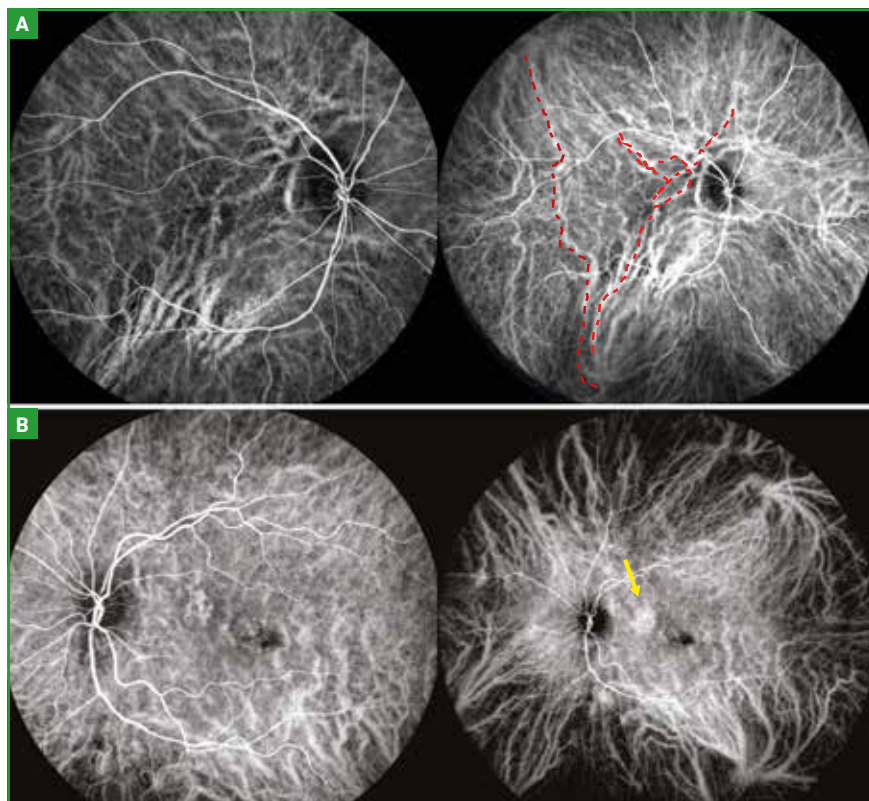


Fig. 4A : Angiographie ICG en 50 et 102° chez un patient présentant une CRSC chronique. Les veines choroïdiennes présentent des anomalies de calibre et de trajet. On note de multiples anastomoses intervortex (**pointillés rouges**) alors que les *watersheds* ne sont plus individualisables. Les ampoules vorticeuses paraissent sclérosées. **B :** angiographie ICG en 50° et 102° chez un patient présentant une CRSC chronique. Les veines choroïdiennes sont dilatées avec une disparition des *watersheds* au pôle postérieur et une zone d'hyperperméabilité choroïdienne supéromaculaire (**flèche jaune**).

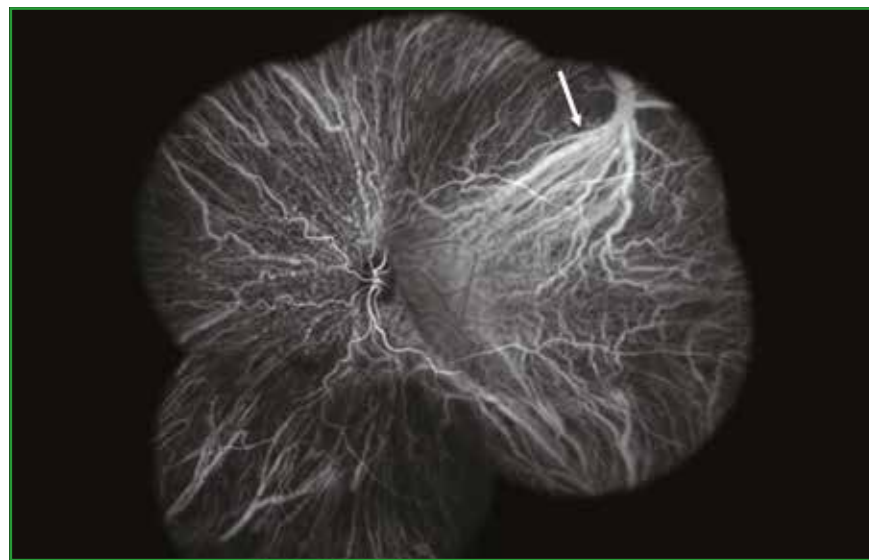


Fig. 5 : Angiographie ICG grand champ chez un patient présentant une effusion uvéale (post-chirurgicale). On observe un amincissement des vorticeuses périphériques et une dilatation de la vorticeuse compétente en temporal supérieur (**flèche**).

Une des hypothèses avancées dans les maladies associées à une pachychoroïde serait un effet de résistance “Starling” anormal au niveau de la circulation veineuse choroïdienne. Ce dernier serait à l’origine d’un gonflement du tissu choroïdien et d’une exsudation sous-rétinienne.

Il est aussi très important de penser le flux sanguin comme non uniforme et pulsatile dans les tissus oculaires. Les variations de la pression intraoculaire et une couche sclérale épaisse et non conforme entraînent une dynamique de flux non uniforme. Par ailleurs, les vaisseaux choroïdiens ont une innervation parasymphatique et sympathique permettant la régulation du flux choroïdien. On peut donc considérer qu’il existe un contrôle hybride du flux sanguin choroïdien : nerveux (système sympathique et parasymphatique) et mécanique (pression intraoculaire, trajet scléral des veines vorticeuses).

Des mécanismes de régulation maintiennent un apport constant de nutriments et d’oxygène dans les tissus oculaires. L’augmentation de la pression veineuse, secondaire à une augmentation du débit ou à une obstruction de l’écoulement, peut entraîner localement une dilatation veineuse et un remodelage vasculaire pouvant eux-mêmes produire une cascade d’effets négatifs tels que l’expression d’intégrines, de MMP (*matrix-metalloproteinases*) et de cytokines. Ces changements pathologiques provoquent des altérations des parois vasculaires, des déséquilibres hydriques et des diminutions de l’apport en oxygène des tissus.

L’imagerie grand champ permet de voir précisément la circulation choroïdienne dans le cas des effusions uvéales et le résultat que peut apporter la chirurgie dans le drainage veineux (**fig. 5**). Cette compréhension des mécanismes de régulation du flux devient de plus en plus pertinente pour la compréhension des maladies choroïdiennes et rétiniennes et ouvre la voie vers de

nouvelles thérapeutiques. La notion de surcharge veineuse choroïdienne [13] fournit donc un nouveau concept unificateur permettant de mieux appréhender la physiopathologie et la classification des syndromes associés à une pachychoïde (CRSC, *pachychoïd pigment epitheliopathy*, *peripapillary pachychoroid syndrome*).

Nouvelles conceptions apportées par l'imagerie grand champ dans la choroïdopathie liée à l'infection au SARS-CoV-2 [14]

Une étude menée à la Fondation Rothschild chez des patients hospitalisés pour une COVID-19 sévère a montré que les patients présentaient sur l'angiographie grand champ au vert d'indocyanine de multiples anomalies du réseau vasculaire choroïdien. Des zones d'hypervascularisation choroïdienne proches de celles vues dans les hémangiomes choroïdiens ont pu être observées dans 18 % des cas (**fig. 6**). On ne notait cependant ni *wash-out* tardif, ni décollement séreux rétinien ou bombement de l'épithélium pigmentaire associés à ces lésions. Il

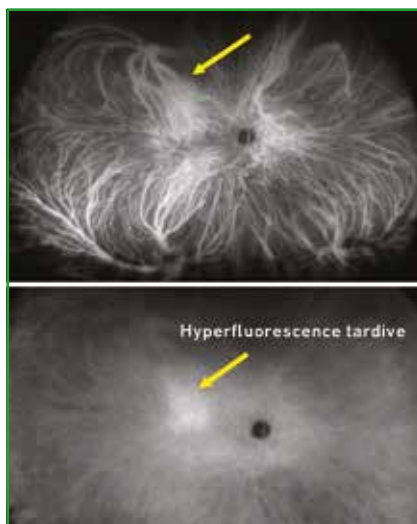


Fig. 6 : Angiographie ICG grand champ chez un patient ayant contracté une infection au SARS-CoV-2. On note une lésion hyperfluorescente dès les temps précoces (**flèche**) et persistante aux temps tardifs (*hemangioma-like lesion*).

s'agit donc plus volontiers de zones d'épaississement choroïdien localisées, dénommées *hemangioma-like lesions*.

Cet aspect pourrait être la traduction d'une surcharge veineuse en avant d'une microthrombose, car des anastomoses intervortex (post-thrombotiques) ont été retrouvées dans 36 % des cas (10 yeux). Il pourrait aussi s'agir d'une dérégulation du flux sanguin choroïdien secondaire à une altération du système nerveux autonome consécutif à l'infection au SARS-CoV-2.

Conclusion

L'exploration de la choroïde grâce à l'imagerie grand champ – et en particulier l'angiographie au vert d'indocyanine – a permis une meilleure visualisation des veines vorticeuses et une meilleure évaluation du système de drainage choroïdien. En dépit de son coût élevé, cette imagerie représente une avancée incontestable dans la compréhension de la physiologie du tissu choroïdien. Le couplage à la vidéoangiographie dynamique, malheureusement peu employée, donne des informations essentielles sur la cinétique du flux.

De fait, la complexité du réseau vasculaire choroïdien en fait un domaine dans lequel demeurent encore beaucoup d'inconnues. Il reste très difficile de définir ce qu'est une choroïde "normale". Le laser Doppler holographique pourrait néanmoins, dans un proche avenir, nous permettre de mieux préciser ce que l'on voit et ainsi améliorer encore la compréhension des diverses pathologies choroïdiennes. Enfin, l'arrivée prochaine des thérapies délivrées au niveau de l'espace suprachoroïdien souligne davantage la nécessité de comprendre les voies de drainage choroïdiennes.

BIBLIOGRAPHIE

1. HAYREH SS. Segmental nature of the choroidal vasculature. *Br J Ophthalmol*, 1975;59:631-648.

2. HAYREH SS. Posterior ciliary artery circulation in health and disease: the Weisenfeld lecture. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2004;45:749-757; 748.
3. HAYREH SS. In vivo choroidal circulation and its watershed zones. *Eye*, 1990;4:273-289.
4. YANNUZZI LA, HOPE-ROSS M, SLAKTER JS *et al*. Analysis of vascularized pigment epithelial detachments using indocyanine green videoangiography. *Retina*, 1994;14:99-113.
5. CHEUNG CMG, LEE WK, KOIZUMI H *et al*. Pachychoroid disease. *Eye*, 2019;33:14-33.
6. VERMA A, MARAM J, ALAGORIE AR *et al*. Distribution and location of vortex vein ampullae in healthy human eyes as assessed by ultra-widefield indocyanine green angiography. *Ophthalmol Retina*, 2020;4:530-534.
7. VERMA A, BACCI T, SARRAF D *et al*. Vortex vein imaging: what can it tell us? *Clin Ophthalmol*, 2021;15:3321-3331.
8. MORIYAMA M, CAO K, OGATA S *et al*. Detection of posterior vortex veins in eyes with pathologic myopia by ultra-widefield indocyanine green angiography. *Br J Ophthalmol*, 2017;101:1179-1184.
9. SPAIDE RF. Choroidal blood flow. Review and potential explanation for the choroidal venous anatomy including the vortex vein system. *Retina*, 2020;40:1851-1864.
10. SPAIDE RF, LEDESMA-GIL G, GEMMY CHEUNG CM. Intervortex venous anastomosis in pachychoroid-related disorders. *Retina*, 2021;41:997-1004.
11. PHASUKKIJWTANA N, FREUND KB, DOLZ-MARCO R *et al*. Peripapillary pachychoroid syndrome. *Retina*, 2018;38:1652-1667.
12. MICHEL CC, WOODCOCK TE, CURRY FRE. Understanding and extending the Starling principle. *Acta Anaesthesiol Scand*, 2020;64:1032-1037.
13. SPAIDE RF, GEMMY CHEUNG CM, MATSUMOTO H *et al*. Venous overload choroidopathy: A hypothetical framework for central serous chorioretinopathy and allied disorders. *Prog Retin Eye Res*, 2021;100973.
14. ABDELMASSIH Y, AZAR G, BONNIN S *et al*. COVID-19 associated choroidopathy. *J Clin Med*, 2021;10:4686.

Les auteurs ont déclaré ne pas avoir de conflits d'intérêts concernant les données publiées dans cet article.